

การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งด้วยการปรับลำดับการ

ลงจอด : กรณีศึกษาสนามบินสุวรรณภูมิ



ณัฐวาทม์ จิระมวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการโลจิสติกส์)

คณะสถิติประยุกต์

สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

2563

การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งด้วยการปรับลำดับการ

ลงจอด : กรณีศึกษาสนามบินสุวรรณภูมิ

ณัฐฐา วุฒิ จิระมวัฒน์

คณะสถิติประยุกต์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ จันทร์สุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาแล้วเห็นสมควรอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการโลจิสติกส์)

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจน์ภา อมรชกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สราวุธ จันทร์สุวรรณ)

..... กรรมการ
(ดร. ศิวิกา ดุษฎีโหนด)

..... กรรมการ
(นาวาอากาศตรี ดร. วัฒนา มานนท์)

..... คณบดี
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ ลีอนาม)

____/____/____

บทคัดย่อ

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งด้วยการปรับลำดับการลงจอด : กรณีศึกษาสนามบินสุวรรณภูมิ
ชื่อผู้เขียน	นายณัฐราชูฑ์ จิระธัมมวัฒน์
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการโลจิสติกส์)
ปีการศึกษา	2563

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งด้วยการปรับลำดับการลงจอด : กรณีศึกษาสนามบินสุวรรณภูมิ มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดการล่าช้าต่อการลงจอดของอากาศยานขาเข้า กรณีศึกษาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (2) เพื่อพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานในช่วงขาสุดท้าย (Final Approach Phase) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดต้นทุนดำเนินการและสามารถเพิ่มความจุของทางวิ่งได้ (Runway Capacity) (3) เพื่อนำผลจากการศึกษามาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวางแผนเชิงปฏิบัติการให้กับเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศต่อไป โดยใช้ข้อมูลเที่ยวบินอากาศยานขาเข้าสนามบินสุวรรณภูมิ เพื่อศึกษาลักษณะของชุดรูปแบบอากาศยานขาเข้า (Traffic Mix) และปัจจัยซ่อนเร้นที่มีผลต่อความสามารถในการรองรับความจุทางวิ่งโดยข้อมูลที่ต้องเก็บประกอบด้วยแบบอากาศยาน ความเร็ว ระยะเวลาคาดการณ์ในการลงจอด ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นผู้ให้บริการงานควบคุมจราจรทางอากาศในประเทศไทย โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองลำดับอากาศยานลงจอดโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจากทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยเปลี่ยนจากต้นทุนการเดินทางของพนักงานขาย (C_{ij}) เป็นระยะเวลาระหว่างอากาศยาน (T_{ij}) ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณความจุของทางวิ่ง (Runway Capacity) นั้น ประกอบด้วย 2 ภาควิชาหลักคือ ปัจจัยจากการจัดระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยาน พิจารณาจากกระแสน้ำอากาศยานปั่นป่วนจากอากาศยาน และปัจจัยจากเวลาในการครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน (Runway Occupancy Time) ซึ่งปัจจัยทั้ง 2 ส่วนมีความแปรผันขึ้นอยู่กับสภาพการจราจร (Traffic Mix) ในสภาพการจราจรที่ประกอบไปด้วยแบบเครื่องและลำดับการลงจอดที่มีความแตกต่างกัน เป็นผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการลงจอดมีความแตกต่างกันด้วย การจัดลำดับการลงจอดอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่สามารถเพิ่มศักยภาพในการรองรับปริมาณเที่ยวบิน หรือความจุของทางวิ่งได้ และผลทดสอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์กับสภาพการจราจรทำให้พบว่า ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการพัฒนานั้นเมื่อนำมาใช้กับข้อมูลจำลองสามารถตอบสนองเป้าหมายได้ทุก

เป้าหมาย โดยสามารถลดต้นทุนค่าเสียโอกาสจากค่าธรรมเนียมการใช้ทางวิ่งของท่าอากาศยาน ลด
ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน ลดต้นทุนค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการ
พิจารณาลำดับการลงจอดของอากาศยานในอนาคตนอกจากความจุทางวิ่ง



ABSTRACT

Title of Thesis	Developing Mathematical Model for Improving Runway's Capacity Using Landing Re-sequencing Approach : Case Study Suvarnnabhumi Airport
Author	Natthawut Jirathamawat
Degree	Master of Science (Logistics Management)
Year	2020

This research develops a mathematical model for improving runway's capacity using landing re-sequencing approach. The case study Suvarnnabhumi airport is applied. The objectives of this study are to (1) study the factor causing delay of arrival traffic at Suvarnnabhumi airport, (2) develop a mathematical model for re-sequencing of landing aircraft in the final approach phase to maximize the runway capacity and (3) apply the result of study as a tool to improve planning strategy for the air traffic controller in the future. The data used in this study includes the arrival flight information at Suvarnnabhumi airport consisting of the traffic mix and the aircraft's individual data including type, final approach speed, estimated landing time and actual landing time, supported by Aeronautical Radio of Thailand, the company responding for the air traffic services in Thailand. The mathematical model developed in this study is applied from the Travelling Salesman Problem by changing some model structure and parameters (from cost of travelling between city or node : C_{ij} to separated time between each aircraft) and found that the key factors affecting the runway capacity

are As a result of the study, the factor affecting the runway capacity are the wake turbulence separation and runway occupancy time. The variation of the two factors' value depends on traffic mix, both type and sequence of arrival aircraft. The changing of type and sequence causes changing of separation time that air traffic controller has to separate each aircraft in order to provide safety. Therefore, efficiently re-sequencing the arrival traffic can be an effective tool to help improving runway's capacity. The results of the simulation test show that the improved mathematical model for solving air traffic re-sequencing problem can genuinely solve all the concerning issues including minimizing airport opportunity cost from runway usage fare, minimizing excess fuel cost and minimizing excess carbon tax cost which can be the factors to be considered in the future for arrival traffic sequencing.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สราวุธ จันทร์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยที่กรุณาให้คำปรึกษา ตลอดถึงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจและความทุ่มเทของอาจารย์ที่มีต่อศิษย์ และขอกราบขอบคุณไว้ด้วยความเคารพอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณศวิต เลื่อนนักรบ ผู้จัดการงานควบคุมจราจรทางอากาศ ศูนย์ควบคุมจราจรทางอากาศสุวรรณภูมิ บริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย ตลอดถึงบริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทยที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่จำเป็นต่อการดำเนินการวิจัย และให้โอกาสผู้วิจัยได้เข้าสังเกตการณ์การปฏิบัติงานควบคุมจราจรทางอากาศ ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดี ทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคุณอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและขอมอบความกตัญญูตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ณัฏฐา วุฒิ จิรธัมมวัฒน์

ตุลาคม 2563

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	6
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	6
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	7
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	7
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีแนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การควบคุมจราจรทางอากาศ	9
2.1.1 การนำเครื่องบินออกจากสนามบิน	10
2.1.2 การนำเครื่องบินเข้ามายังสนามบิน.....	12
2.2 กฎการบินที่กำหนดโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ.....	12
2.2.1 การจัดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยาน.....	12
2.2.1.1 การจัดระยะห่างในแนวตั้ง (Vertical Separation).....	13
2.2.1.2 การจัดระยะห่างในแนวระดับ (Horizontal Separation)	13

2.2.2 การจัดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยานตามกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน	15
2.2.2.1 การจำแนกขนาดของอากาศยานโดยพิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน	16
2.2.2.2 การจัดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยาน	16
2.2.3 การอนุญาตให้ลงจอด	18
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความจุของทางวิ่ง.....	18
2.4 ผลกระทบจากมลภาวะเรือนกระจกจากภาคอุตสาหกรรมการบิน.....	21
2.5 ระบบการจัดลำดับอากาศยานขาเข้า Arrival Manager (AMAN).....	22
2.6 ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ	23
2.7 ทฤษฎีตัวแบบการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem).....	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับลงจอด	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 การเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา	30
3.1.1 ข้อมูลหลักสถิติ.....	30
3.1.2 ข้อมูลสนับสนุน	30
3.2 ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	31
3.2.1 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables).....	33
3.2.2 พารามิเตอร์ (Parameters).....	33
3.2.3 สมการแบบหลายเป้าประสงค์ (Multiobjective).....	34
3.2.3.1 เป้าประสงค์ที่ 1 : เพิ่มประสิทธิภาพให้กับทางวิ่ง (Maximize the runway throughput).....	35
3.2.3.2 เป้าประสงค์ที่ 2 : ลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน (Minimize Excess Fuel Cost).....	37
3.2.3.3 เป้าประสงค์ที่ 3 : ลดค่าภาษีคาร์บอน (Minimize Excess Carbon Tax)...	40
3.2.4 สมการข้อจำกัด (Constraints)	41

3.2.4.1	ข้อจำกัดเพื่อแก้ปัญหาการจัดลำดับเข้าซื้อ	41
3.2.4.2	ข้อจำกัดเพื่อการจัดระยะห่างที่ปลอดภัยในการลงจอดของอากาศยาน	41
3.2.4.3	ข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการลงจอด	42
3.2.4.4	ข้อจำกัดในการหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อจัดระยะห่างระหว่างอากาศยาน	42
3.3	การวิเคราะห์ข้อมูล	44
บทที่ 4	ผลการศึกษา	47
4.1	ผลการทดสอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์	47
4.1.1	ผลการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเป้าประสงค์ด้านการค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่า ภาษีคาร์บอนส่วนเกิน	48
4.1.2	ผลการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเป้าประสงค์ที่มีความสมดุลกัน	53
4.1.3	ผลการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเป้าประสงค์ด้านการลดค่าเสียโอกาสของท่า อากาศยาน	59
4.2	สรุปผลการทดสอบตัวแบบคณิตศาสตร์	65
4.2.1	สรุปผลการทดสอบด้านการลดต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน	65
4.2.2	สรุปผลการทดสอบด้านการลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน	66
4.2.3	สรุปผลการทดสอบด้านการลดต้นทุนค่าภาษีคาร์บอน	67
4.2.4	สรุปผลการทดสอบในภาพรวม	68
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
5.1	สรุปผลการวิจัย	69
5.2	ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม		72
ประวัติผู้เขียน		75

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ขนาดของอากาศยานโดยพิจารณาจากระดับกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน...	16
ตารางที่ 2.2 การจัดระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากระดับกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานโดยใช้ระยะเวลาเป็นเกณฑ์	16
ตารางที่ 2.3 การจัดระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากระดับกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานโดยใช้ระยะทางเป็นเกณฑ์	17
ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
ตารางที่ 3.1 ค่าใช้จ่ายในการใช้ทางวิ่งพิจารณาจากน้ำหนักสูงสุดวิ่งขึ้นของอากาศยาน	36
ตารางที่ 3.2 อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยาน	38
ตารางที่ 3.3 ระยะเวลาจากจุดแรกเข้าถึงจุดเริ่มต้นทางวิ่ง	45
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 1	48
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 2	51
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 3	54
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 4	56
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 5	59
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 6	62
ตารางที่ 4.7 ผลสรุปต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน	66
ตารางที่ 4.8 ผลสรุปต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน	67
ตารางที่ 4.9 ผลสรุปต้นทุนค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน	67
ตารางที่ 4.10 ผลสรุปต้นทุนรวมที่เกิดจากการลงจอดลำช้าของเที่ยวบิน	68

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1 โครงสร้างต้นทุนของสายการบินในปีพ.ศ. 2557.....	3
ภาพที่ 1.2 การจัดลำดับลงจอดของอากาศยานมีผลต่อระยะเวลาโดยรวมของระบบ	6
ภาพที่ 2.1 การจัดระยะห่างในแนวดิ่ง (Vertical Separation).....	13
ภาพที่ 2.2 การจัดระยะห่างในแนวระดับ (Horizontal Separation) สำหรับการควบคุมการจราจรทางอากาศโดยไม่มีระบบติดตามอากาศยาน (RADAR).....	15
ภาพที่ 2.3 กระแสอากาศปั่นป่วน	15
ภาพที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความจุของทางวิ่ง	21
ภาพที่ 2.5 รูปแบบเปรียบเทียบระหว่าง TSP และ TSP สำหรับการจัดลำดับจราจรทางอากาศ	25
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา.....	29
ภาพที่ 3.2 ลักษณะการเข้าสู่ช่วงสุดท้ายของการเข้าสู่สนามบินของอากาศยาน	32
ภาพที่ 3.3 โครงร่างพื้นที่เขตการบินท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ.....	43
ภาพที่ 3.4 รูปแบบการเข้าสู่สนามบินโดยวิธีปฏิบัติแบบใช้เครื่องวัดประกอบการบิน	46
ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 1.....	50
ภาพที่ 4.2 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 2	52
ภาพที่ 4.3 แผนภูมิแสดงค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 3.....	55
ภาพที่ 4.4 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 4	58
ภาพที่ 4.5 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 5	61
ภาพที่ 4.6 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 6	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การคมนาคมทางอากาศถือเป็นช่องทางการคมนาคมที่ได้รับการพัฒนาและทวีความนิยมสูงสุดในรอบศตวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากการคมนาคมทางอากาศนั้นเป็นช่องทางที่มีความสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยสูงสุด เมื่อเทียบกับช่องทางการคมนาคมอื่น ๆ อันประกอบด้วย การคมนาคมทางบก การคมนาคมทางน้ำ และการคมนาคมโดยระบบราง แม้การคมนาคมทางอากาศจะมีต้นทุนในการให้บริการและการเก็บค่าบริการสูงกว่าช่องทางการคมนาคมอื่น ๆ ก็ตาม

การพัฒนาที่เห็นได้ชัดเจนของการคมนาคมทางอากาศได้แก่ การพัฒนาสมรรถนะขีดความสามารถของอากาศยานให้มีความสามารถตรงตามลักษณะการใช้งาน อาทิ อากาศยานทางการทหาร อากาศยานเพื่อการขนส่งผู้โดยสาร และอากาศยานเพื่อการขนส่งสินค้า ซึ่งสามารถตอบสนองการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ได้อย่างดี เป็นเหตุให้การคมนาคมทางอากาศได้รับความนิยมสูงขึ้น และส่งผลให้ปริมาณของอากาศยานบนน่านฟ้าก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ข้อมูลจาก airliners.net ระบุว่า ในปัจจุบันมีอากาศยานที่พร้อมปฏิบัติงานทั้งในส่วน of อากาศยานทหารและอากาศยานพาณิชย์ (ไม่นับรวมอากาศยานขนาดเล็ก) กว่า 39,000 ลำ จากจำนวนอากาศยานที่มีอยู่กว่า 39,000 ลำนั้น มีอากาศยานทำการบินพร้อมกัน in อากาศมากถึงกว่า 8,000 ลำต่อชั่วโมง และมีผู้โดยสารที่ใช้บริการการคมนาคมทางอากาศสูงถึง 2.26 พันล้านคนในปี พ.ศ.2549 และเพิ่มสูงขึ้นเป็น 3.77 พันล้านคนในปี พ.ศ.2559 ข้อมูลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าการคมนาคมทางอากาศนั้นมีความเจริญก้าวหน้าและมีความซับซ้อนอย่างมาก เมื่อพิจารณาถึงสถานการณ์ที่มีอากาศยานกว่า 8,000 ลำทำการบินอยู่ในอากาศในเวลาเดียวกัน ซึ่งอากาศยานเหล่านั้นจะไม่สามารถทำการบินไปตามเส้นทางเป้าหมายของแต่ละลำได้อย่างปลอดภัยได้ หากไม่มีระบบการจัดการที่เป็นมาตรฐานและมีประสิทธิภาพ การจัดการดังกล่าวเรียกว่าการจัดการจราจรทางอากาศซึ่งมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งยวดในการกำกับให้ระบบการเดินอากาศของอากาศยานเป็นไปอย่างมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

หน้าที่ในการจัดลำดับอากาศยานเข้าสู่เส้นทางบินสุดท้ายนั้นเป็นหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเขตประชิดสนามบิน (Approach Controller) ซึ่งต้องตัดสินใจในช่วงเวลาจำกัดบนข้อจำกัดมากมาย อาทิ กฎการบินที่ถูกกำหนดโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (International Civil Aviation Organization : ICAO) ที่สำคัญคือการจัดระยะต่อระยะเคียงของอากาศยานแต่ละแบบ ไม่ให้ได้รับผลกระทบจากกระแสอากาศปั่นป่วน (Wake Turbulence) รวมถึงยังต้องจัดลำดับอากาศยานให้ไม่อยู่ห่างจากกันมากเกินไป เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในการบริการ รวมถึงการบริการให้เกิดความพึงพอใจแก่ผู้เดินอากาศไม่ให้มีผู้ที่ได้รับผลกระทบจากการล่าช้าเกินไป ซึ่งปัญหาความล่าช้านั้นเป็นชนวนของปัญหาที่ตามมาอีกมากมายหลายประการ ดังนี้

1) ปัญหาค่าใช้จ่ายที่ปรับตัวสูงขึ้นของสายการบิน ระยะเวลาในการปฏิบัติการบินที่สูงขึ้นของอากาศยานมีผลต่อค่าใช้จ่ายในแต่ละเที่ยวบินของสายการบิน ดังนี้

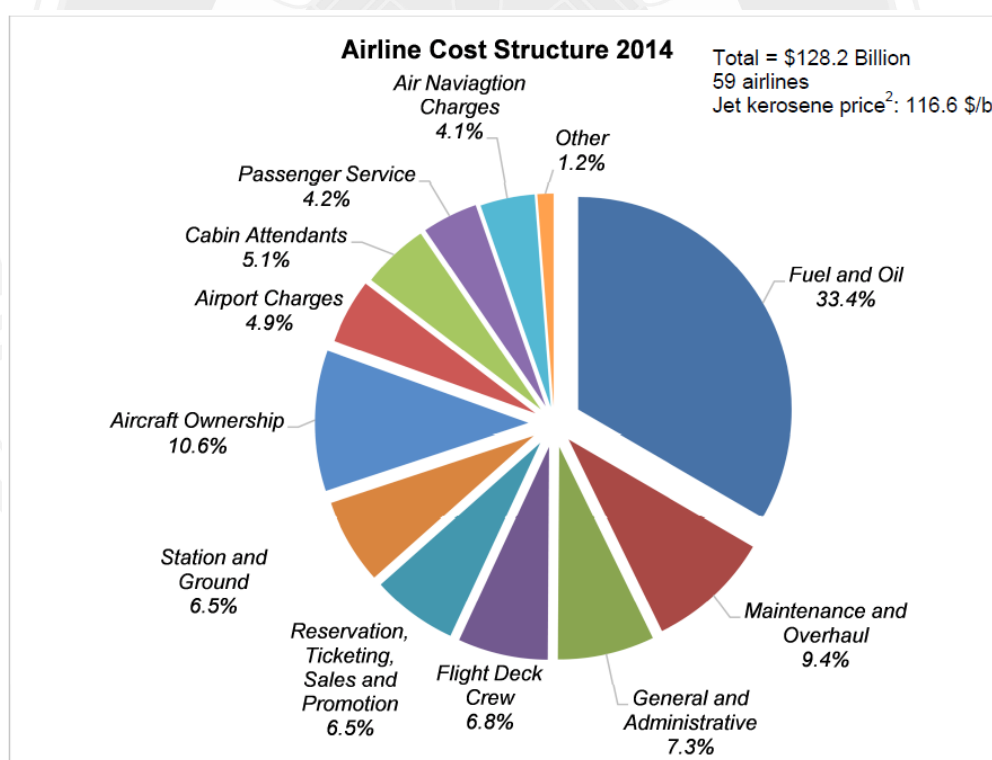
(1) ค่าเชื้อเพลิง ต้นทุนด้านเชื้อเพลิงเป็นต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ที่ชัดเจนที่สุดที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการทำการในอากาศนานขึ้น การบินวนรอ (Holding) เพื่อรอคำอนุญาต (Clearance) ให้ทำการบินเข้าหาสนามบิน (Approach) เมื่ออากาศยานจำเป็นจะต้องใช้เวลาบนอากาศนานขึ้นเนื่องจากไม่สามารถลงจอดตามระยะเวลาที่กำหนดได้ การบินวนเพื่อรอลงจอดนั้นก็จะต้องมีการเผาผลาญพลังงานคือเชื้อเพลิงจำนวนมาก หรือการที่อากาศยานจะต้องเปลี่ยนเส้นทางไปลงจอดยังสนามบินสำรองที่ได้ส่งแผนการบินไว้ในกรณีที่อากาศยานไม่สามารถรอลำดับการลงจอดที่สนามบินปลายทางเดิมได้ต่อไป ก็จะทำให้เพิ่มความสิ้นเปลืองมากกว่าเดิม รวมถึงจะมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งผู้โดยสารและสินค้าจากสนามบินสำรองกลับมายังสนามบินปลายทางด้วย ซึ่งเป็นต้นทุนที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ให้กับสายการบิน

(2) ค่าเช่าหรือผ่อน ค่าเช่าหรือผ่อนเป็นต้นทุนประเภทคงที่ (Fixed Cost) ของสายการบิน ซึ่งสายการบินมีภาระจะต้องจ่ายไม่ว่าอากาศยานลำนั้นจะได้ทำการบินหรือไม่ แต่หากพิจารณาค่าใช้จ่ายดังกล่าวเป็นระยะเวลาที่ก่อให้เกิดการใช้งาน (Utilization Time) แล้ว จะพบว่า ยิ่งเวลาที่อากาศยานอยู่ในอากาศต่อเที่ยวบินนานเท่าไร ก็จะทำให้โอกาสในการเพิ่มจำนวนเที่ยวบินของอากาศยานลำนั้นลดลงไปด้วย หากสายการบินจำเป็นต้องเผื่อเวลาสำหรับล่าช้าไว้ในปริมาณที่มากสายการบินจะไม่สามารถใช้อากาศยานได้อย่างคุ้มค่า ซึ่งสะท้อนให้เห็นความคุ้มค่าของการใช้อากาศยาน (Aircraft Utilization) จำนวนเที่ยวบินต่อลำอากาศยานที่สามารถปฏิบัติงานได้ก็จะลดลง ในขณะที่ค่าเช่าหรือค่าผ่อนมีค่าเท่าเดิม รวมทั้งค่าเสื่อมราคาต่าง ๆ ก็ยังคงมีค่าเท่าเดิม แต่สายการบินสามารถสร้างรายได้จากการทำการบินได้ลดลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการทำการบินต่อเที่ยวบินที่เพิ่มสูงขึ้น

(3) ค่าใช้จ่ายด้านค่าธรรมเนียมสนามบิน แต่ละสายการบินจะต้องจ่ายค่าธรรมเนียมให้กับแต่ละสนามบิน ทั้งในการจ่ายค่าหลุมจอดและค่าพื้นที่ในการปฏิบัติงานของหน่วยสนับสนุนการบินภาคพื้น หากการดำเนินการภาคอากาศมีความคล่องตัว สายการบินก็สามารถเพิ่มเที่ยวบินของอากาศยานได้ และค่าใช้จ่ายที่เสียไปให้กับสนามบินต่อเที่ยวบินก็จะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลให้ต้นทุนของแต่ละเที่ยวบินลดลงด้วย

(4) ค่าใช้จ่ายด้านค่าจ้างพนักงาน เมื่ออากาศยานไม่สามารถลงจอดได้ตามเวลา คาดหมาย พนักงานที่ปฏิบัติการบนอากาศยานซึ่งประกอบด้วยนักบิน (pilot) ช่างเครื่อง (mechanic) และลูกเรือ (air crew) จะมีชั่วโมงทำงานเพิ่มขึ้น ซึ่งล้วนเป็นค่าใช้จ่ายของสายการบินที่จะต้องรับภาระมากขึ้น

(5) ค่าใช้จ่ายด้านค่าบำรุงรักษาอากาศยาน เมื่ออากาศยานมีการทำการบินล่าช้า ทำให้เกิดการล่าช้าในการรื้อขึ้นหรือรื้อลง ส่งผลต่อชั่วโมงปฏิบัติงานที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อการซ่อมบำรุงอากาศยานที่จะเข้าตรวจสอบสภาพและเปลี่ยนอะไหล่เมื่อมีการทำการบินครบชั่วโมงที่ได้กำหนดไว้



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างต้นทุนของสายการบินในปีพ.ศ. 2557

แหล่งที่มา: EUROCONTROL, 2015.

จากภาพที่ 1.1 ซึ่งเป็นแผนภูมิโครงสร้างต้นทุนของสายการบินซึ่งรายงานในเอกสาร Standard Inputs for EUROCONTROL Cost-Benefit Analyses ของ Eurocontrol พ.ศ.2557 ซึ่งเป็นข้อมูลที่เก็บจากสายการบินจำนวน 59 สายการบินทั่วโลก แสดงให้เห็นว่าต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอากาศยานถือเป็นสัดส่วนที่เยอะที่สุด คือ 33.4% ของต้นทุนสายการบินทั้งหมด ตามด้วยต้นทุนค่าจ้างพนักงาน 11.9% ค่าถือครองอากาศยาน 10.6% ค่าบำรุงรักษาอากาศยานอีก 9.4% รวมถึงค่าธรรมเนียมสนามบินอีก 4.9% ซึ่งค่าใช้จ่ายทั้ง 5 รายการหลักแสดงให้เห็นว่า การล่าช้าในการลงจอดของเที่ยวบินจะกระทบต้นทุนส่วนใหญ่ของสายการบินอย่างมาก และภาระดังกล่าวจะถูกผลักกลับมาหาผู้โดยสารเพื่อให้สายการบินยังสามารถทำกำไรได้

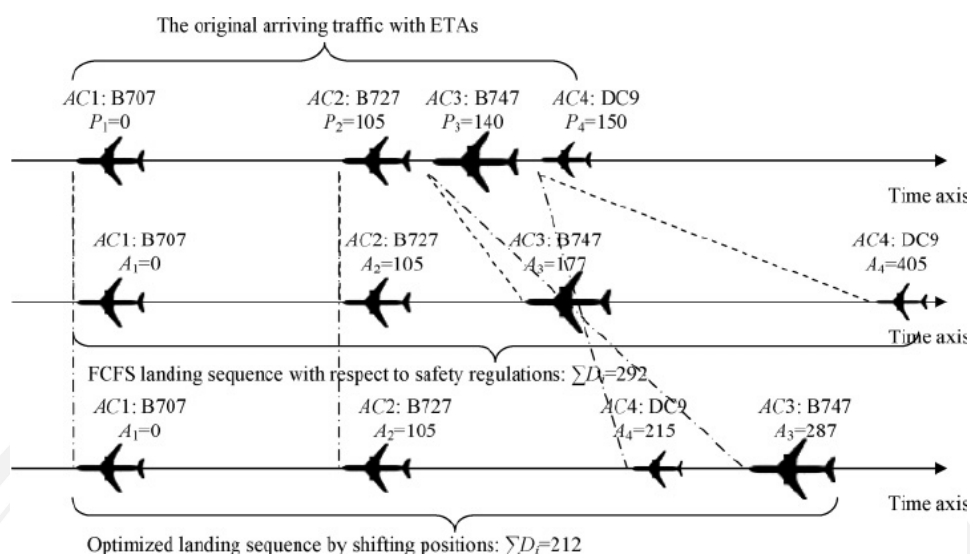
2) ปัญหาความไม่มีประสิทธิภาพในการทำงานของหน่วยสนับสนุนการบิน การล่าช้าในจุดใดจุดหนึ่งของระบบงานการบินจะส่งผลกระทบต่อระบบอย่างใหญ่หลวง เนื่องจากแต่ละเที่ยวบินมีเวลาในการปฏิบัติงานที่ค่อนข้างแน่นอนและจำกัด เมื่อเครื่องลงจอดช้า จะทำให้มีเวลาในการปฏิบัติงานภาคพื้น อันได้แก่ การถ่ายโอนผู้โดยสารขึ้น – ลง การขนสินค้าขึ้น – ลง การซ่อมบำรุง เติมน้ำมัน และการตรวจสอบสภาพความพร้อมอื่น ๆ ก่อนทำการบิน มีเวลาลดลง และจะทำให้เกิดการล่าช้าสะสมคือสามารถวิ่งขึ้นได้ช้ากว่ากำหนด ไม่เป็นไปตามแผนการบินและตารางการบินที่ได้ทำการขออนุญาตและประชาสัมพันธ์ไว้ ซึ่งงานภาคพื้นแต่ละรายการล้วนเป็นงานที่ต้องเร่งทำงานภายใต้ช่วงเวลาที่จำกัด เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องต้องทำงานแข่งกับเวลาเพื่อให้ทันกับเวลาวิ่งขึ้นในเที่ยวบินถัดไป อันจะนำมาซึ่งความไม่ปลอดภัยของการทำการบินได้ เนื่องจากเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายต้องปฏิบัติงานภายใต้สภาวะความเครียดและกดดัน สภาพความหนาแน่นของท่าอากาศยานทั้งในส่วนพื้นที่เขตปฏิบัติการการบิน (Airside) และพื้นที่นอกเขตปฏิบัติการการบิน (Landside) เนื่องจากการที่ไม่สามารถระบายอากาศยาน ผู้โดยสาร และสินค้าได้ตามช่วงเวลาที่กำหนด (Time Window) ปัญหาความล่าช้าต่อเนื่อง เมื่ออากาศยานลำหนึ่งเกิดการล่าช้า จะก่อให้เกิดผลกระทบกับอากาศยานอื่นทั้งระบบ ไม่เพียงแต่ ณ ที่สนามบินที่เกิดการล่าช้า แต่จะเป็นเหตุให้เกิดความล่าช้าและความซับซ้อนในการบริหารจัดการไปยังสนามบินต้นทางหรือปลายทางด้วย

3) ปัญหาค่าใช้จ่ายของท่าอากาศยาน ในสถานการณ์ปกติ ท่าอากาศยานมักได้รับการคาดหวังว่าจะเป็นฝ่ายที่ได้ประโยชน์โดยสมบูรณ์จากการเข้ามาใช้งานของอากาศยานและสายการบิน แต่หากพิจารณาให้ดีแล้วจะพบว่าท่าอากาศยานเองก็จะได้รับผลกระทบจากการที่มีการลงจอดล่าช้าของอากาศยานเช่นกัน โดยท่าอากาศยานจะต้องมีผู้โดยสารตกค้างเพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีเจ้าหน้าที่เข้ามาบริหารจัดการจำนวนมากขึ้น มีจำนวนอากาศยานที่เข้ามาใช้บริการต่อชั่วโมงลดลง และในระยะยาวหากท่าอากาศยานร่วมกับหน่วยงานควบคุมการจราจรทางอากาศไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ จะกระทบต่อภาพลักษณ์ของท่าอากาศยาน และมีความต้องการเดินทางมายังท่าอากาศยานดังกล่าวลดลงในที่สุด

4) ปัญหามลภาวะ เมื่ออากาศยานมีการลงจอดล่าช้ากว่ากำหนดเวลาคาดหมาย ก็หมายถึงการที่อากาศยานจะต้องเผาผลาญเชื้อเพลิงสำรองมากขึ้น ซึ่งผลจากการสันดาปที่ทิ้งไว้ก็คือมลภาวะทาง

อากาศ โดยเฉพาะในเขตประชิดสนามบินที่อากาศยานทำการบินด้วยระดับความสูงที่ไม่มากนัก ก๊าซพิษต่าง ๆ จึงปกคลุมโดยรอบบริเวณพื้นที่ อีกประการหนึ่งคือมลภาวะทางเสียงซึ่งจะกระทบต่อผู้อยู่อาศัยโดยรอบสนามบิน ซึ่งในยุคปัจจุบันหลายประเทศเริ่มหันมาให้ความสนใจกับการแก้ปัญหาภาวะมลภาวะโดยรอบสนามบินเป็นอย่างมาก ปัญหามลภาวะจึงเป็นปัญหาหนึ่งที่จะได้รับการแก้ไขหากสามารถแก้ปัญหาการล่าช้าของอากาศยานได้ นอกจากนี้ในอนาคตอาจมีการนำมาตรการจัดเก็บภาษีจากการปล่อยมลภาวะสู่บรรยากาศมาใช้เพื่อเป็นการกระตุ้นให้เกิดการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็นต้นทุนอีกประการหนึ่งของสายการบินในอนาคต ปัญหาเหล่านี้เป็นผลกระทบจากการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานที่ไม่เหมาะสม และก่อให้เกิดความล่าช้าในการปฏิบัติงานโดยภาพรวม ทั้งนี้ นโยบายที่เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศใช้อยู่ในปัจจุบันคือการให้บริการกับผู้มาถึงก่อน (First Come First Serve) ซึ่งวิธีการดังกล่าวอาจไม่ใช่วิธีการที่ดีที่สุดในการบริหารจัดการอากาศยาน

จากภาพที่ 1.2 ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Xiao-Bing Hu (2011) แสดงให้เห็นว่า การใช้นโยบาย FCFS จะทำให้ชุดอากาศยานขาเข้าใช้เวลาในการลงจอดได้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลา 405 วินาที แต่การจัดลำดับอากาศยานลงจอดใหม่นั้นสามารถทำให้อากาศยานทั้ง 4 ลำสามารถลงจอดได้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาเพียง 287 วินาทีเท่านั้น ซึ่งสามารถประหยัดเวลา (รวมค่าใช้จ่าย เชื้อเพลิง มลภาวะ) ที่เกิดขึ้นในห้วงอากาศได้มากถึง 118 วินาที หรือเกือบ 2 นาที ซึ่งเวลาดังกล่าวเพียงพอจะรองรับการลงจอดของอากาศยานได้อย่างน้อย 1 ลำ และเมื่อคิดในมุมกลับกันที่ว่า หากเวลาดังกล่าวเป็นเวลาที่ล่าช้าจะพบว่า ทุก ๆ ชุดอากาศยานที่ลงจอด 4 ลำ ซึ่งควรจะใช้เวลาลงจอดเพียง 5 นาที แต่เกิดการล่าช้าโดยประมาณ 2 นาที นั่นคือ 16 นาทีต่อชั่วโมง หรือ 384 นาทีต่อวัน ซึ่งถือเป็นการประหยัดเวลาได้อย่างมีนัยสำคัญ ปัญหาการจัดการเที่ยวบินจึงเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไข โดยเฉพาะอย่างยิ่งในก้าวสำคัญของอุตสาหกรรมการบินของไทยที่กำลังจะได้รับการปลดตรงแดงจากองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ หรือ ICAO ที่จะช่วยกระตุ้นการเติบโตและการเพิ่มขึ้นของสายการบินและเที่ยวบินทั้งในและต่างประเทศอีกจำนวนมาก การบริหารจัดการในภาคอากาศก็เป็นตัวแปรและเป็นหัวใจสำคัญที่สะท้อนออกมาได้ดีที่สุดถึงขีดความสามารถและศักยภาพเพื่อนำท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและประเทศไทยก้าวขึ้นไปเป็นศูนย์กลางด้านการบินหรือ Hub ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ด้วยปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จะพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแก้ปัญหาการลงจอดล่าช้าเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับเที่ยวบินให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการเป็นศูนย์กลางด้านการบินของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้



ภาพที่ 1.2 การจัดลำดับลงจอดของอากาศยานมีผลต่อระยะเวลาโดยรวมของระบบ
แหล่งที่มา: Hu & Di Paolo, 2011.

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดการล่าช้าต่อการลงจอดของอากาศยานขาเข้ากรณีศึกษาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ
- 2) เพื่อพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานในช่วงขาลงสุดท้าย (Final Approach Phase) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดต้นทุนดำเนินการและสามารถเพิ่มความจุของทางวิ่งได้ (Runway Capacity)
- 3) เพื่อนำผลจากการศึกษามาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวางแผนเชิงปฏิบัติการให้กับเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศต่อไป

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1) การจัดการในสภาวะปกติ ไม่มีเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือเหตุปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อการทำการบิน อาทิ การปิดพื้นที่ในห้วงอากาศ หรือการทำการบินในลักษณะพิเศษที่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานที่มีหน้าที่อนุมัติทำการบิน
- 2) เที่ยวบินทุกลำมีระดับความสำคัญเท่ากันและปฏิบัติตามคำแนะนำของเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1) งานวิจัยนี้พิจารณาครอบคลุมการจัดลำดับอากาศยานเข้าจากจุดเริ่มต้นของช่วงขาสุดท้ายเข้าสู่สนามบิน (Initial Approach Fix) กระทั่งอากาศยานเลี้ยวออกจากทางวิ่งพื้นเขตหยุดรอ (Runway Holding Position)

2) งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลเที่ยวบินอากาศยานเข้าสนามบินสุวรรณภูมิเป็นเวลา 1 เดือน คือในเดือนพฤศจิกายน 2560 เพื่อศึกษาลักษณะของชุดรูปแบบอากาศยานเข้า (Traffic Mix) และปัจจัยแฝงที่มีผลต่อความสามารถในการรองรับความจุทางวิ่งโดยข้อมูลที่ต้องเก็บประกอบด้วยแบบอากาศยาน ความเร็ว ระยะเวลาคาดหมายในการลงจอด และเวลาลงจอดจริง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นผู้ให้บริการงานควบคุมจราจรทางอากาศในประเทศไทย

3) งานวิจัยนี้ใช้กฎการบินซึ่งกำหนดโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) ซึ่งเป็นกฎการบินที่เป็นสากลและเป็นกฎการบินที่ประเทศไทยถือปฏิบัติอยู่ ประกอบกับวิธีปฏิบัติและข้อตกลงเฉพาะพื้นที่ (Local Procedure) ของสนามบินสุวรรณภูมิ

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

อากาศยาน (Aircraft) หมายถึง สิ่งหรือเครื่องที่สามารถบินได้โดยได้รับการรองรับจากอากาศหรือโดยทั่วไปคือชั้นบรรยากาศของโลก มันสามารถต้านแรงดึงดูดของโลกโดยใช้แรงลอยตัว (Buoyancy หรือ static lift) หรือใช้แรงยกพลศาสตร์ (dynamic lift) ของ airfoil อย่างใดอย่างหนึ่ง, หรือมีไม่ก็กรณีที่ใช้แรงขับลงด้านล่าง (downward thrust) จากเครื่องยนต์ไอพ่น

ทางวิ่ง (Runway) หมายถึง พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าบนพื้นดิน ภายในบริเวณสนามบิน ซึ่งเตรียมการไว้สำหรับอากาศยานใช้ในการร่อนลงจอดและวิ่งขึ้น ทางวิ่งเครื่องบินแบ่งออกเป็นประเภทที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยใช้วัสดุประเภทแอสฟัลต์ (Asphalt) และคอนกรีต หรือผสมทั้งสองชนิด และประเภทที่ใช้พื้นผิวธรรมชาติ เช่น หญ้า ดิน กรวด น้ำแข็ง และเกลือ

ทางขับ (Taxiway) หมายถึง พื้นที่บนสนามบินที่จัดเตรียมไว้สำหรับให้เครื่องบินขับเคลื่อนระหว่างลานจอดอากาศยานกับทางวิ่ง หรือกล่าวได้ว่า ทางขับเป็นเส้นทาง ที่เชื่อมระหว่างลานจอดอากาศยานกับทางวิ่ง คุณลักษณะของทางขับ เหมือนกับทางวิ่ง คือ ต้องมีพื้นผิวเรียบ และรองรับน้ำหนักเครื่องบินได้ดี ทั้งยังต้องมีความกว้างที่เหมาะสม และปลอดภัยต่อเครื่องบิน

ลานจอดอากาศยาน (Apron) หมายถึง คือ พื้นที่ที่จัดไว้สำหรับเป็นที่จอดเครื่องบิน ซึ่งต้องมีความกว้าง และมีขนาดพอให้เครื่องบินจอด และเข้าออกได้อย่างปลอดภัย นอกจากนั้น ต้องมีพื้นที่

เพียงพอ สำหรับรถบริการที่จะเข้าไปให้บริการด้านต่าง ๆ ในลานจอดอากาศยาน ขณะที่เครื่องบินจอดอีกด้วย ลานจอดอากาศยาน อาจอยู่ชิดกับตัวอาคารผู้โดยสาร หรืออยู่ห่างออกไปจากตัวอาคารผู้โดยสารก็ได้ ขึ้นอยู่กับการให้บริการผู้โดยสารในการขึ้นลงเครื่องบิน ลานจอดอากาศยานที่อยู่ชิดกับตัวอาคารจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าสะพานเทียบเครื่องบิน ยื่นออกไปจากอาคารผู้โดยสาร เพื่อให้เครื่องบินจอดเทียบกับสะพานเทียบเครื่องบิน ซึ่งผู้โดยสารสามารถเดินเข้า-ออกเครื่องบินโดยผ่านสะพานนี้ ผู้โดยสารมักจะนิยมเรียกว่า "งวง" เนื่องจากมีลักษณะเหมือนงวงช้าง ส่วนลานจอดอากาศยานที่อยู่ห่างจากตัวอาคารผู้โดยสารจะต้องมีระบบขนส่งผู้โดยสารระหว่างตัวอาคารและเครื่องบิน

การควบคุมจราจรทางอากาศ (Air Traffic Control Service) หมายถึง การดูแลและจัดการให้การบินและการขับเคลื่อนของอากาศยานดำเนินไปด้วยความเป็นระเบียบ ปลอดภัย และรวดเร็ว ซึ่งแบ่งออกได้เป็น

- 1) การควบคุมจราจรทางอากาศบริเวณท่าอากาศยาน (Aerodrome Control Service)
- 2) การควบคุมจราจรทางอากาศ เขตประชิดท่าอากาศยาน (Approach Control Service)
- 3) การควบคุมจราจรทางอากาศตามเส้นทางบิน (Area Control Service)

ความจุทางวิ่ง (Capacity) หมายถึง ความสามารถสูงสุดในการรองรับเที่ยวบินของทางวิ่ง ซึ่งจะแสดงออกมาในหน่วยเที่ยวบินต่อชั่วโมง โดยไม่ละเมิดกฎการบินขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ และพิจารณาในเกณฑ์ที่มีความต้องการการใช้ทางวิ่งอย่างต่อเนื่อง

ระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่ง (Runway Occupancy Time) หมายถึง ระยะเวลา นับตั้งแต่อากาศยานข้ามส่วนเริ่มต้นของทางวิ่ง (Runway Threshold) กระทั่งส่วนหางของอากาศยานเลี้ยวพ้นจากทางวิ่ง

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1) ผลจากการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปปรับปรุงระบบการให้บริการควบคุมการจราจรทางอากาศของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการเที่ยวบินที่คับคั่งได้
- 2) เป็นข้อมูลและแนวทางในการพัฒนาวิธีการวางแผนการบินในอนาคตเพื่อให้การบินเกิดประสิทธิภาพสูงสุด (มีความจุทางวิ่งมากที่สุด มีความล่าช้าน้อยที่สุด และมีผลกระทบในเชิงมลภาวะต่ำที่สุด)

บทที่ 2

ทฤษฎีแนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษานี้ ผู้ศึกษาได้ทำการทบทวนแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ไขปัญหาการลงจอดของอากาศยาน โดยหัวข้อที่ทำการศึกษาเพื่อเป็นข้อมูลในการทำวิจัยมีดังนี้

- 1) การควบคุมการจราจรทางอากาศ
- 2) กฎการบินที่กำหนดโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ
- 3) ปัจจัยที่มีผลต่อความจุทางวิ่ง
- 4) ผลกระทบจากมลภาวะเรื้อรังจากภาคอุตสาหกรรมการบิน
- 5) ระบบการจัดลำดับอากาศยาน
- 6) ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ
- 7) ทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem)
- 8) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับลงจอด

2.1 การควบคุมจราจรทางอากาศ

องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศได้ให้คำจำกัดความของการเดินทางทางอากาศ หัวใจสำคัญของการเดินทางคือการไปถึงจุดหมายด้วยความปลอดภัยและรวดเร็ว ปัจจัยสำคัญยิ่งประการหนึ่งซึ่งนอกเหนือไปจากการพัฒนาทางเทคโนโลยีของยานพาหนะชนิดต่าง ๆ ตลอดจนการเพิ่มเส้นทางหรือห้วงอากาศสำหรับสัญจรก็คือ การจัดการจราจร หรือควบคุมจราจรนั่นเอง การบัญญัติกฎหมาย กำหนดระเบียบวิธีปฏิบัติการ จำแนกอำนาจหน้าที่ของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการจราจรหรือแม้กระทั่ง การสร้างความเข้าใจให้ตรงกันล้วนแต่เป็นวิธีการและเครื่องมือเพื่อการจัดการหรือการควบคุมจราจรอันเป็นระบบที่นำไปสู่ ความปลอดภัยและรวดเร็วของการจราจรทุกด้านทั้งสิ้นและการจราจรทางอากาศซึ่งมีแผ่นฟ้ากว้างใหญ่ประดุจถนนบนอากาศ ก็ไม่อยู่ในข้อยกเว้น ทั้งยังกล่าวได้ว่ามีความจำเป็นในระดับที่จะขาดไม่ได้เช่นเดียวกับการควบคุมจราจรในการคมนาคมประเภทอื่น ๆ

ด้วยเหตุที่การบินจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจะมีเพียงเส้นตรงเดียวเท่านั้นที่เป็นระยะใกล้ที่สุด หากมีอากาศยานมากกว่าหนึ่งลำขึ้นไป ใช้เส้นทางในการเดินทางไปยังจุดต่าง ๆ หากทำการบินโดยไม่มีการจัดการก็จะมีโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุทางอากาศได้ ขณะที่ใช้ห้วงอากาศ มีความต้องการระดับเพดานบินเดียวกัน มีกำหนดเวลาบินเดียวกัน การควบคุมและจัดการให้อากาศยานทุกลำ เกิดความปลอดภัยได้นั้นต้องอาศัยบุคคลและอุปกรณ์สื่อสารภาคพื้นเป็นเครื่องมือที่ช่วยดำเนินการอย่างเป็นระบบซึ่งเรียกว่า การบริการควบคุมทางอากาศ (Air Traffic Control Service : ATCS) ในการให้บริการควบคุมจราจรทางอากาศนั้น มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ ดังนี้

- 1) เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุระหว่างอากาศยานที่บินอยู่ในอากาศ
- 2) เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุระหว่างอากาศยานกับสิ่งกีดขวางภาคพื้น
- 3) เพื่อให้การจราจรทางอากาศเป็นไปด้วยความสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัย

2.1.1 การนำเครื่องบินออกจากสนามบิน

เมื่อต้องการนำเครื่องบินออกจากสนามบิน นักบินต้องทำแผนการบิน (Flight Plan) ส่งให้กับเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศ (Air Traffic Controller : ATC) ได้รับทราบ ประกอบด้วย ข้อมูลสำคัญได้แก่ รุ่นเครื่องบิน อุปกรณ์ประจำเครื่อง สนามบินปลายทาง สนามบินสำรอง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและความเพียงพอกรณีเครื่องลงสนามบินปลายทางไม่ได้ เส้นทางบินที่จะไป ความเร็วเพดานบินที่ต้องการ (ความสูงที่นักบินขอมาคจะเป็นความสูงที่เครื่องบินสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากที่สุด แต่บางกรณี ATC ไม่สามารถให้ความสูงตามที่ขอได้ เนื่องจากการจราจรที่คับคั่ง เวลาที่คาดว่าจะวิ่งขึ้น เวลาที่คาดว่าจะไปถึง รวมถึงเวลาที่จะผ่านเข้าไปยังเขตประเทศต่าง ๆ (หากเป็นการบินระหว่างประเทศ) เป็นต้น

เมื่อ ATC ได้รับข้อมูลทั้งหมดแล้ว ก็จะตรวจสอบสภาพอากาศและทบทวนแผนการบินอีกครั้ง ก่อนจะพิมพ์ข้อมูลลงในแถบกระดาษรายงานความคืบหน้าของเที่ยวบินที่เรียกว่า Flight Progress Strip แถบกระดาษนี้จะใช้ในการติดตามดูแลเครื่องบินไปตลอดเส้นทาง โดยจะมีการ Update ข้อมูลอยู่ตลอดเวลา หลังจากนักบินได้รับอนุญาตให้นำเครื่องบินออกได้ แถบรายงานการบินจะถูกส่งต่อไปยัง Ground Controller หรือเจ้าหน้าที่ควบคุมภาคพื้นดิน นักบินจะต้องติดต่อกับเจ้าหน้าที่หอบังคับการบิน เพื่อขอติดเครื่องยนต์และขอ Push Back (การดันเครื่องถอยหลัง กรณีจอดเทียบอาคารผู้โดยสาร) เมื่อเครื่องพร้อม ก็จะติดต่อ Ground Controller อีกครั้ง เพื่อขอขับเคลื่อน (Taxi) สำหรับวิ่งขึ้นในลำดับต่อไปและเมื่อเครื่องบินใกล้ถึงรันเวย์ การควบคุมก็จะถูกโอนต่อไปยังหอบังคับการบิน (Local Controller หรือ Tower) หากทุกอย่างเรียบร้อยและปลอดภัย หอบังคับการบินซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการขึ้น-ลงของเครื่องบินทั้งหมดในสนามบินนั้น จะอนุญาตให้นำเครื่องบินขึ้นได้ ด้วยประโยคที่ว่า “Cleared for Takeoff” โดยจะมีการแจ้งความถี่วิทยุใหม่ให้กับนักบิน

ได้รับทราบ เพื่อใช้ในการติดต่อหลังจากนำเครื่องขึ้นแล้ว โดยความถี่ใหม่นี้เป็นของ Departure Controller (เจ้าหน้าที่ควบคุมเครื่องขาออก) ซึ่งประจำการอยู่ที่ TRACON (Terminal Radar Approach Control) ขณะเดียวกันนักบินจะเปิดใช้งานอุปกรณ์ที่เรียกว่า Transponder ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณวิทยุที่เข้ามา แล้วส่งสัญญาณพร้อมข้อมูลที่เข้ารหัสแล้วตอบกลับไป อันประกอบด้วยข้อมูลเที่ยวบิน ความสูง ความเร็ว จุดหมายปลายทาง โดยจะไปปรากฏบนหน้าจอเรดาร์ของเจ้าหน้าที่ควบคุม แต่สำหรับเครื่องบินใหม่ อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานโดยอัตโนมัติ

Departure Controller จะให้ข้อมูลกับนักบินถึงระยะห่างจากเครื่องบินแต่ละลำ พร้อมกับกำหนดทิศทาง ความเร็ว เพดานบิน ซึ่งนักบินต้องปฏิบัติตาม หรืออาจจะแจ้งให้นักบินนำเครื่องบินไปตามเส้นทางขาออกมาตรฐาน (SID : Standard Instrument Departure) จนกระทั่ง Departure Controller เห็นว่าเครื่องเข้าสู่เส้นทางที่ต้องการแล้ว หรือมีความปลอดภัยแล้ว ก็จะส่งต่อการควบคุมให้ ศูนย์ควบคุมการจราจรทางอากาศตามเส้นทางบิน (Area Control) ซึ่งจะมีการแบ่งเขตการทำงานไว้ชัดเจน ทำหน้าที่คอยดูแลจนกระทั่งเครื่องบินนั้นเดินทางถึงที่หมาย หรือพ้นเขตประเทศไปแล้ว การควบคุมการจราจรทางอากาศในเส้นทางบิน แบ่งระดับการช่วยเหลือตามประเภทของเครื่องบินไว้ 2 กลุ่มคือ เครื่องบินที่บินโดยไม่มีอุปกรณ์ช่วยเหลือมากนัก กล่าวคือ บินตามกฎอาศัยทัศนวิสัยเป็นตัวตัดสินใจ (Visual Flight Rule : VFR) อีกกลุ่มคือ เครื่องบินที่มีอุปกรณ์เครื่องวัดประกอบการบิน (Instrument Flight Rule : IFR) เครื่องบินในกลุ่มหลังนี้ต้องทำการบินส่งให้กับศูนย์ควบคุมและต้องรับฟังคำแนะนำตลอดเวลาบิน ซึ่งศูนย์ควบคุมการจราจรทางอากาศจะดูแลให้เครื่องบินกลุ่มนี้อยู่ในตำแหน่งและเส้นทางที่เหมาะสม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมที่เรียกว่า อุปกรณ์ติดตามอากาศยานอัตโนมัติ (Automatic Dependent Surveillance : ADS) ใช้ในการส่งสัญญาณแจ้งตำแหน่งของเครื่องบิน เป็นพิกัดเส้นรุ้งเส้นแวง เพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งและเป็นประโยชน์มากในเส้นทางบินเหนือมหาสมุทร ขณะอากาศยานบินไปตามเส้นทางนั้น เมื่อถึงจุดรายงานตำแหน่ง นักบินจะต้องติดต่อแจ้งข้อมูลให้กับศูนย์ควบคุมฯ ได้ทราบ ในขณะเดียวกันศูนย์ควบคุมฯ ก็จะแจ้งข้อมูลให้กับนักบินทราบตลอดเวลาเช่นกัน ผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศอาจจะสั่งให้เปลี่ยนเส้นทางบิน หรือเปลี่ยนความสูง ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ หรือความคับคั่งของเครื่องบินในเส้นทางบินนั้น ดังนั้น เที่ยวบินหนึ่งๆ อาจไม่ได้ทำการบินตามแผนการบินที่แจ้งไว้แต่แรกก็ได้ เพราะ ATC จะคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลัก (Aerothai, 2559)

2.1.2 การนำเครื่องบินเข้ามายังสนามบิน

การส่งต่อการควบคุมจะดำเนินไปจนเครื่องใกล้ถึงจุดหมาย Area Control ที่ใกล้กับสนามบินปลายทางจะรับรู้แผนการบินที่สนามบินต้นทางส่งต่อกันมา โดยจะแจ้งให้นักบินลดเพดานบินลงในระยะห่างจากสนามบินที่เหมาะสม รวมทั้งปรับทิศทางบินให้เข้าสู่วงจราจรลงสนามบิน ซึ่งเป็นแนวมินที่กำหนดไว้แล้วสำหรับแต่ละสนามบิน

เมื่ออากาศยานบินเข้าเขตรัศมี 50 ไมล์ทะเลจากสนามบิน เครื่องจะถูกส่งต่อเข้าเขตการควบคุมของ Approach Control ของสนามบินนั้น ซึ่งจะดูแลนำเครื่องเข้าสู่สนามบินตามเส้นทางเข้ามาตรฐาน (STAR : Standard Terminal Arrival Route) ซึ่งถูกออกแบบเส้นทางไว้แล้ว โดยคำนึงถึงความเหมาะสมตามสภาพพื้นที่ สภาพการจราจรโดยรวม รวมถึงสนามบินรอบข้าง มากำหนดเป็นเส้นทางที่จะช่วยให้การควบคุมเครื่องบินปลอดภัยที่สุด

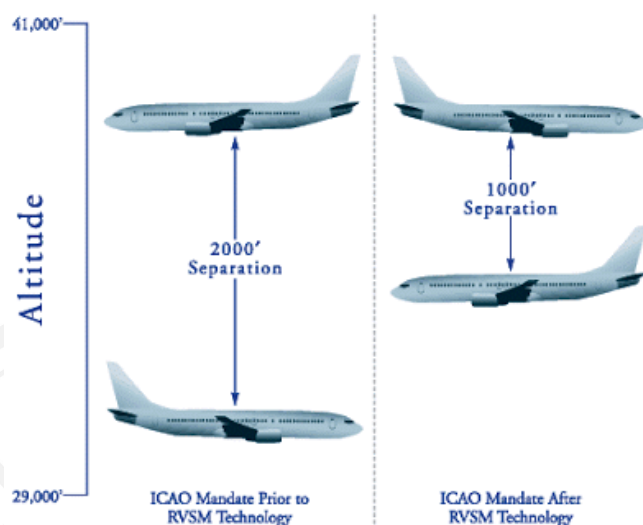
เมื่อเข้าสู่แนวร่อนสุดท้าย ห่างจากสนามบินราว 5 - 10 ไมล์ทะเลหรือจนกระทั่ง Approach Controller เห็นว่าปลอดภัยแล้ว ก็จะส่งต่อการควบคุมให้กับหอบังคับการบิน (Tower) หรือ (Local Controller) หอบังคับการบินซึ่งคอยดูแลเครื่องขึ้น/ลงทั้งหมด ก็จะพิจารณาว่าสามารถนำเครื่องลงได้หรือไม่ ขณะนั้น นักบินก็จะอาศัยเครื่องช่วยเดินอากาศ โดยจับสัญญาณวิทยุที่ส่งจากอุปกรณ์ ILS : Instrument Landing System เพื่อนำเครื่องร่อนลงสู่สนามบินตรงจุดกึ่งกลางรันเวย์ โดยมีระบบไฟส่องสว่างบอกแนวขอบรันเวย์และมุมร่อนที่ถูกต้อง เป็นตัวช่วยให้ปลอดภัยขึ้นอีกระดับหนึ่ง

ขณะที่เครื่องบินกำลังร่อนลง Tower จะตรวจสอบรันเวย์ว่าปราศจากสิ่งกีดขวางหรือไม่ โดยใช้ทั้งเรดาร์ภาคพื้นดิน (สำหรับสุวรรณภูมิ) และกล้องส่องทางไกล เมื่อทุกอย่างเรียบร้อย (Clear) จึงอนุญาตให้นำเครื่องร่อนลงได้ ด้วยประโยคว่า “Cleared to Land” เมื่อเครื่องบินออกจากรันเวย์เรียบร้อยแล้ว จะส่งต่อการควบคุมไปให้ Ground Controller ในชั้นสุดท้าย เพื่อนำเครื่องบินไปสู่จุดจอด เป็นอันสิ้นสุดขั้นตอนการควบคุมการจราจรทางอากาศ (Aerothai, 2559)

2.2 กฎการบินที่กำหนดโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ

2.2.1 การจัดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยาน

องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ได้กำหนดให้อากาศยานแต่ละลำที่ปฏิบัติการบินอยู่ในห้วงอากาศจำเป็นต้องรักษาระยะห่างจากกันตามที่องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศกำหนด เพื่อความปลอดภัยในการทำการบิน ซึ่งระยะห่างดังกล่าวเรียกว่า ระยะห่างขั้นต่ำมาตรฐาน (Standard Separation Minima) โดยในเอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501 ฉบับที่ 16 ปีค.ศ.2016 ได้ระบุว่าอากาศยานแต่ละลำจะต้องอยู่ห่างจากกันด้วยระยะห่างขั้นต่ำมาตรฐานชนิดใดชนิดหนึ่งตลอดเวลา และได้ระบุวิธีการจัดระยะห่างขั้นต่ำมาตรฐานไว้ดังนี้



ภาพที่ 2.1 การจัดระยะห่างในแนวดิ่ง (Vertical Separation)

แหล่งที่มา: ICAO, 2016.

2.2.1.1 การจัดระยะห่างในแนวดิ่ง (Vertical Separation)

อากาศยานจะต้องปฏิบัติการบินห่างกันในระยะสูงอย่างน้อย

- 1) 300 เมตร หรือ 1,000 ฟุต ที่ระดับเพดานบินไม่เกิน Flight Level 290 และ 600 เมตร หรือ 2,000 ฟุต ในระดับเพดานที่ Flight Level 290 หรือสูงกว่านั้น ในเขตพื้นที่ที่ใช้ระยะห่างขั้นต่ำ (Vertical Separation Minima) หรือ
- 2) 300 เมตร หรือ 1,000 ฟุต ที่ระดับเพดานบินไม่เกิน Flight Level 410 และ 600 เมตร หรือ 2,000 ฟุต ในระดับเพดานที่สูงกว่านั้น ในเขตพื้นที่ที่ใช้การลดระยะห่างขั้นต่ำ (Reduce Vertical Separation Minima) ดังแสดงในภาพที่ 2.1

2.2.1.2 การจัดระยะห่างในแนวนอน (Horizontal Separation)

การจัดระยะห่างในแนวนอนที่องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศระบุไว้มีหลายรูปแบบ ทั้งการจัดระยะห่างในทางข้าง (Lateral Separation) ระยะห่างในทางยาว (Longitudinal Separation) ซึ่งเป็นหลักปฏิบัติสำหรับการควบคุมการจราจรทางอากาศโดยไม่มีระบบติดตามอากาศยาน (RADAR) แต่ในการปฏิบัติงานปัจจุบันนั้นการใช้ระบบติดตามอากาศยานถือเป็นเครื่องมือพื้นฐานของการควบคุมการจราจรทางอากาศ และเป็นระบบที่นำมาใช้ทั่วเขตน่านฟ้าไทยแล้ว จึงยกมาพิจารณาเพียงแต่วิธีการจัดระยะห่างขั้นต่ำในแนวนอน ซึ่งระบุไว้ดังนี้

1) อากาศยานที่ทำการบินในเขตพื้นที่ควบคุมที่มีการใช้ระบบติดตามอากาศยาน (RADAR) จะต้องมีการจัดระยะห่างขั้นต่ำในแนวระดับที่ 9.3 กิโลเมตร หรือ 5 ไมล์ทะเล ดังแสดงในภาพที่ 2.2

2) ระยะห่างดังกล่าว (5 ไมล์ทะเล) สามารถลดลงได้อีก แต่ไม่เกิน

(1) 5.6 กิโลเมตร หรือ 3 ไมล์ทะเล เมื่อระบบติดตามอากาศยาน (RADAR) มีคุณภาพเพียงพอ

(2) 4.6 กิโลเมตร หรือ 2.5 ไมล์ทะเล ระหว่างอากาศยานที่อยู่ในเส้นทางสุดท้ายเข้าสู่สนามบิน (Final Approach Track) ภายในระยะ 18.5 กิโลเมตร หรือ 10 ไมล์ทะเล จากท้ายทางวิ่ง ในกรณีต่อไปนี้

ก) ระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งของอากาศยานที่ลงจอดได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 50 วินาที

ข) การตอบสนองการชะลอเครื่อง (Braking Action) ต้องอยู่ในสภาพที่ดี และระยะเวลาการครอบครองทางวิ่งต้องไม่ผันแปรไปตามสภาพของทางวิ่งที่ถูกปกคลุมด้วยน้ำค้างแข็ง, หิมะ หรือน้ำแข็ง

ค) ระยะเวลาในการตอบสนองและอัปเดตของระบบติดตามอากาศยาน (RADAR) ต้องไม่เกิน 5 วินาที

ง) เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเขตสนามบินจะต้องมองเห็นทางวิ่งและทางเข้า/ออกจากทางวิ่งได้ชัดเจน

จ) ระยะห่างขั้นต่ำที่พิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วนไม่ถูกนำมาใช้

ฉ) ความเร็วในการเข้าสู่สนามบินของอากาศยานได้รับการเฝ้าระวังและควบคุมโดยเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเขตประชิดสนามบิน (Approach Controller)

ช) ผู้ปฏิบัติการบินหรือนักบินได้รับแจ้งให้ออกจากทางวิ่งด้วยความเร่งด่วนเมื่อการลงจอดสมบูรณ์

ซ) รายละเอียดนอกเหนือจากนี้จะระบุในเอกสารข่าวเพื่อทำการบิน (Aeronautical Information Publication : AIP)

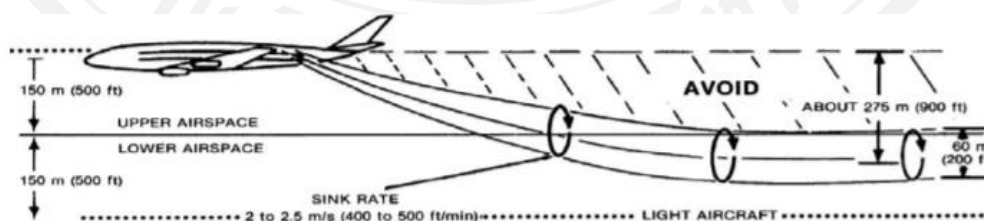


ภาพที่ 2.2 การจัดระยะห่างในแนวนอน (Horizontal Separation) สำหรับการควบคุมการจราจรทางอากาศโดยไม่มีระบบติดตามอากาศยาน (RADAR)

แหล่งที่มา: ICAO, 2016.

2.2.2 การจัดระยะห่างขึ้นต่ำระหว่างอากาศยานตามกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน

เอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501, หน้า 4-11 กระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน (Wake Turbulence) คือ ผลของมวลอากาศหมุนวนที่เกิดจากการสร้างแรงยกที่ปลายปีกของอากาศยาน ภาพที่ 2.3 ซึ่งได้มีการระบุลักษณะของกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานไว้ใน เอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 9426-AN/924, ส่วนที่ 2, ช่วงที่ 5, บทที่ 3 ว่า กระแสอากาศปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเบื้องหลังอากาศยาน ซึ่งจะมีขนาดและสภาพที่รุนแรงมากหากเกิดจากอากาศยานชนิดไอพ่น (Jet Aircraft) กระแสลมนี้เป็นกระแสลมที่หมุนสวนทางกันซึ่งเกิดอยู่ที่ปลายปีกของอากาศยานซึ่งจะมีภาวะรุนแรงที่สุดเมื่ออากาศยานอยู่ในขั้นตอนต่าง ๆ 4 ลักษณะ คือ วิ่งขึ้น (Take-off) เริ่มไต่ระดับ (Initial Climb) ร่อนลง (Final Approach) และลงจอด (Landing) กระแสอากาศไม่มีลักษณะปรากฏชัด ไม่สามารถมองเห็นได้ และเมื่อเกิดขึ้นใกล้กับพื้นดินมักจะเกิดการกระจายตัวออกไปทางข้างของอากาศยานที่กำลังสร้างแรงยก (Lift) และในบางครั้งก็มีทิศพุ่งขึ้น ซึ่งเป็นอันตรายอย่างมากต่ออากาศยานที่อยู่ด้านหลัง (ICAO, 1984)



ภาพที่ 2.3 กระแสอากาศปั่นป่วน

แหล่งที่มา: ICAO, 2017b.

ตารางที่ 2.1 ขนาดของอากาศยานโดยพิจารณาจากระดับกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน

ขนาด	น้ำหนักสูงสุดที่สามารถทำการวิ่งขึ้นได้
หนักมาก – Super Heavy (S)	แบบเครื่อง A380 ซึ่งมีน้ำหนักวิ่งขึ้น 560,000 กิโลกรัม
หนัก – Heavy (H)	ตั้งแต่ 136,000 กิโลกรัมขึ้นไป
กลาง – Medium (M)	น้อยกว่า 136,000 กิโลกรัม แต่มากกว่า 7,000 กิโลกรัม
เบา – Light (L)	ตั้งแต่ 7,000 กิโลกรัมลงมา

แหล่งที่มา: ICAO, 2016.

2.2.2.1 การจำแนกขนาดของอากาศยานโดยพิจารณาจากระดับกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน

เอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501, หน้า 4-11 ได้จำแนกอากาศยานโดยพิจารณาจากระดับการก่อให้เกิดกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน โดยใช้มวลมากสุดในการวิ่งขึ้นเป็นเกณฑ์การจำแนก ซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 ขนาด ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1

2.2.2.2 การจัดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยาน

ในการศึกษาวิจัยนี้ มุ่งเน้นการศึกษาการจัดลำดับอากาศยานขาเข้าที่ใช้ทางวิ่งเฉพาะแยกจากทางวิ่งขึ้น จึงยกมาเพียงเกณฑ์การจัดระยะห่างที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานขาเข้าบินตามกัน และร่อนลงจอดบนทางวิ่งที่ไม่มีการวิ่งขึ้นเท่านั้น โดย เอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501, หน้า 5-35 ได้ระบุว่า เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศจะต้องจัดระยะต่อ (ระยะจากทางอากาศยานลำหน้ากับหัวอากาศยานที่บินตาม) ให้ได้เกณฑ์มาตรฐานโดยใช้เวลาเป็นเกณฑ์ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจัดระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากระดับกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานโดยใช้ระยะเวลาเป็นเกณฑ์

ประเภทของอากาศยาน		ระยะห่าง
อากาศยานตามหลัง	อากาศยานนำหน้า	
กลาง (M)	หนัก (H)	2 นาที
เบา (L)	กลาง (M)	3 นาที
เบา (L)	หนัก (H)	3 นาที
กลาง (M)	หนักมาก (S)	3 นาที
เบา (L)	หนักมาก (S)	4 นาที

แหล่งที่มา: ICAO, 2016.

ทั้งนี้ เกณฑ์ขั้นต่ำดังกล่าวจะไม่ใช่กับอากาศยานเหล่านี้

- 1) อากาศยานที่บินด้วยกฎการบินด้วยทัศนวิสัย (Visual Flight Rules)
- 2) อากาศยานที่บินด้วยกฎเครื่องวัดประกอบการบิน (Instrument Flight Rules) แต่ขออนำเครื่องลงจอดด้วยทัศนวิสัย (Visual Approach)

ในกรณีที่การควบคุมการจราจรทางอากาศได้ใช้ระบบติดตามอากาศยาน (เรดาร์) เอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501, หน้า 8-17 ระบุว่า การจัดระยะต่อระหว่างอากาศยานเพื่อป้องกันผลกระทบจากกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานโดยใช้ระยะทางเป็นเกณฑ์นั้นสามารถทำได้กับอากาศยานที่อยู่ในช่วงร่อนลงและวิ่งขึ้น โดยเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศจะต้องสั่งการให้อากาศยานแต่ละลำบินห่างกันโดยระยะต่อตามเกณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ซึ่งเกณฑ์ระยะทางขั้นต่ำนี้จะบังคับใช้กับอากาศยานในลักษณะเหล่านี้

- 1) อากาศยานที่บินตามกันโดยตรงและมีระยะสูงห่างกันไม่เกิน 1,000 ฟุต หรือ
- 2) อากาศยานทั้ง 2 ลำใช้ทางวิ่งเพื่อร่อนลงจอดเดียวกันหรือใช้ทางวิ่งที่มีระยะห่างกันไม่เกิน 2,500 ฟุต หรือ
- 3) อากาศยานบินตัดหลังกันโดยมีระยะสูงห่างกันไม่เกิน 1,000 ฟุต (ICAO, 2016)

ตารางที่ 2.3 การจัดระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานโดยใช้ระยะทางเป็นเกณฑ์

ประเภทของอากาศยานพิจารณาจากน้ำหนักสูงสุดที่วิ่งขึ้นได้		ระยะห่าง
อากาศยานตามหลัง	อากาศยานนำหน้า	
หนัก (H)	หนัก (H)	4 ไมล์ทะเล
กลาง (M)	หนัก (H)	5 ไมล์ทะเล
เบา (L)	หนัก (H)	6 ไมล์ทะเล
เบา (L)	กลาง (M)	5 ไมล์ทะเล
หนัก (H)	หนักมาก (S)	6 ไมล์ทะเล
กลาง (M)	หนักมาก (S)	7 ไมล์ทะเล
เบา (L)	หนักมาก (S)	8 ไมล์ทะเล
นอกเหนือจากกรณีดังกล่าวมา		3 ไมล์ทะเล

แหล่งที่มา: ICAO, 2016.

2.2.3 การอนุญาตให้ลงจอด

เอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501, หน้า 7-15 ระบุว่าอากาศยานจะได้รับการอนุญาตให้ลงจอดได้ก็ต่อเมื่ออากาศยานลำหน้าได้ข้ามจุดเริ่มต้นของทางวิ่ง (Runway Threshold) ไปแล้วเท่านั้น และต้องมั่นใจว่าอากาศยานลำหน้าจะสามารถออกจากทางวิ่งได้ทัน จึงมีกระบวนการบางอย่างที่สามารถกระทำได้เพื่อเร่งให้เกิดความคล่องตัวของการจราจรทางอากาศ ดังนี้

- 1) ขอให้อากาศยานรอที่จุดข้ามทางวิ่ง ในกรณีที่เส้นทางวิ่งตัดกัน
- 2) ขอให้อากาศยานร่อนลงแตะพื้นเลยจุดแตะ (Touchdown Zone) เว้นแต่กรณีที่อากาศยานลำหน้าเป็นประเภทอากาศยานขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถปฏิบัติตามเงื่อนไขนี้ได้
- 3) ให้คำแนะนำอากาศยานออกจากทางวิ่งโดยใช้ทางขับที่เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศกำหนด
- 4) เร่งให้อากาศยานออกจากทางวิ่งโดยเร็ว (ICAO, 2016)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความจุของทางวิ่ง

อ้างอิงจากเอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501, หน้า 7-14 ข้อ 7.10.1 ระบุว่าอากาศยานสามารถวิ่งลงจอดได้ก็ต่อเมื่อทางวิ่งนั้นได้ถูกทำให้ว่างลงแล้ว (Vacated) โดยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง คือ อากาศยานที่วิ่งขึ้นก่อนหน้าได้บินผ่านท้ายทางวิ่ง (Departure End) ได้บินเลี้ยวออกจากเส้นทางของทางวิ่ง หรืออากาศยานลำที่ร่อนลงก่อนหน้าได้เลี้ยวออกจากทางวิ่งแล้ว ซึ่งเวลาที่อากาศยานใช้บนทางวิ่งกระทั่งถึงจุดที่ทางวิ่งได้ว่างลงเรียกว่า เวลาครอบครองทางวิ่ง (Runway Occupancy Time) ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศจำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการจัดระยะต่อเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสในการเกิดการพลาดในการร่อนลง (Missed Approach) ซึ่งเนื่องมาจากการที่อากาศยานไม่ได้รับคำอนุญาตให้ลงจอดก่อนถึงระยะสูงที่ต้องตัดสินใจไม่ลงจอด (Decision Height) อันเป็นผลมาจากอากาศยานลำหน้าไม่สามารถทำทางวิ่งให้ว่างลงได้ ปัจจัยที่มีผลต่อความจุของทางวิ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ

- 1) ปัจจัยจากการจัดระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำการบิน ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นประกอบด้วยปัจจัยเทียบเคียงอีก 3 ส่วนด้วยกัน คือ การจัดลำดับอากาศยานเข้า/ออกสนามบิน (Departure/Arrival Sequencing) ลักษณะของแบบเครื่องบินในสภาพการจราจร (Traffic Mix) และสภาพอากาศ (Weather Conditions) ซึ่งลำดับก่อนหลังในการลงจอดของอากาศยานนั้นมีผลต่อการจัดระยะ

ระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน กล่าวคือ อากาศยานที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่าย่อมได้รับผลกระทบที่รุนแรงเมื่อต้องทำการบินตามหลังอากาศยานที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งการจัดระยะห่างจำเป็นต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่ได้รับการกำหนดโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

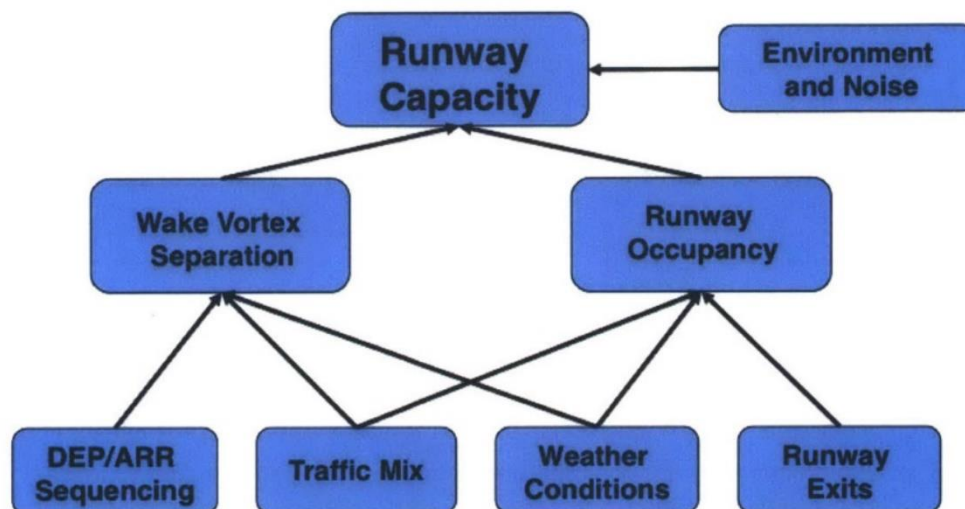
2) ปัจจัยจากเวลาในการครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน (Runway Occupancy Time) อ้างอิงจากเอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501, หน้า 7 - 14 ข้อ 7.10.1 ระบุว่าอากาศยานสามารถวิ่งลงจอดได้ก็ต่อเมื่อทางวิ่งนั้นได้ถูกทำให้ว่างลงแล้ว (Vacated) โดยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง คือ อากาศยานที่วิ่งขึ้นก่อนหน้าได้บินผ่านท้ายทางวิ่ง (Departure End) ได้ บินเลี้ยวออกจากเส้นทางของทางวิ่ง หรืออากาศยานลำที่ร่อนลงก่อนหน้าได้เลี้ยวออกจากทางวิ่งแล้ว ซึ่งเวลาที่อากาศยานใช้บนทางวิ่งกระทั่งถึงจุดที่ทางวิ่งได้ว่างลงเรียกว่า เวลาครอบครองทางวิ่ง (Runway Occupancy Time) ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศจำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการจัดระยะต่อเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสในการเกิดการพลาดในการร่อนลง (Missed Approach) ซึ่งเนื่องมาจากการที่อากาศยานไม่ได้รับคำอนุญาตให้ลงจอดก่อนถึงระยะสูงที่ต้องตัดสินใจไม่ลงจอด (Decision Height) อันเป็นผลมาจากอากาศยานลำหน้าไม่สามารถทำทางวิ่งให้ว่างลงได้ ซึ่งเวลาครอบครองทางวิ่งนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นประกอบด้วยปัจจัยเทียบเคียงอีก 3 ส่วนด้วยกัน คือ ลักษณะของแบบเครื่องในสภาพการจราจร (Traffic Mix) สภาพอากาศ (Weather Conditions) และ ตำแหน่งของทางขับออกจากทางวิ่ง (Runway Exits) ของท่าอากาศยาน (ICAO, 2016)

ความจุของทางวิ่งสามารถแปรผันได้อย่างมีนัยยะสำคัญขึ้นกับการจัดลำดับเครื่องเข้าหรือออกจากสนามบิน ซึ่งเป็นผลจากการจัดระยะห่างของอากาศยานที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ความจุของทางวิ่งยังขึ้นกับสภาพอากาศความผันแปรของอากาศเป็นสำคัญ ทักษะวิสัยในการทำการบินและฐานเมฆมีผลอย่างยิ่งต่อการกำหนดกฎการบินของอากาศยาน กล่าวคือ การจัดระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานนั้นจะใช้กับอากาศยานที่ปฏิบัติการบินด้วยกฎการบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน (IFR) เท่านั้น แต่หากสภาพอากาศอำนวยให้สามารถทำการบินด้วยกฎการบินโดยทัศนวิสัย (VFR) นักบินสามารถลดช่องว่างระหว่างอากาศยานได้โดยนักบินจะเป็นผู้จัดระยะห่างระหว่างเครื่องเอง ซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างอากาศยานลดลง และสามารถเพิ่มความจุของทางวิ่งได้มากกว่าในช่วงเวลาที่อากาศยานทำการบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน (IFR) เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การเลือกใช้วิธีปฏิบัติในสถานการณ์ที่มีทัศนวิสัยต่ำ (Low Visibility Procedure) ของเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการจัดการการบิน ส่งผลให้ระยะห่างในการทำการบินมีมากขึ้น และความสามารถในการรองรับเที่ยวบินของทางวิ่งลดลง

ลักษณะทางกายภาพของทางวิ่งและโดยเฉพาะตำแหน่งและลักษณะของทางขับออกจากทางวิ่ง ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งของอากาศยานและความจุของทางวิ่ง ตำแหน่งที่ตั้งของทางขับออกจากทางวิ่งและระยะจากจุดเริ่มต้นทางวิ่ง (Runway Threshold) ลักษณะเฉพาะตัวของทางขับออกจากทางวิ่งก็เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน เช่นกัน ทางขับออกจากทางวิ่งแบบความเร็วสูง (High Speed Exit Taxiway) ที่ทำมุม 45 องศากับทางวิ่งช่วยให้อากาศยานสามารถขับออกจากทางวิ่งด้วยความเร็วที่สูงกว่า ทางขับออกจากทางวิ่งปกติที่ทำมุม 90 องศากับทางวิ่ง ซึ่งถือเป็นตัวแปรสำคัญประการหนึ่งที่จะบอกว่าอากาศยานจะใช้เวลาครอบครองทางวิ่งนานเท่าไร และหากลักษณะทางกายภาพที่ไม่เหมาะสมกับสภาพอากาศ เช่น ฝนตก มีน้ำขัง หรือทัศนวิสัยแย่ๆ ที่ทำให้อากาศยานต้องใช้ความเร็วที่ลดลงบนทางวิ่งเพราะความสามารถในการหยุดเครื่อง (Braking Action) ของอากาศยานต่ำลงก็เป็นผลให้ระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งยิ่งสูงขึ้นไปด้วย เป็นผลให้เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศต้องจัดระยะห่างที่มากขึ้น และทำให้ความสามารถในการรองรับเที่ยวบินของทางวิ่งลดลง (Kolos-Lakatos, 2013)

นอกจากนี้ เอกสารองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ Doc 4444 ATM/501 ระบุว่า การจัดระยะห่างระหว่างอากาศยานโดยใช้ระยะเวลา (Time Interval) หรือระยะทาง (Longitudinal Distance) จะต้องพิจารณาจากความเร็วในการเข้าสู่สนามบินของอากาศยานทั้งสองลำ, ระยะห่างจากทางวิ่ง, เงื่อนไขระยะห่างขั้นต่ำโดยพิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน, ระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่ง, สภาพอากาศที่ปกคลุมสนามบินรวมถึงสภาพต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน

จะเห็นได้ว่าปัญหาการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อความจุของทางวิ่ง (ภาพที่ 2.4) ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ นี้เป็นข้อจำกัดเฉพาะตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานการณ์และมีผลให้ระยะห่างระหว่างอากาศยานขั้นต่ำนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งระยะห่างระหว่างอากาศยานนี้เองเป็นปัจจัยที่ผู้ศึกษาจำนวนมากได้นำไปเทียบเคียงกับระยะการเดินทางของทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem) และได้มีการนำตัวแบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อหาวิธีการจัดลำดับลงจอดของอากาศยาน



ภาพที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความจุของทางวิ่ง

แหล่งที่มา: Kolos-Lakatos, 2013.

2.4 ผลกระทบจากมลภาวะเรือนกระจกจากภาคอุตสาหกรรมการบิน

อุตสาหกรรมการบินถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ องค์การการบินระหว่างประเทศให้ความสำคัญต่อการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างต่อเนื่องดังนี้

“การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ดำเนินการโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (International Civil Aviation Organization: ICAO) ซึ่งเป็นทบวงการชำนัญพิเศษแห่งสหประชาชาติ (Specialized Agency of the United Nations: UN) โดย ICAO ได้อธิบายมาตรการและกฎกติการะหว่างประเทศ สำหรับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคนี้อย่างต่อเนื่อง การประชุมสมัชชาขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ สมัยที่ 37 (the 37th session of the ICAO Assembly ในปี พ.ศ. 2553 (2010)) ได้รับรองจุดมุ่งหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาค การบินระหว่างประเทศ “Global reduction target goals” โดยมี 2 เป้าหมายหลักดังนี้

- 1) การปรับปรุงประสิทธิภาพการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราร้อยละ 2 ต่อปี และ
 - 2) รักษาเสถียรภาพการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ภาคการบินระหว่างประเทศทั่วโลก ไว้ที่ระดับการปล่อยในปี ค.ศ. 2020 (เรียกว่า “carbon neutral growth from 2020”)
- นอกจากนี้เพื่อให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าวที่ประชุมสมัชชาได้กำหนด 4 มาตรการเพื่อลดการปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังต่อไปนี้ (เรียกว่า "Basket of Measures")

- 1) การใช้เทคโนโลยีเครื่องบินแบบใหม่ (Aircraft Technology)
- 2) การปรับปรุงประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน (Operational Improvements / Airports)
- 3) การใช้เชื้อเพลิงหมุนเวียน (Sustainable Aviation Fuels)
- 4) มาตรการตลาด (Market-Based Measures - MBM)

การประชุมสมัชชาสมัยที่ 38 ในเดือนตุลาคม 2556 (2013) ได้พิจารณาถึงการประเมินแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ภาคการบินของโลก และประเมินมาตรการ สนับสนุนต่างๆ เพื่อลดการปล่อย CO₂ จากภาคการบิน (เทคโนโลยีเครื่องบินและเครื่องยนต์ การปรับปรุงการปฏิบัติงาน และเชื้อเพลิงทดแทน) เพื่อประเมินทิศทางในการบรรลุเป้าหมาย Global Aspirational Goals ที่รับรองในการประชุมสมัชชาสมัย ที่ 37 (ดูแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคการบินระหว่างประเทศ

นอกจากนี้ ICAO ได้พัฒนาวิธีการเพื่อให้องค์กรต่างๆ สามารถรายงานปริมาณการปล่อย CO₂ จากการบินระหว่างประเทศอย่างต่อเนื่องเพื่อเสนอต่ออนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) ตามที่ได้ตกลงกันไว้ในการประชุมสมัชชาสมัยที่ 37 การประเมินแนวโน้มการปล่อย CO₂ ดังกล่าวได้ใช้เป็นพื้นฐานในการตัดสินใจในระหว่างการประชุมสมัชชาสมัยที่ 38 ซึ่งได้มีการรับรองเป้าหมาย the Global Aspirational Goals ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงลงร้อยละ 2 ต่อปีและเพื่อรักษาระดับการปล่อย CO₂ ให้อยู่ในระดับเดิมตั้งแต่ปี 2563 (carbon neutral growth from 2020)

เป้าหมาย Carbon neutral growth from 2020 จะไม่สามารถบรรลุได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยการใช้เพียง มาตรการข้อ (1) (2) และ (3) เท่านั้น ดังนั้นมาตรการตลาดระหว่างประเทศ (Global Market-Based Measures: GMBM) จึงได้รับการรับรองในการประชุมสมัชชาสมัยที่ 39 เมื่อปี พ. ศ. 2559 (2016) เพื่อให้เป็นส่วนเสริมมาตรการอื่นๆ เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการบินระหว่างประเทศ โดยได้ตั้งชื่อเป็น กลไกชดเชยและการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการบินระหว่างประเทศ หรือ Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) โดย CORSIA จะเริ่มดำเนินการแบบสมัครใจในช่วงแรกตั้งแต่ ปี พ. ศ. 2564 และสายการบินจะสามารถซื้อคาร์บอนเครดิตเพื่อชดเชยการปล่อย CO₂ ตามที่กำหนดไว้และจะถูกบังคับกับทุกสายการบินในช่วงหลัง”(ธวัชชัย แสงคำสุข, 2019)

2.5 ระบบการจัดลำดับอากาศยานเข้า Arrival Manager (AMAN)

การจัดลำดับเที่ยวบินเข้าของอากาศยานโดยทั่วไปแล้วเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศจะยึดแนวทางการจัดลำดับโดยให้อากาศยานที่มีเวลาคาดการณ์มาถึงก่อนได้รับบริการก่อน

(First Come First Serve : FCFS) แต่ในสนามบินที่มาสภาพการจราจรทางอากาศที่คับคั่ง เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศไม่สามารถรับมือกับปริมาณเที่ยวบินได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้มีการพัฒนาระบบช่วยจัดลำดับเที่ยวบินเข้าซึ่งพัฒนาโดย Eurocontrol และได้เริ่มใช้ในทวีปยุโรปเป็นครั้งแรก การทำงานของระบบ AMAN จะกำหนดเวลาที่อากาศยานจะต้องบินออกจากจุดแรกเข้า (Entry Point) โดยพิจารณาจากข้อมูลต่างๆ ที่จะเป็น อาทิ ความสามารถของอากาศยาน แผนการบิน การรองรับของหลุมจอด ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ผู้ปฏิบัติหน้าที่ที่เกี่ยวข้องสามารถนำข้อมูลลำดับการลงจอดโดย AMAN ไปใช้ในการวางแผนปฏิบัติงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (Luppo & Argunov, 2016)

2.6 ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีพื้นที่ประมาณ 20,000 ไร่ ตั้งอยู่ที่ถนนเทพรัตน ประมาณ กิโลเมตรที่ 15 อยู่ในเขตตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งอยู่ห่างจากใจกลางกรุงเทพมหานครไปประมาณ 25 กิโลเมตร ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิระยะที่ 1 ใช้งบประมาณก่อสร้างในกรอบวงเงิน 123,942.25 ล้านบาท

ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีรันเวย์ขนาน 2 เส้น กว้างเส้นละ 60 เมตร ยาว 3,700 เมตร และ 4,000 เมตร ห่างกัน 2,200 เมตร และมีทางขับขนานกับทางวิ่งทั้ง 2 เส้น เพื่ออำนวยความสะดวกแก่อากาศยานขาออกและขาเข้าได้พร้อมกัน และมีหลุมจอดอากาศยาน มีจำนวน 120 หลุมจอด (จอดประชิดอาคาร 51 หลุมจอด และจอดระยะไกลอีก 69 หลุมจอด) รวมถึงหลุมจอดอากาศยานที่สามารถรองรับอากาศยานแอร์บัส เอ 380 ได้ถึง 5 หลุมจอดและระยะไกลอีก 3 หลุมจอดทำให้สามารถรับได้สูงสุด 8 ลำ รวม 8 หลุมจอด มีท่าเทียบรวม 51 จุด

ท่าอากาศยานมีศักยภาพรองรับปฏิบัติการเที่ยวบินได้ 76 เที่ยวบินต่อชั่วโมง, ผู้โดยสารได้กว่า 45 ล้านคนต่อปี และสินค้า 3 ล้านตันต่อปี และหน้าอาคารผู้โดยสารหลักเป็นโรงแรมภายใต้เครื่องหมายการค้าโนโวเทล ซึ่งมีจำนวน 600 ห้อง อีกทั้งระหว่างอาคารผู้โดยสารและโรงแรมก็มีอาคารจอดรถ 5 ชั้น จำนวน 2 หลัง ซึ่งสามารถรองรับรถยนต์ได้ถึง 5,000 คัน นอกจากนี้ยังมีพื้นที่จอดรถเหนือพื้นดินที่สามารถรองรับรถยนต์ได้อีก 1,000 คัน และพื้นที่จอดรถในระยะยาวที่สามารถรองรับรถยนต์ได้ 4,000 คัน และรถโดยสารอีก 78 คัน

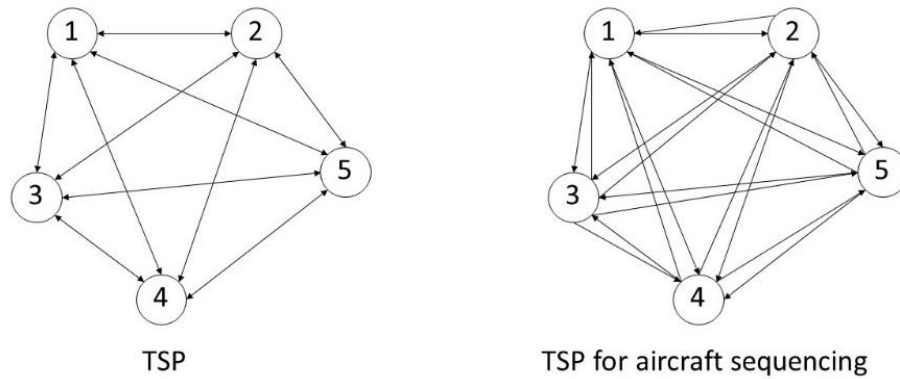
นอกจากนี้ ท่าอากาศยานไทยยังมีแผนการที่จะขยายและปรับปรุงสนามบินสุวรรณภูมิด้วยงบประมาณ 800 ล้านบาท โดยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มเป้าผู้โดยสารจาก 45 ล้านคนต่อปี เป็น 80 ล้านคนต่อปี ภายในปี พ.ศ. 2559 และยังเพิ่มความสามารถในการรองรับผู้โดยสารภายในประเทศโดยการลงทุนสร้างอาคารผู้โดยสารภายในประเทศ และทางวิ่งที่สามเพิ่มขึ้นอีก (อาสาสมัครวิกิพีเดีย, 2020)

2.7 ทฤษฎีตัวแบบการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem)

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (traveling salesman problem : TSP) เป็นหนึ่งในปัญหาที่เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานในการพัฒนาวิธีการในการหาคำตอบให้ดีและเร็ว โดยปัญหา TSP นี้ เป็นปัญหาที่ทำการตัดสินใจหาเส้นทางการเดินทางเมื่อมีเมืองหรือสถานที่ที่ต้องเดินทางไปจำนวน N เมือง หรือ N สถานที่ การเดินทางจะเดินทางจากเมืองใดเมืองหนึ่งในจำนวน N เมือง โดยเส้นทางการเดินทางนั้น ๆ จะต้องเดินทางผ่านเมืองทุกเมือง และกลับมาที่เมืองที่ทำการเริ่มต้นในการเดินทางเหมือนการเดินทางวนรอบ เช่น พนักงานขายเดินทางไปขายสินค้าให้กับลูกค้าจำนวน 10 ราย ได้แก่เมือง 1 ถึงเมือง 10 โดยเมืองที่ 4 เป็นที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าของพนักงานขายรายนี้ พนักงานขายรายนี้จะเดินทางเริ่มต้นจากเมืองที่ 4 แล้วเดินทางไปตามเส้นทางดังนี้ 4-1-10-2-9-3-8-7-5-6-4 ซึ่งเป็นการเดินทางจากเมืองที่ 4 ต่อด้วยการเดินทางไปเมืองที่ 1 และ 10 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งลูกค้าทุกรายในจำนวน 10 รายได้รับการเยี่ยมชมจากพนักงานขายแล้วพนักงานขายก็ย้อนกลับมาที่เมืองที่ 4 เช่นเดิม

ปัญหา TSP เป็นปัญหาที่ได้รับความนิยมจากนักวิจัย เริ่มต้นการพัฒนาปัญหา TSP เกิดขึ้นในช่วง คศ. 1800 โดยนักคณิตศาสตร์ชาวไอร์แลนด์ ชื่อ W.R.Hamilton และชาวอังกฤษชื่อ Thomas Kirkman ได้สร้างเกมส์ที่ชื่อว่า Icosian ซึ่งพัฒนามาจากพื้นฐานของเกมส์ puzzle ซึ่งเกมส์นี้ ผู้เล่นจะต้องหาวงกลมฮามิลโทเนียน (Hamiltonian cycle) จากนั้นในช่วง คศ.1930, Karl Menger ชาวเวียนนาได้พัฒนาวิธีการเดินทางจากเมืองที่ใกล้ที่สุดหรือเมืองพรมแดน (Nearest Neighbour Heuristics)

ช่วงปี คศ.1950-1960 ปัญหา TSP ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงและได้เริ่มมีการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์และวิธีการแม่นยำตรง (exact method) ในการแก้ปัญหา เริ่มต้นด้วย Dantzig et al.(1954) ได้พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์และได้พัฒนาวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการตัดระนาบ (cutting plane method) และสามารถแก้ปัญหาที่มีขนาดเมือง 49 เมืองและได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimum solution) Richard M. K(1972) ในพิสูจน์ว่าเกมส์วงกลมฮามิลโทเนียนเป็นปัญหาประเภท NP-complete ซึ่งทำให้ปัญหา TSP เป็นปัญหาจำพวกเดียวกันได้นั้นคือเป็นปัญหา NP-hard แสดงให้เห็นว่า TSP เป็นปัญหาที่ยากและยังไม่มีวิธีการที่ใช้เวลาแบบโพลีโนเมียลในการแก้ปัญหาได้ ดังนั้นมีนักวิจัยสนใจทั้งหาวิธีในการแก้ปัญหาแบบวิธีการที่ได้คำตอบที่ดีที่สุดเช่น วิธีการ branch and bound วิธีการ branch and cut, cutting plane algorithm, column generation เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในช่วงปี 1990 Applegate ได้เริ่มต้นพัฒนาโปรแกรม Concorde ซึ่งถูกใช้ในการแก้ปัญหา TSP และถูกอ้างอิงถึงความสามารถในการแก้ปัญหาที่ได้ค่าที่ดีที่สุดของปัญหา TSP ในปี 1991จำนวนเมืองที่มากที่สุดหรือจำนวนจุดที่มากที่สุดที่มีการแก้ปัญหา มีจำนวนจุด 85,900 จุด (ระพีพันธ์ ปิตาคะโส, 2559)



ภาพที่ 2.5 รูปแบบเปรียบเทียบระหว่าง TSP และ TSP สำหรับการจัดลำดับจราจรทางอากาศ

แนวคิดหลักของทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขายนั้นคือการเลือกลำดับจากตัวเลือกที่มีอยู่ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการใช้ต้นทุนหรือทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการจัดลำดับอากาศยานลงจอดนั้นมีลักษณะของปัญหาที่คล้ายคลึงกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย คือ ทุกตัวเลือก (Node) จะต้องถูกเลือกอย่างน้อยหนึ่งครั้งเสมอ แตกต่างกันในตัวแบบ TSP ปกติเมืองที่เป็นต้นทาง (Origin) จะเป็นเมืองปลายทาง (Destination) ด้วย ซึ่งเป็นลักษณะของการเดินทางที่ครบวงจร และการเดินทางที่มีความต่อเนื่อง แต่การจัดลำดับอากาศยานนั้นมีความแตกต่างตรงที่เครื่องบินที่ถูกเลือกให้เป็นลำดับแรกในการลงจอดจะไม่สามารถกลับมาเป็นอากาศยานลำดับสุดท้ายได้ เนื่องจากการกระทำการนั้นได้สิ้นสุดแล้ว การลงจอดสมบูรณ์แล้ว ซึ่งลักษณะปัญหาดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าเป็นลักษณะปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบเปิด (Open TSP) ทั้งนี้ตัวแบบ TSP ที่ได้รับการพัฒนาเพื่อนำมาใช้สำหรับการปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective) นั้นเรียกว่า Cumulative TSP และอีกประการหนึ่ง คือ ผลของการเดินทางแบบ 1 - 2 อาจมีค่าต่างจากการเดินทางแบบ 2 - 1 ซึ่งเป็นผลจากระยะต่อขั้นต่ำพิจารณาจากกระแสน้ำวนจากอากาศยาน ดังแสดงใน ภาพที่ 2.5 โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ TSP มีรูปแบบดังนี้

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2.4)$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับลงจอด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการจัดลำดับอากาศยานลงจอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพคือ ความจุให้กับทางวิ่ง ได้มีการพัฒนามาเป็นลำดับ และมีสรุปผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงใน ตารางที่ 2.4

Psaraftis ได้พิจารณารูปแบบการแก้ปัญหาการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานอย่างง่าย โดยสมมติสถานการณ์ว่าอากาศยานทุกลำมีความพร้อมที่จะลงจอดได้ในทันที และกำหนดสมการ เป้าหมายเพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งเป็นการลดระยะเวลาลงจอดของอากาศยานให้น้อยที่สุด (minimizing LT_{max}) และหาค่าความล่าช้าของการลงจอดโดยใช้การรวมระยะเวลาของอากาศยานที่ลงจอด $\sum_{j=1}^n LT_j$ โดยใช้วิธีการ Dynamic Programming แบบย้อนกลับ (Psaraftis, 1978)

Luenberger ได้ริเริ่มทำการทดลองแก้ปัญหาลำดับการลงจอดของอากาศยานโดยใช้วิธีการ เทียบเคียงกับทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยตัวแบบ TSP แบบดั้งเดิมนั้นมุ่ง แก้ปัญหาการเดินทางไปยังเมืองหรือหน่วยต่าง ๆ โดยใช้ต้นทุนหรือระยะทางที่สั้นที่สุด โดยทุกเมือง จะต้องถูกสัญจรผ่าน และผ่านเพียงครั้งเดียว โดยเมืองต้นทางและปลายทางนั้นจะเป็นเมืองเดียวกัน แต่ แม้จะมีความใกล้เคียงก็ยังคงมีความแตกต่าง โดยที่ปัญหาการจัดลำดับการลงจอดอากาศยานนั้น การ เดินทางจะไม่สิ้นสุดที่เมืองต้นทาง จึงมีความคล้ายคลึงกับทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงาน ขายแบบเปิด (Open TSP) มากกว่า โดยเมืองแต่ละเมืองจะถูกแทนที่ด้วยอากาศยาน และระยะทาง ระหว่างเมืองจะถูกแทนที่ด้วยระยะเวลาระหว่างอากาศยาน (Luenberger, 1988)

Lee, Balakrishnan ได้ทำการศึกษาการปรับลำดับการลงจอดของอากาศยานโดยเป็นการ เปลี่ยนลำดับเพื่อเทียบกับลำดับ FCFS โดยมีข้อจำกัดต่างๆ อาทิ ระยะต่ออากาศยานขึ้นต่ำและ เงื่อนไขเวลาที่จำกัด เป็นต้น เพื่อให้ได้ลำดับการลงจอดที่มีต้นทุนในการลงจอดต่ำที่สุด ณ ท่าอากาศยานนานาชาติ Dallas Fort Worth ประเทศสหรัฐอเมริกา (Lee & Balakrishnan, 2008)

Mesgarpour, Potts, Bennell ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการรองรับ เที่ยวบินของทางวิ่งโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการหาทางเลือกที่ดีที่สุดแบบหลาย เป้าหมาย (Multi Objective Optimization) ซึ่งประกอบด้วยเป้าหมาย 4 ประการ คือ ลดระยะเวลา ในการลงจอดให้ได้มากที่สุด ลดระยะเวลาล่าช้าเฉลี่ยให้ต่ำที่สุด ลดค่าปรับจากการให้อากาศยานลง จอดล่าช้ากว่าช่วงเวลา (Time Windows) ที่กำหนด และลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงส่วนเกินที่เกิด จากการลงจอดล่าช้า จากการศึกษาพบว่าตัวแบบที่ใช้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่าการจัดลำดับ แบบ First Come First Serve และสามารถตอบสนองต่อเป้าหมายในการแก้ปัญหาการล่าช้าและค่า เชื้อเพลิงส่วนเกินได้อย่างน่าพอใจ (Mesgarpour, Potts, & Bennell, 2010)

Kolos-Lakatos ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาการครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน เปรียบเทียบกับระยะเวลาการจัดระยะห่างระหว่างอากาศยานพิจารณาจากกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการครอบครองทางวิ่งของอากาศยานนั้นไม่ได้ขึ้นกับขนาดของอากาศยานเสมอไป อากาศยานขนาดเล็กใช้ระยะเวลาในการออกจากทางวิ่งใกล้เคียงกับอากาศยานที่มีขนาดใหญ่กว่า แม้ว่าอากาศยานขนาดใหญ่จะมีระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งโดยเฉลี่ยสูงกว่าอากาศยานอื่น ๆ ก็ตาม ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า ทางขับออกความเร็วสูง (Rapid Exit Taxiway) มีผลต่อระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งที่ลดลงของอากาศยานอย่างมีนัยยะสำคัญ (Kolos-Lakatos, 2013)

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

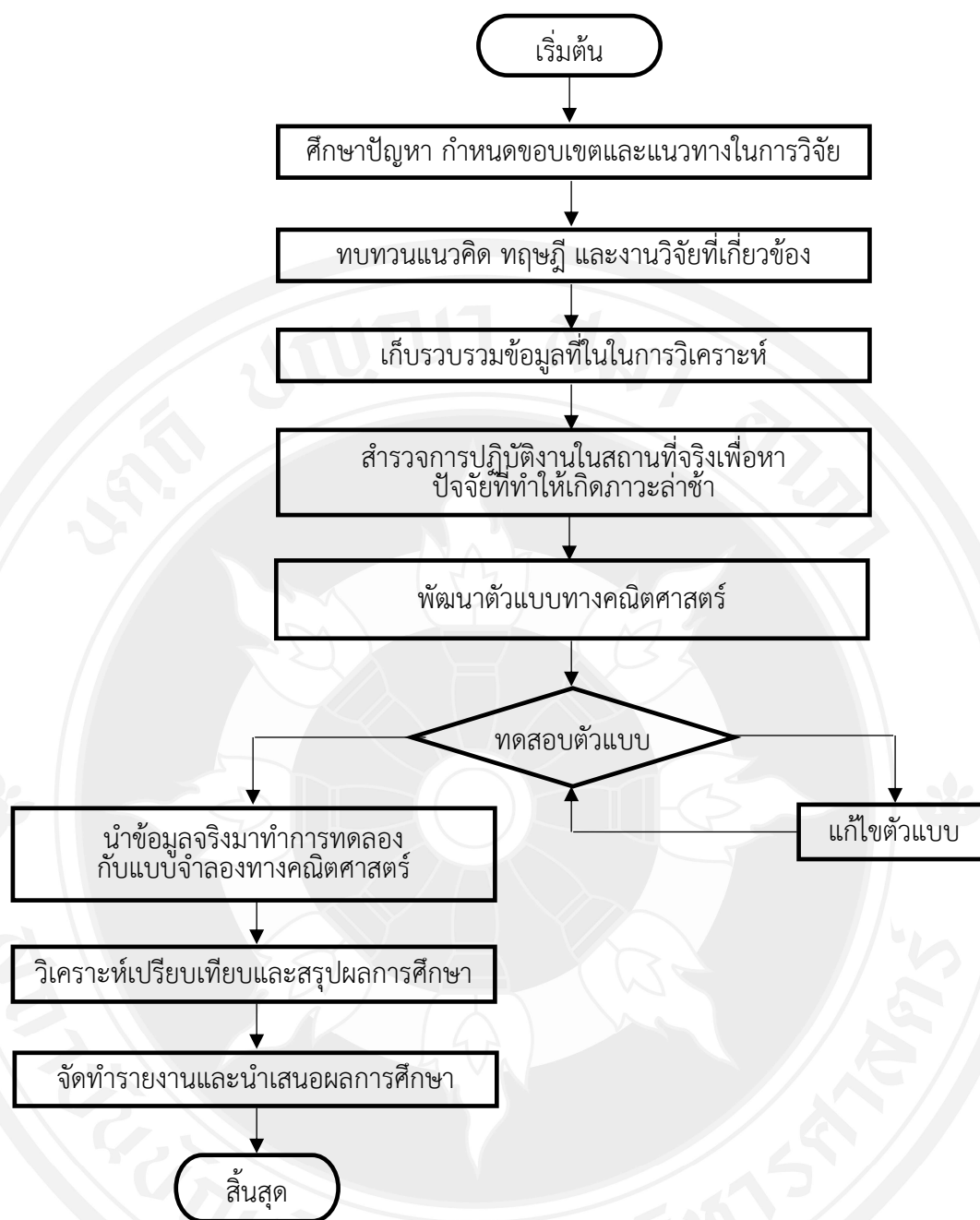
ผู้ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	ประเด็นที่ศึกษา
Psaraftis (1978)	A Dynamic Programming Approach to the Aircraft Sequencing Problem	- ใช้การจัดลำดับโดยกำหนดให้อากาศยานทุกลำอยู่ในสถานะพร้อมที่จะลงจอด
Luenberger (1988)	A Traveling-Salesman-Based Approach to Aircraft Scheduling in the Terminal Area	- ใช้ Open TSP ในการจัดลำดับอากาศยาน
H. Lee and H. Balakrishnan (2008)	Fuel Cost, Delay and Throughput Tradeoffs in Runway Scheduling	- จัดลำดับการลงจอดเพื่อลดต้นทุน
Mesgarpour, Potts, Bennell (2010)	Models for Aircraft Landing Optimization	- จัดลำดับอากาศยานลงจอดเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์หลายเป้าหมาย
Kolos-Lakatos (2013)	The Influence of Runway Occupancy Time and Wake Vortex Separation Requirements on Runway Throughput	- เปรียบเทียบอิทธิพลระหว่างการจัดระยะห่างจากกระแสลมวนกับระยะเวลาการครอบครองทางวิ่ง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางและวิธีการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรองรับเที่ยวบินของทางวิ่ง กรณีศึกษาสนามบินสุวรรณภูมิ รวมถึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการเข้าของการจัดลำดับ และความสามารถในการรองรับเที่ยวบินของทางวิ่ง โดยผู้วิจัยพบว่าท่าอากาศยานสุวรรณภูมิซึ่งเป็นท่าอากาศยานหลักอันดับหนึ่งของประเทศไทย ที่ถูกวางเป้าหมายให้เป็นศูนย์กลาง (Hub) ของอุตสาหกรรมการบินในภูมิภาคตะวันออกเฉียงใต้หรืออาเซียน ยังคงประสบปัญหาในด้านการรองรับเที่ยวบินในปัจจุบัน และมีแนวโน้มที่จะประสบปัญหาเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุตสาหกรรมการบินของไทยได้รับการปลดตรงแดงจากองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) ในอนาคต ผลกระทบที่จะตามมาจากการปลดตรงแดงคือการเพิ่มขึ้นของสายการบิน และเที่ยวบินทั้งภายในและต่างประเทศ ซึ่งส่วนงานที่จะได้รับผลกระทบสูงสุดก็คือการรองรับจำนวนเที่ยวบินในภาคอากาศ และบริเวณที่เป็นคอขวดของระบบการคมนาคมทางอากาศ ก็คือในช่วงขาสุดท้าย (Final) ที่จะเข้าสู่สนามบิน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ที่รองรับการวิ่งขึ้นและลงของอากาศยานซึ่งเรียกว่าทางวิ่ง (Runway) มีลักษณะเป็นเส้นตรง และการเข้าสู่สนามบินในช่วงสุดท้ายของอากาศยานนั้นจำเป็นต้องทำการบินเป็นลักษณะเส้นตรงแนวเดียวกับทางวิ่งเพื่อความปลอดภัยในการทำการบิน ดังนั้นไม่ว่าอากาศยานจะมาจากทางใดก็ตาม แต่จะมีเพียงเส้นทางเดียวที่เข้าสู่สนามบินและทางวิ่งได้ การจัดลำดับเครื่องเข้าสู่สนามบินอย่างไรที่จะทำให้เส้นทางดังกล่าวสามารถรองรับปริมาณอากาศยานได้สูงที่สุดจึงเป็นความท้าทายหลักของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศ และเป็นความท้าทายหลักของงานวิจัยชิ้นนี้ด้วย โดยงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการศึกษาไว้ที่พื้นที่ตั้งแต่อากาศยานตั้งตัวในช่วงสุดท้ายเข้าสู่สนามบิน (Final Approach Track) กระทั่งอากาศยานเลี้ยวออกพ้นจากทางวิ่ง โดยใช้กรณีศึกษาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นท่าอากาศยานที่ได้มาตรฐาน มี 2 ทางวิ่งซึ่งได้มาตรฐานจากองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ และจะพิจารณาเพียงทางวิ่งที่ใช้สำหรับลงจอดเท่านั้น

หลังจากที่ผู้วิจัยได้กำหนดหัวข้อและขอบเขตที่จะศึกษาแล้ว ก็ได้ทำการทบทวนงานวิจัยในอดีตทั้งที่เป็นของภายในประเทศและต่างประเทศ รวมถึงบทความเอกสารต่าง ๆ ที่ระบุถึงกฎเกณฑ์ในการปฏิบัติงานด้านการบินที่จำเป็นต้องใช้ โดยได้รวบรวมข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาและมีความจำเป็นไว้ในบทที่ 2 ของงานวิจัย โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

3.1 การเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการลงจอดของอากาศยานที่สนามบินสุวรรณภูมิโดยข้อมูลที่ได้แบ่งเป็นสองลักษณะ คือ ข้อมูลเชิงสถิติ และข้อมูลเชิงคุณภาพ

3.1.1 ข้อมูลหลักสถิติ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการขออนุเคราะห์ข้อมูลอากาศยานขาเข้าท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ประเทศไทย จากบริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวซึ่งประกอบด้วยจำนวนเที่ยวบินขาเข้าที่มีการทำการบิน แบบเครื่องอากาศยาน (Type of Aircraft) เวลาคาดการณ์ที่จะมาถึง (Target Landing Time / Estimated Time of Arrival) เวลาลงจอดจริง (Actual Landing Time) เพื่อมาดำเนินการทดสอบกับตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาความเป็นไปได้ที่จะนำตัวแบบดังกล่าวมาใช้ในการพัฒนาระบบการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยาน โดยทำการเก็บสถิติย้อนหลังเป็นเวลา 1 เดือน คือในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2560

3.1.2 ข้อมูลสนับสนุน

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดลำดับการลงจอดอากาศยาน ซึ่งได้แก่ การเฝ้าสังเกตการณ์วิธีปฏิบัติงานจริงของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศในสถานที่ปฏิบัติงานจริง รูปแบบของสภาพการจราจรที่เกิดขึ้นจริงที่หน้างาน ข้อจำกัดต่าง ๆ ในการปฏิบัติหน้าที่ซึ่งอยู่นอกเหนือที่ได้รับรู้ไว้ในเอกสารต่าง ๆ ขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ การเก็บข้อมูลด้านระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่อไป รวมถึงการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานและผู้ชำนาญการเพื่อหาปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาการล่าช้า นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการเก็บข้อมูลที่จะเป็นต่อการวิจัย อาทิ ความเร็วในการเข้าสู่สนามบินโดยเฉลี่ยของอากาศยานแต่ละแบบ อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยานแต่ละแบบ และอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก CO₂ ของอากาศยาน

เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวมาแล้วก็นำมาพิจารณาร่วมกับกฎและข้อบังคับต่าง ๆ ขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศเพื่อปรับปรุงตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลอย่างง่าย ก่อนจะนำข้อมูลดังกล่าวมาทดลองกับตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง

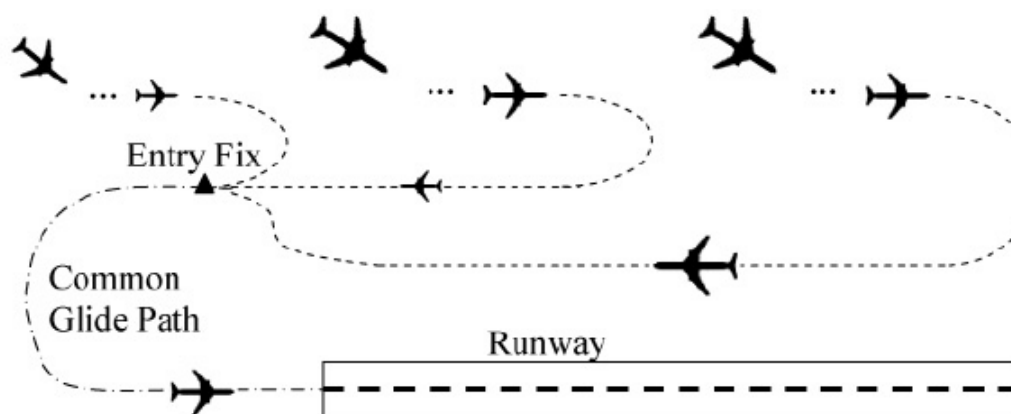
3.2 ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการจัดลำดับอากาศยานลงจอดนั้นเป็นการจัดลำดับอากาศยานในเขตพื้นที่ประชิดสนามบิน (Terminal Control Area : TMA) โดยเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเขตประชิดสนามบิน (Approach Controller) ซึ่งมีพื้นที่ในการควบคุมประมาณ 50 ไมล์ทะเลโดยรอบสนามบินจากระยะสูง 2,000 ฟุต ถึง 11,000 ฟุต จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ก่อนจะส่งต่อความรับผิดชอบอากาศยานให้กับเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเขตสนามบิน (Aerodrome Controller) ที่ระยะประมาณ 5 – 10 ไมล์ทะเลตามแต่ที่ได้ตกลงกันไว้ และพิจารณาแล้วว่าอากาศยานสามารถทำการบินเข้าสู่สนามบินได้อย่างปลอดภัย โดยเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเขตสนามบินจะเป็นผู้ให้คำสั่งอนุญาตลงจอดแก่อากาศยาน เมื่อพิจารณาแล้วว่าทางวิ่งไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ และอากาศยานอยู่ในวิสัยที่จะสามารถลงจอดได้อย่างปลอดภัย ซึ่งระยะ 5 – 10 ไมล์ทะเลสู่สนามบินดังกล่าวเรียกว่า เส้นทางบินขาสุดท้าย (Final Approach Track) ซึ่งถือเป็นคอขวดของระบบ และเป็นจุดที่ต้องพิจารณาว่าอากาศยานลำใดควรจะได้เข้าสู่เส้นทางบินขาสุดท้ายก่อนหรือหลัง จึงจะทำให้เกิดการล่าช้าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นปัญหาของงานวิจัยนี้ และแม้เขตคอขวดจะเป็นเขตพื้นที่รับผิดชอบของเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศเขตสนามบิน แต่หน้าที่จัดลำดับอากาศยานเข้าสู่เส้นทางที่เป็นคอขวดนั้นเป็นหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเขตประชิดสนามบิน

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนารูปแบบการจัดลำดับเครื่องอากาศยานขาเข้าสนามบินพบว่า ปัญหาการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานนั้นเป็นปัญหาแบบ NP – Hard ซึ่งเป็นปัญหาระดับยาก ไม่สามารถแก้ได้โดย Deterministic Turing machine ด้วยเวลา Polynomial งานวิจัยหลายชิ้นที่เกี่ยวข้องจึงเลือกที่จะใช้วิธีการ Traveling Salesman Problem (TSP) แทน เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายภายในเวลาที่จำกัด โดย TSP นั้นเป็นปัญหาที่ทำการตัดสินใจหาเส้นทางเดินทางเมื่อมีเมืองหรือสถานที่ที่ต้องเดินทางจำนวน N เมือง โดยเส้นทางเดินทางนั้น จะต้องผ่านเมืองทุกเมืองใน N และกลับมาที่จุดเริ่มต้น โดยใช้ระยะทางน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3.2

อย่างไรก็ตามรูปแบบปัญหาของการจัดลำดับอากาศยานลงจอดแม้จะมีคล้ายคลึงกับตัวแบบ TSP แต่ก็มี ความแตกต่างกันโดยเฉพาะเรื่องของจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการเดินทาง ซึ่งตัวแบบ TSP นั้นจะมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็นจุดเดียวกัน แต่การจัดลำดับอากาศยานลงจอดนั้นอากาศยานที่ลงจอดไปแล้วจะไม่สามารถนำมานับรวมใหม่ได้ ลักษณะดังกล่าวทำให้การเลือกลำดับลงจอดของอากาศยานมีลักษณะเป็นตัวแบบ TSP แบบเปิด (Open TSP) ซึ่งมีงานวิจัยหลายฉบับได้ทำการทดสอบหาลำดับการลงจอดโดยใช้ตัวแบบ Open TSP ในการคำนวณ ซึ่งทำให้ได้ลำดับการลงจอดโดยใช้ระยะเวลาที่สั้นที่สุด

อย่างไรก็ดี การพิจารณาการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานในปัจจุบันควรต้องคำนึงถึงปัจจัยหลาย ๆ ประการที่จะได้รับการกระทบจากการจัดลำดับที่ดีที่สุด อาทิ การจัดลำดับที่ดีที่สุดที่ทำให้ทางวิ่งรองรับเที่ยวบินได้มากที่สุด อาจก่อให้เกิดปัญหาการล่าช้าสะสมของอากาศยานแต่ละลำได้ ซึ่งการล่าช้าดังกล่าวย่อมไม่เป็นผลดีต่อผู้ประกอบการ คือสายการบิน เพราะจะทำให้สายการบินต้องแบกรับค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากการจัดลำดับลงจอดของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศ ซึ่งประเด็นเป้าหมายของการแก้ปัญหาที่จะเปลี่ยนไปจากการจัดลำดับอากาศยานให้สามารถลงบนทางวิ่งได้มากที่สุดภายในเวลาที่จำกัด (จำนวนเที่ยวบินต่อชั่วโมง) เป็นการจัดลำดับอากาศยานที่มีประสิทธิภาพ สามารถรองรับจำนวนอากาศยานได้อย่างเหมาะสม สามารถแก้ปัญหาความล่าช้าของอากาศยาน และช่วยลดการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยานขณะที่ทำการร่อนทำการลงสู่สนามบินได้ ซึ่งประเด็นปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาแบบหลายเป้าหมาย ตัวแบบ TSP จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้ Mesgarpour (2010) ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้ตัวแบบ Cumulative Travelling Salesman Problem (CTSP) ซึ่งมีความเหมาะสมมากกว่า และสามารถนำผลที่ได้มาใช้แก้ปัญหามากกว่าได้ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการนำตัวแบบที่ Mesgarpour ได้นำเสนอไว้มาปรับปรุงให้มีความเหมาะสมกับข้อจำกัดของกรณีศึกษาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ



ภาพที่ 3.2 ลักษณะการเข้าสู่ช่วงสุดท้ายของการเข้าสู่สนามบินของอากาศยาน
แหล่งที่มา: Hu & Di Paolo, 2011.

3.2.1 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

SLT_i	เวลาที่ได้รับการจัดลำดับในการลงจอดของอากาศยาน i
x_{ij}	{ มีค่าเป็น 1 ในกรณีที่อากาศยาน i ลงจอดก่อนอากาศยาน j (โดยไม่จำเป็นต้องเป็นลำดับที่ต่อเนื่องกัน) มีค่าเป็น 0 หากเป็นอย่างอื่น

3.2.2 พารามิเตอร์ (Parameters)

n	จำนวนอากาศยานขาเข้าที่จะได้รับการจัดลำดับ
A	ชุดของอากาศยานขาเข้าที่จะได้รับการจัดลำดับ โดย $A = \{1, \dots, n\}$
SLT_j	เวลาที่ได้รับการจัดลำดับในการลงจอดของอากาศยานที่ลงจอดจากอากาศยาน i ในทันที
$SLT_{\max}$	เวลาที่ได้รับการจัดลำดับที่อากาศยานล่าสุดท้ายในชุด A ลงจอด
SLT_{plc}	เวลาในการลงจอดของอากาศยานซึ่งคำนวณจากค่าคาดหวังของจำนวนเที่ยวบินที่สามารถลงจอดได้ในแต่ละชั่วโมงตามนโยบายของท่าอากาศยาน
TLT_i	เวลาคาดหวังว่าจะได้ลงจอดของอากาศยาน i ตามที่ระบุไว้ในแผนการบิน หรือเรียกว่าเวลาคาดการณ์มาถึง (Estimated Time of Arrival : ETA)
D_i	ความล่าช้าในการลงจอดของอากาศยาน i (เกินกว่า TLT_i) หน่วยวินาที
T_{ij}	ระยะห่างขั้นต่ำที่ปลอดภัยในการลงจอดระหว่างอากาศยาน i และอากาศยาน j หน่วยวินาที
S_{ij}	ระยะต่อขั้นต่ำที่ปลอดภัยระหว่างอากาศยาน i และอากาศยาน j พิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน หน่วยวินาที
ROT_i	ระยะเวลาครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน i นับจากเวลาที่อากาศยานข้ามจุดเริ่มต้นของทางวิ่ง (Runway Threshold) กระทั่งเลี้ยวออกพ้นจุดรอบนทางขับ (Runway Holding Point) หน่วยวินาที
V_i	เวลาในช่วงสุดท้ายเข้าสู่ทางวิ่ง (Final Approach Speed) ของอากาศยาน i
V_j	เวลาในช่วงสุดท้ายเข้าสู่ทางวิ่ง (Final Approach Speed) ของอากาศยาน j
r	ความยาวของช่วงสุดท้ายเข้าสู่ทางวิ่ง (Final Approach Length) หน่วยไมล์ทะเล
FB_i	อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยาน i ในระยะเวลาลงจอดล่าช้าของอากาศยาน i หน่วยกิโลกรัมต่อวินาที

ET_i	ระยะเวลาที่อากาศยาน i สามารถทำการบินอยู่ได้ภายหลังจากที่เวลาล่วงเลย
TLT_i	มาแล้ว โดยพิจารณาจากปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่ หน่วยวินาที
PT	ระยะเวลาที่ล่าช้าที่สุดที่จะอนุญาตให้อากาศยานลงจอดได้ซึ่งกำหนดโดยเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศ
C_o	ค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานจากการเก็บค่าบริการขึ้นลงสนามบิน หน่วยเป็นบาท
C_f	ค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินหน่วยเป็นบาท
C_t	ภาษีคาร์บอนส่วนเกินหน่วยเป็นบาท
R_o	อัตรารายได้ของท่าอากาศยานจากการเก็บค่าบริการขึ้นลงสนามบิน หน่วยเป็นบาทต่อวินาที
R_f	อัตราค่าเชื้อเพลิงอากาศยาน หน่วยเป็น บาทต่อกิโลกรัม
R_t	อัตราค่าภาษีคาร์บอนหน่วยเป็น บาทต่อกิโลกรัม
W_o	ค่าถ่วงน้ำหนักค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน (opportunity Cost)
W_f	ค่าถ่วงน้ำหนักค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน (Excess Fuel Cost)
W_t	ค่าถ่วงน้ำหนักค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน (Excess Carbon Tax Cost)

3.2.3 สมการแบบหลายเป้าประสงค์ (Multiobjective)

ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับทางวิ่งของสนามบินนั้น มักพิจารณาจากความสามารถในการรองรับเที่ยวบินของทางวิ่ง ซึ่งสามารถหาได้จากทฤษฎีตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem : TSP) โดยเปลี่ยนจากต้นทุนการเดินทางของพนักงานขาย (C_{ij}) เป็นระยะเวลาระหว่างอากาศยาน (T_{ij}) ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถจัดลำดับอากาศยานลงจอดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามที่ได้มีผลการศึกษาในอดีต อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการบินในระยะหลังมานี้ได้ให้ความสำคัญกับการลดปัญหามลภาวะและการสิ้นเปลืองทรัพยากรมากขึ้น ดังนั้นเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของทางวิ่งนั้นจึงไม่เพียงแต่การมุ่งเพิ่มความสามารถในการรองรับเที่ยวบินของทางวิ่ง หากแต่ยังต้องพิจารณาถึงการลดอัตราการล่าช้า (Delay) และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงซึ่งกระทบต่อปัญหามลภาวะ (Excess Pollution) จากการล่าช้าในการลงจอดของอากาศยานด้วย ดังนั้นเป้าหมายของการแก้ปัญหาคือการลดปัญหาการล่าช้าโดยรวมของระบบ การใช้ตัวแบบ TSP จึงไม่อาจนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งวิธีการที่ Mesgarpour ได้นำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวคือวิธีการ Cumulative Travelling Salesman Problem : CTSP ซึ่งผลที่ได้จากการใช้วิธีการ CTSP นั้นจะแตกต่างจาก TSP คือ สามารถนำผลไปใช้หาคำตอบของเป้าหมายด้านอื่น ๆ ได้ ซึ่งการศึกษาดังกล่าวทางคณิตศาสตร์ในครั้งนี้ไม่เพียงเพื่อจะจัดลำดับการลงจอดที่สามารถทำให้ทางวิ่งสามารถ

รองรับเที่ยวบินได้สูงสุดเท่านั้น แต่ยังพิจารณาถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องและสมควรนำมาพิจารณาเพิ่มเติม ดังนั้นตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษานี้จึงอยู่ในรูปแบบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อการหาทางเลือกที่ดีที่สุดแบบหลายเป้าหมาย (Multi-Objective Optimization) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าระบบ Optimal ที่แบ่งออกเป็นเป้าหมายต่าง ๆ ดังนี้

3.2.3.1 เป้าประสงค์ที่ 1 : เพิ่มประสิทธิภาพให้กับทางวิ่ง (Maximize the runway throughput)

ท่าอากาศยานคือองค์การด้านการบินที่มีความสำคัญและการดำเนินธุรกิจของท่าอากาศยานมีความเกี่ยวข้องกับการเข้ามาใช้พื้นที่โดยอากาศยานโดยตรง อย่างไรก็ตามท่าอากาศยานสามารถสร้างรายได้ทั้งจากในส่วนของการเกี่ยวข้องกับการบินและไม่เกี่ยวข้องกับการบิน ในส่วนของรายได้ที่เกี่ยวข้องกับการบินนั้น ส่วนที่เห็นได้ชัดที่สุดคือ ค่าบริการในการขึ้นลงของอากาศยาน ซึ่งในข้อบังคับของสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย ฉบับที่ 5 ว่าด้วยค่าบริการในการขึ้นลงของอากาศยานและค่าบริการที่เก็บอากาศยาน ณ สนามบินอนุญาตหรือที่ขึ้นลงชั่วคราวอนุญาต ในข้อ 2 ได้ระบุไว้ว่า

สำหรับสนามบินที่อยู่ในความรับผิดชอบของบริษัทท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน)

- 1) 10 เมตรกตันแรก ครั้งละไม่เกิน 1,150 บาท
- 2) ส่วนที่เกิน 10 เมตรกตัน แต่ไม่เกิน 50 เมตรกตัน เมตรกตันละไม่เกิน 135 บาท
- 3) ส่วนที่เกิน 50 เมตรกตัน แต่ไม่เกิน 100 เมตรกตัน เมตรกตันละไม่เกิน 155 บาท
- 4) ส่วนที่เกิน 100 เมตรกตัน เมตรกตันละไม่เกิน 175 บาท (สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย, 2558)

ดังนั้นหากพิจารณาว่าในการที่ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิจะสามารถรองรับเที่ยวบินได้ถึง 38 เที่ยวบินต่อชั่วโมงตามข้อมูลของท่าอากาศยานสุวรรณภูมินั้น จะต้องเป็นเที่ยวบินที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งในที่นี้จะอนุมานว่าเป็นอากาศยานขนาดกลางทั้งหมด ซึ่งอากาศยานขนาดกลางตามคำนิยามของ ICAO คืออากาศยานที่มีน้ำหนักสูงสุดขณะวิ่งขึ้นระหว่าง 7,000 – 136,000 กิโลกรัม โดยอากาศยานที่มีความนิยมสูงสุดคืออากาศยานแบบ A320 นั้นมีน้ำหนักสูงสุดขณะวิ่งขึ้นอยู่ที่ 68,000 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.1 ค่าใช้จ่ายในการใช้ทางวิ่งพิจารณาจากน้ำหนักสูงสุดวิ่งขึ้นของอากาศยาน

แบบเครื่อง	ขนาด	น้ำหนักสูงสุดวิ่งขึ้น (ก.ก.)	ค่าใช้จ่ายในการใช้ทางวิ่ง (บาท)
A320	M	68,000	9,340
A332	H	242,000	39,150
A340	H	371,950	61,891
A351	H	308,000	50,700
A388	S	575,000	97,425
B738	M	79,000	11,045
B744	H	396,900	66,258
B763	H	159,000	24,625
B777	H	299,370	49,190
B787	H	254,000	41,250

โดยท่าอากาศยานสุวรรณภูมินั้นถือเป็นท่าอากาศยานที่อยู่ในความรับผิดชอบของ บริษัทท่าอากาศยานไทย และมีการประกาศว่าท่าอากาศยานสุวรรณภูมิสามารถรองรับเที่ยวบินได้ 76 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ซึ่งแบ่งเป็น เที่ยวบินขาเข้า 38 เที่ยวบิน และเที่ยวบินขาออก 38 เที่ยวบิน ซึ่งในงานวิจัยนี้เราพิจารณาแต่เพียงในส่วนของเที่ยวบินขาเข้า ซึ่งหากอ้างอิงตามจำนวนเที่ยวบินที่บริษัท ท่าอากาศยานไทยประกาศนั้น ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิควรจะสามารถทำเงินได้ 38 เที่ยวบินต่อ ชั่วโมงหรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายตามน้ำหนักสูงสุดวิ่งขึ้นดังแสดงใน ตารางที่ 3.1

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้ทางวิ่งอากาศยานแบบ A320			
คิดเป็น	$1,150 + 5,400 + 2,790$	=	9,340.00 บาทต่อเที่ยวบิน
หรือคิดเป็น	$9,340 \times 38$	=	354,920.00 บาทต่อชั่วโมง
หรือคิดเป็น	$354,920/3,600$	=	98.59 บาทต่อวินาที

ซึ่งในการวิจัยนี้จะถือว่าท่าอากาศยานสมควรได้รายได้ 98.59 บาทต่อวินาที หากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีจำนวนเที่ยวบินต่อชั่วโมงต่ำกว่า 38 เที่ยวบิน ท่าอากาศยานจะมีค่าเสียโอกาสจากการใช้ทางวิ่งเป็นมูลค่า 98.59 บาทต่อวินาที สำหรับค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานจากการลงจอดล่าช้าจากการจัดลำดับลงจอดโดยระบบต่างๆ นั้นสามารถหาได้จากการเทียบเคียงผลรวมเวลาลงจอดที่ได้รับการจัดสรรโดยระบบ เทียบกับผลรวมเวลาลงจอดที่ควรจะเป็นตามประกาศ

นโยบายอัตราค่าธรรมเนียมของท่าอากาศยาน ซึ่งทุกวินาทีที่ชุดเที่ยวบินใช้เวลาเกินจากนโยบายตามประกาศของท่าอากาศยานจะมีค่าเสียโอกาสวินาทีละ 98.59 บาท ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{Opportunity Cost } (C_o) = R_o \left[\sum_{i=1}^n SLT_i - \sum_{i=1}^n SLT_{plc} \right] \quad (3.1)$$

ความจุทางวิ่งซึ่งเป็นเป้าหมายหลักในการจัดลำดับอากาศยานลงจอดนั้น Mesgarpour (2010) ได้นำเสนอมุมมองการพิจารณาใหม่ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับทางวิ่งนั้นหากจะกล่าวในอีกทางหนึ่งก็คือการลดระยะเวลาในการลงจอดให้ได้ต่ำที่สุดโดย Mesgarpour ได้นำเสนอรูปแบบของสมการ

$\text{Average Landing Time} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SLT_i$ อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าสมการดังกล่าวไม่ได้สะท้อนถึงระยะเวลาการลงจอดของอากาศยานที่แท้จริง เนื่องจากค่า SLT_i นั้นเป็นค่าที่บ่งถึงเวลาที่อากาศยาน i ได้ทำการลงจอด ซึ่งเวลาดังกล่าวนั้นเป็นเวลาที่รวมเวลาของอากาศยานที่ลงจอดก่อนหน้าไปแล้ว จึงทำให้เกิดการนับเวลาซ้ำซ้อน เป็นผลให้ค่าที่ได้จากสมการดังกล่าวไม่สามารถสะท้อนประสิทธิภาพความจุทางวิ่งได้ ผู้วิจัยจึงปรับปรุงสมการดังกล่าวให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น โดยใช้ค่า $SLT_{\max}$ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งถึงเวลาที่อากาศยานล่าช้าที่สุดในชุด A ลงจอด ซึ่งเป็นผลรวมของ T_{ij} (เฉพาะลำที่ลงต่อเนื่องกันทันที) และสามารถนำมาหาค่าความจุของทางวิ่งในหน่วยเที่ยวบินต่อชั่วโมงได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{Runway Capacity} = \frac{3600n}{SLT_{\max}} \quad (3.2)$$

3.2.3.2 เป้าประสงค์ที่ 2 : ลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน (Minimize Excess Fuel Cost)

ผลกระทบทางตรงที่สายการบินจำเป็นต้องแบกรับจากการลงจอดล่าช้าของอากาศยาน ค่าเชื้อเพลิงซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่สามารถเห็นได้ชัดที่สุดของสายการบิน ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าองค์กรการบินพลเรือนระหว่างประเทศได้มีการแบ่งขนาดของอากาศยานไว้อย่างกว้างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศเพื่อลดความซับซ้อนในการปฏิบัติงานเพื่อให้เกิดความปลอดภัย ซึ่งอากาศยานที่อยู่ในขนาดเดียวกันก็จะใช้เกณฑ์การจัดระยะต่อขั้นต่ำ (Minimum Longitudinal Separation) เพื่อลดผลกระทบจากกระแสน้ำปั่นป่วนจากอากาศยาน (Wake Turbulence) ด้วยระยะทางที่เท่ากัน แต่เกณฑ์ขนาดอากาศยานนั้นค่อนข้างกว้าง อาทิ เมื่อพิจารณาจากขนาดของอากาศยานขนาดกลางนั้นระบุว่าต้องเป็นอากาศยานที่มีน้ำหนักวิ่งขึ้นสูงสุดตั้งแต่ 7,000 – 136,000 กิโลกรัม ซึ่งตามหลักธรรมชาติแล้วอากาศยานที่มีมวลมากกว่าย่อมต้องใช้กำลังเครื่องยนต์ที่มากกว่าและใช้เชื้อเพลิงในการสร้างแรงขับให้กับเครื่องยนต์มากกว่าด้วย ดังนั้นอากาศยานที่มีมวลมากกว่าหรือใช้เทคโนโลยีที่เก่ากว่ามักจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่มากกว่า ซึ่งจาก

หลักการนี้สามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่าการจัดลำดับของอากาศยานโดยพิจารณาจากขนาดเพียงอย่างเดียว นั้นอาจไม่สามารถนำมาซึ่งลำดับการลงจอดที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ ด้วยเหตุนี้แบบเครื่องและ อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงจึงควรได้รับการนำมาพิจารณาอย่างจริงจัง โดยข้อมูลอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงนี้อ้างอิงจากเอกสาร ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology Version 10 (ICAO, 2017a) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยาน

แบบเครื่อง	ขนาด	อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง	
		กิโลกรัม/ชั่วโมง	กิโลกรัม/วินาที
AT42	M	723	0.20
AT72	M	891	0.25
AT76	M	843	0.23
A306	H	6,571	1.83
A319	M	3,259	0.91
A320	M	3,430	0.95
A321	M	3,925	1.09
A330	H	7,277	2.02
A332	H	6,964	1.93
A333	H	7,277	2.02
A343	H	8,452	2.35
A346	H	10,030	2.79
A359	H	5,517	1.53
A388	S	12,016	3.34
B703	M	8,557	2.38
B722	M	5,891	1.64
B732	M	3,708	1.03
B733	M	3,323	0.92
B734	M	3,482	0.97
B735	M	3,153	0.88
B737	M	3,439	0.96

แบบเครื่อง	ขนาด	อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง	
		กิโลกรัม/ชั่วโมง	กิโลกรัม/วินาที
B738	M	3,494	0.97
B741	H	11,509	3.20
B743	H	10,827	3.01
B744	H	9,690	2.69
B752	H	4,435	1.23
B762	H	5,457	1.52
B763	H	5,799	1.61
B772	H	7,819	2.17
B777	H	8,572	2.38
B77W	H	7,819	2.17
B788	H	8,667	2.41

แหล่งที่มา: ICAO, 2017a.

จากตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าการจัดลำดับโดยพิจารณาเพียงขนาดของอากาศยานอย่างเดียวย่อมนำมาซึ่งความปลอดภัยในการทำการบิน แต่อาจไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้หากพิจารณาในมุมมองเชิงพาณิชย์นั่นคือความมีประสิทธิภาพของค่าใช้จ่าย ดังจะเห็นว่ามียานหลายแบบที่มีขนาดอากาศยานเท่ากันแต่มีอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง อาทิ หากอากาศยานแบบเครื่อง AT72 และ A320 :ซึ่งเป็นอากาศยานขนาดกลางทั้ง 2 แบบ มีเวลาการเดินทางมาถึง ณ เวลาเดียวกัน ในหลักการจัดระยะต่อของอากาศยาน ไม่ว่าอากาศยานลำใดจะลงก่อนย่อมไม่เกิดความแตกต่าง แต่ในมุมมองของการบริหารทรัพยากร คือ ค่าใช้จ่ายต่างๆ แล้ว การให้อากาศยานแบบ AT72 ที่มีอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิง 723 กิโลกรัมต่อชั่วโมงได้ลงก่อน และให้อากาศยานแบบ A320 ที่มีอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิง 3,430 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต้องรอนั้นย่อมก่อให้เกิดความไม่คุ้มค่าทางทรัพยากรอย่างมหาศาล ซึ่งการลดปัญหาการล่าช้าสามารถหาได้จากสมการ 3.3 โดยการเทียบเคียงเวลาลงจอดที่จัดโดยระบบกับเวลาการเดินทางมาถึง ซึ่งผลต่างของเวลาทั้งสองคือเวลาที่เที่ยวบินมีการทำการบินล่าช้า และก่อให้เกิดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน ทั้งนี้ค่าเชื้อเพลิงที่เกิดจากกลางจอดล่าช้านั้นมีค่าเท่ากับ ค่าเชื้อเพลิง (บาท/กิโลกรัม) $\times$ อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิง (กิโลกรัม/วินาที) $\times$ ระยะเวลาที่ลงจอดล่าช้า (วินาที) ซึ่งค่าเชื้อเพลิงในการวิจัยนี้นับคิดที่ 57.99 บาทต่อแกลลอน หรือ

คิดเป็น 19.08 บาท/กิโลกรัม (1 US Gallon = 3.04 kilogram) อ้างอิงจากราคาเชื้อเพลิง ณ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2560 ซึ่งอัตราการการเผาผลาญที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงจากข้อมูลในตารางที่ 3.2

$$\text{Excess Fuel Cost } (C_f) = R_f \sum_{i=1}^n (SLT_i - TLT_i) \cdot FB_i \quad (3.3)$$

3.2.3.3 เป้าประสงค์ที่ 3 : ลดค่าภาษีคาร์บอน (Minimize Excess Carbon Tax)

อุตสาหกรรมการบินถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศอย่างมหาศาล ซึ่งองค์การการบินระหว่างประเทศให้ความสำคัญต่อการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยมีแผนที่จะนำมาตราการกลไกขดเชยและการลดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการบินระหว่างประเทศจะยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ในปี 2564

แม้ในปีที่ได้มีการวิจัย (2560) มาตรการกลไกขดเชยและการลดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการบินระหว่างประเทศจะยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ และยังไม่ได้มีการระบุค่าที่แน่นอน อย่างไรก็ตามได้มีการประเมินค่าความเสียหายที่ก๊าซเรือนกระจกมีต่อสิ่งแวดล้อมในการวิจัยในอดีตหลายชิ้น หนึ่งในทฤษฎีที่ได้รับความนิยมเชื่อถือคือทฤษฎี Dice (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy Model) ซึ่งได้ระบุมูลค่าต้นทุนทางสังคมคาร์บอน (ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสังคมอันเป็นผลจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก) ไว้ที่ 31.2 เหรียญสหรัฐต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศจำนวน 1 เมตริกตัน (1,000 กิโลกรัม) สำหรับปี 2558 และจะมีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 ต่อปี กระทั่งถึงปี 2593 ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 33.1 เหรียญสหรัฐในปี 2560 (Nordhaus, 2017) หรือเทียบเป็น 1.16 บาทต่อกิโลกรัมคาร์บอนที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ (อัตราเทียบเคียง 1 เหรียญสหรัฐ : 35 บาทไทย) ทั้งนี้ ICAO ได้ระบุว่าเชื้อเพลิงอากาศยาน 1 กิโลกรัมที่ถูกใช้ไปจะเปลี่ยนเป็นก๊าซเรือนกระจก 3.16 กิโลกรัม (ICAO, 2017a)

ดังนั้นเมื่อมีการประเมินต้นทุนทางสังคมคาร์บอนจึงมีแนวคิดที่จะจัดเก็บภาษีคาร์บอน (Carbon Tax) ในอัตราที่เท่ากันเพื่อนำมาใช้ในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมเป็นการชดเชยสังคม ซึ่งเป็นไปได้ว่าในอนาคตองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ICAO จะได้นำ Carbon Tax นี้มาใช้เป็นกลไกขดเชยและการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการบินระหว่างประเทศ (CORSIA) โดยค่าภาษีคาร์บอนจากการลงจอดล่าช้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{Excess Carbon Tax } (C_t) = R_t \sum_{i=1}^n (SLT_i - TLT_i) FB_i \quad (3.4)$$

เมื่อนำเป้าหมายทั้ง 3 ด้านมาทำการหาลำดับการลงจอดที่ดีที่สุดที่สามารถตอบสนองเป้าหมายทั้ง 3 ด้านได้ จึงต้องนำสมการเป้าหมายทั้ง 3 ด้านมาเชื่อมเข้าด้วยกัน ก็จะได้สมการ

เป้าหมายแบบหลายเป้าหมาย (Multi-Objective Function) ซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W_o , W_f และ W_t และค่าทำให้เกิดสมการเป้าหมายดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$\text{Min } Z = W_o \cdot C_o + W_f \cdot C_f + W_t \cdot C_t \quad (3.5)$$

3.2.4 สมการข้อจำกัด (Constraints)

ในการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับทางวิ่งนั้นประกอบด้วยข้อจำกัดในหลาย ๆ ด้าน โดยประกอบไปด้วยข้อจำกัดด้านต่าง ๆ เหล่านี้

3.2.4.1 ข้อจำกัดเพื่อแก้ปัญหาการจัดลำดับเข้าจอด

อากาศยานแต่ละลำมีโอกาสลงจอดบนทางวิ่งได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังนั้นหากอากาศยาน i ลงจอดก่อนอากาศยาน j แล้ว อากาศยาน j จะไม่สามารถลงจอดก่อนอากาศยาน i ได้อีก และในทางกลับกัน หากอากาศยาน j ลงจอดก่อนอากาศยาน i แล้ว อากาศยาน i จะไม่สามารถลงจอดก่อนอากาศยาน j ได้เช่นกัน ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการทำ Subtour Elimination และอากาศยาน i กับอากาศยาน j ต้องไม่เป็นลำเดียวกัน ดังความสัมพันธ์ในสมการ 3.6

$$X_{ij} + X_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in A, i \neq j \quad (3.6)$$

3.2.4.2 ข้อจำกัดเพื่อการจัดระยะห่างที่ปลอดภัยในการลงจอดของอากาศยาน

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการจัดลำดับการลงจอดของอากาศยานนั้นคือระยะห่างระหว่างอากาศยาน ซึ่งจะต้องเป็นระยะห่างที่มากเพียงพอจะให้อากาศยานสามารถทำการบินลงจอดได้อย่างปลอดภัย จากการศึกษาพบว่าระยะห่างของอากาศยานแต่ละลำนั้นถูกกำหนดจากประเภทของอากาศยานโดยพิจารณาจากระดับแระแสอากาศปั่นป่วน ซึ่งกำหนดโดยองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) ซึ่ง Mesgarpour (2010) ยังได้นำวิธีการแก้ปัญหาของ Miller-Tucker-Zemlin มาใช้ในการแก้ปัญหาค่าความซับซ้อนของการจัดการปัญหาการจัดระยะห่างระหว่างอากาศยาน โดยผู้วิจัยได้ปรับปรุงสมการข้อจำกัดของ Mesgarpour (2010) บางส่วนเพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบงานวิจัย โดยใช้ตัวแปร T_{ij} ซึ่งเป็นค่าสูงสุดระหว่าง S_{ij} กับ ROT_i แทนตัวแปร S_{ij} สมการต้นแบบของ Mesgarpour (2010) ซึ่งหมายถึงระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยานพิจารณาจากกระแสอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานเพียงอย่างเดียว โดย M นั้นคือค่าจำลองเพื่อทำให้อสมการมากกว่าหรือเท่ากับนั้นมีความสามารถในการแก้ปัญหาแบบกำหนดการเชิงเส้นตามทฤษฎี Big M ดังสมการ 3.7

$$SLT_i + T_{ij} \leq SLT_j + M(1 - X_{ij}) \quad \forall i, j \in A, i \neq j, M \geq 0 \quad (3.7)$$

3.2.4.3 ข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการลงจอด

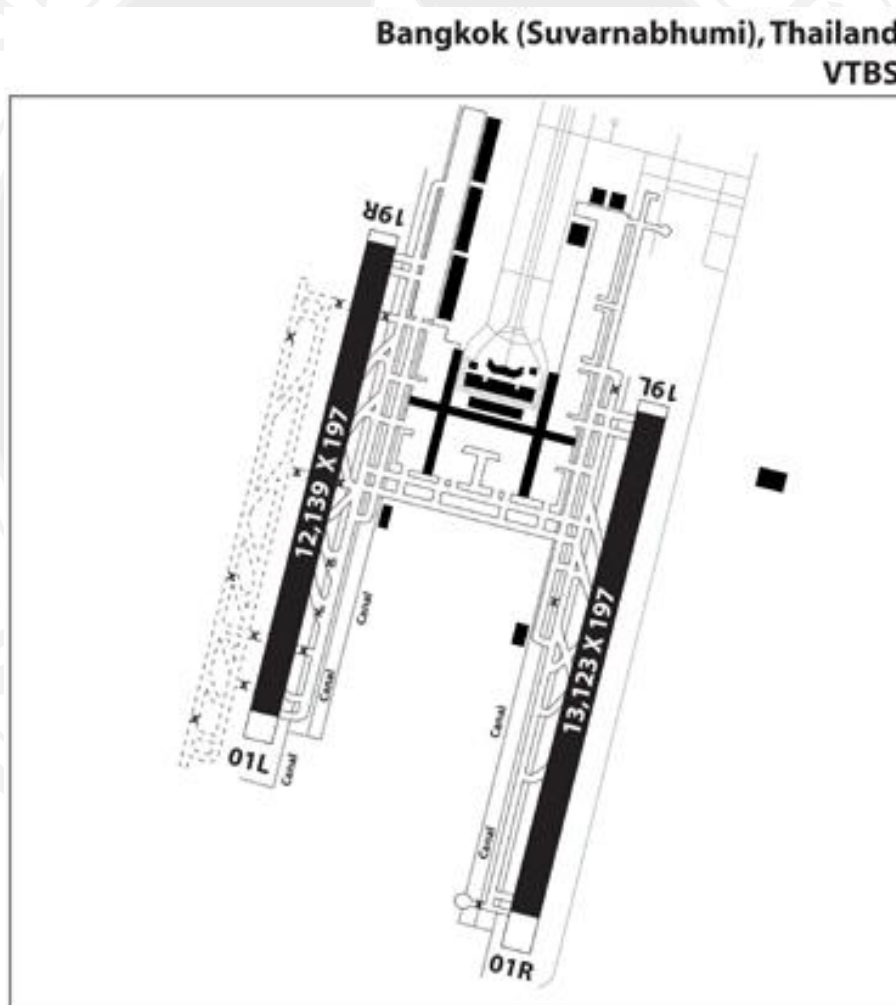
อากาศยานแต่ละลำมีข้อจำกัดด้านเวลาในการลงจอดแตกต่างกันขึ้นกับอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยาน และปริมาณน้ำมันที่เติมมาจากสนามบินต้นทางของอากาศยาน รวมถึงวิธีปฏิบัติการการบิน (Flying Technique) ของผู้ทำการบิน ระยะเวลาที่เป็นผลจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาคือระยะเวลาการทนทานในการทำการบิน (Flight Endurance Time) ซึ่งนับจากเวลาลงจอดคาดหมาย (TLT_i) ถึงเวลาที่มีการเผาผลาญเชื้อเพลิงหมดลง ซึ่งเวลาดังกล่าวจะขึ้นกับอากาศยานแต่ละลำซึ่งแตกต่างกัน นอกจากนี้ข้อจำกัดด้านเวลายังขึ้นกับนโยบายการให้บริการของผู้ให้บริการควบคุมการจราจรทางอากาศก็ได้ ดังนั้นข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการลงจอดจึงขึ้นกับค่าที่ต่ำที่สุดระหว่าง ระยะเวลาการทนทานในการทำการบิน (Flight Endurance Time : ET_i) กับระยะเวลานโยบายของผู้ให้บริการควบคุมการจราจรทางอากาศ (PT) เป็นสำคัญ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดให้อากาศยานทุกลำมีความสามารถในการทำการบินในอากาศห้วงเวลาคาดการณ์มาถึง 30 นาที และนโยบายของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศ คือ อากาศยานทุกลำจะต้องลงจอดได้ไม่เกิน 10 นาที โดยเป็นการเลือกค่าก่อนที่จะนำเข้ากระบวนการจัดลำดับด้วยระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการ 3.8

$$\sum_{i=1}^n (SLT_i - TLT_i) \leq \min[ET_i, PT] \quad (3.8)$$

3.2.4.4 ข้อจำกัดในการหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อจัดระยะห่างระหว่างอากาศยาน

นอกจากอากาศยานแต่ละลำจะถูกจัดลำดับจากกันด้วยเกณฑ์ระยะห่างพิจารณาจากกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนจากอากาศยานแล้ว ปัจจัยที่มีผลอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อการจัดระยะห่างระหว่างอากาศยาน คือ ระยะเวลาครอบครองทางวิ่งซึ่งจากการสัมภาษณ์คุณศุภิต เลื่อนนักรบ ผู้จัดการงานควบคุมจราจรทางอากาศ ศูนย์ควบคุมจราจรทางอากาศสุวรรณภูมิ บริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทยพบว่า “ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดการล่าช้า และล่าช้าสะสมของเที่ยวบินขาเข้าที่ทำการบินที่ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีปัจจัยหลักมาจากการที่อากาศยานมีระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งมาก ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของทางขับออกจากทางวิ่ง (Runway Exits) ไม่สอดคล้องกับทางวิ่ง โดยเฉพาะอากาศยานขนาดใหญ่ที่ใช้ระยะในการลงจอดที่มากเนื่องจากความเร็วในการลงจอดที่สูงและแรงเฉื่อย ทำให้ในหลายสถานการณ์อากาศยานขนาดใหญ่จะไม่สามารถชะลอเครื่องได้ทันก่อนพ้นทางขับออกความเร็วสูงสุดท้าย (Rapid Exit Taxiway) และต้องขับต่อไปออกทางออกสุดท้ายซึ่งห่างออกไปอีกกว่า 1,500 เมตร (ภาพที่ 3.3) ซึ่งการที่อากาศยานแต่ละลำมีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาครอบครองทางวิ่งที่นานเป็นผลให้เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศต้อง

จัดระยะห่างระหว่างเครื่องให้มากกว่าเดิม เพื่อเผื่อโอกาสให้อากาศยานลำหน้าสามารถเลี้ยวออกจากทางวิ่งได้ทันก่อนที่อากาศยานลำหลังจะมาถึง และได้รับคำสั่งอนุญาตให้ลงจอดได้ทันการณ์ เพราะหากเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศไม่สามารถให้คำสั่งอนุญาตลงจอดได้ทัน อากาศยานลำหลังจะทำการยกเลิกการลงจอด (Missed Approach) แล้วบินไปกระทำกระบวนการเข้าสู่สนามบินใหม่ ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่กระทบต่อการจัดการจราจรทางอากาศอย่างมาก และรวมถึงกระทบต่อความจุของทางวิ่งด้วย ทั้งนี้เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศของบริษัทวิทยุการบิน ระบบการติดตามอากาศยาน และระบบการนำร่องอากาศยานมีความพร้อมที่จะสามารถลดระยะต่อระยะเคี้ยวของอากาศยานลงได้ต่ำกว่านี้ แต่ระยะเวลาในการครอบครองทางวิ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ไม่สามารถลดขนาดของระยะห่างดังกล่าวได้”



ภาพที่ 3.3 โครงร่างพื้นที่เขตการบินท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ
แหล่งที่มา: Civil Aviation Authority of Thailand, 2018.

จากข้อจำกัดดังกล่าว เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศจำเป็นต้องเลือกค่าที่สูงกว่าระหว่างระยะห่างขั้นต่ำระหว่างอากาศยานพิจารณาจากกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน (Wake Turbulence Separation : S_{ij}) ระหว่างอากาศยาน i และอากาศยาน j กับระยะเวลาครอบครองทางวิ่งของอากาศยาน i (Runway Occupancy Time : ROT_i) ซึ่ง Tamas Kolos-Lakatos (2011) ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของระยะห่างขั้นต่ำของอากาศยานพิจารณาจากกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนจากอากาศยาน ความเร็วของอากาศยานในช่วงเข้าหาสนามบิน (Approach Speed) และความยาวของระยะขาสสุดท้ายเข้าสู่สนามบิน (Final Approach Length) ไว้ดังสมการ 3.9

$$T_{ij} = \begin{cases} \max \left[\frac{r+S_{ij}}{v_j} - \frac{r}{v_i}, ROT_i \right] & \text{กรณี } v_i > v_j \\ \max \left[\frac{S_{ij}}{v_j}, ROT_i \right] & \text{กรณี } v_i \leq v_j \end{cases} \quad (3.9)$$

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบความสามารถในการจัดลำดับของอากาศยานโดยการเทียบกันระหว่างการจัดลำดับตามระบบมาถึงก่อนให้บริการก่อน (First Come First Serve : FCFS) ระบบการจัดลำดับโดยระบบจัดลำดับเข้าสู่ทางวิ่งท่าอากาศยานของบริษัทวิทยุการบิน คือ Arrival Manager หรือ AMAN และการจัดลำดับโดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพัฒนา (Optimal) เพื่อพิสูจน์ความสามารถในการจัดลำดับเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นผ่านโปรแกรม Solving Method ด้วยวิธี Simplex LP

เงื่อนไขที่นำมาใช้พิจารณาประสิทธิภาพในการจัดลำดับอากาศยานเข้าหน้านั้น คือ ความสามารถในการจัดลำดับอากาศยานเข้าที่สามารรถลดค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดจากลงจอดล่าช้าของอากาศยาน ซึ่งประกอบด้วย ค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน (Airport Opportunity Cost) ค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน (Excess Fuel Cost) และค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน (Excess Carbon Tax) โดยผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลชุดเที่ยวบินที่มีโอกาสจะเกิดความล่าช้าในการทำการบินเข้าสู่สนามบิน ซึ่งพิจารณาจากความหนาแน่นของจำนวนเที่ยวบินในระยะเวลาอันจำกัด ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ โดยได้พิจารณาเลือกชุดเที่ยวบินที่เข้าข่ายดังกล่าวจำนวน 6 ชุดเที่ยวบิน ชุดเที่ยวบินละ 33 เที่ยวบิน รวม 198 เที่ยวบินเพื่อนำมาทดสอบ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย

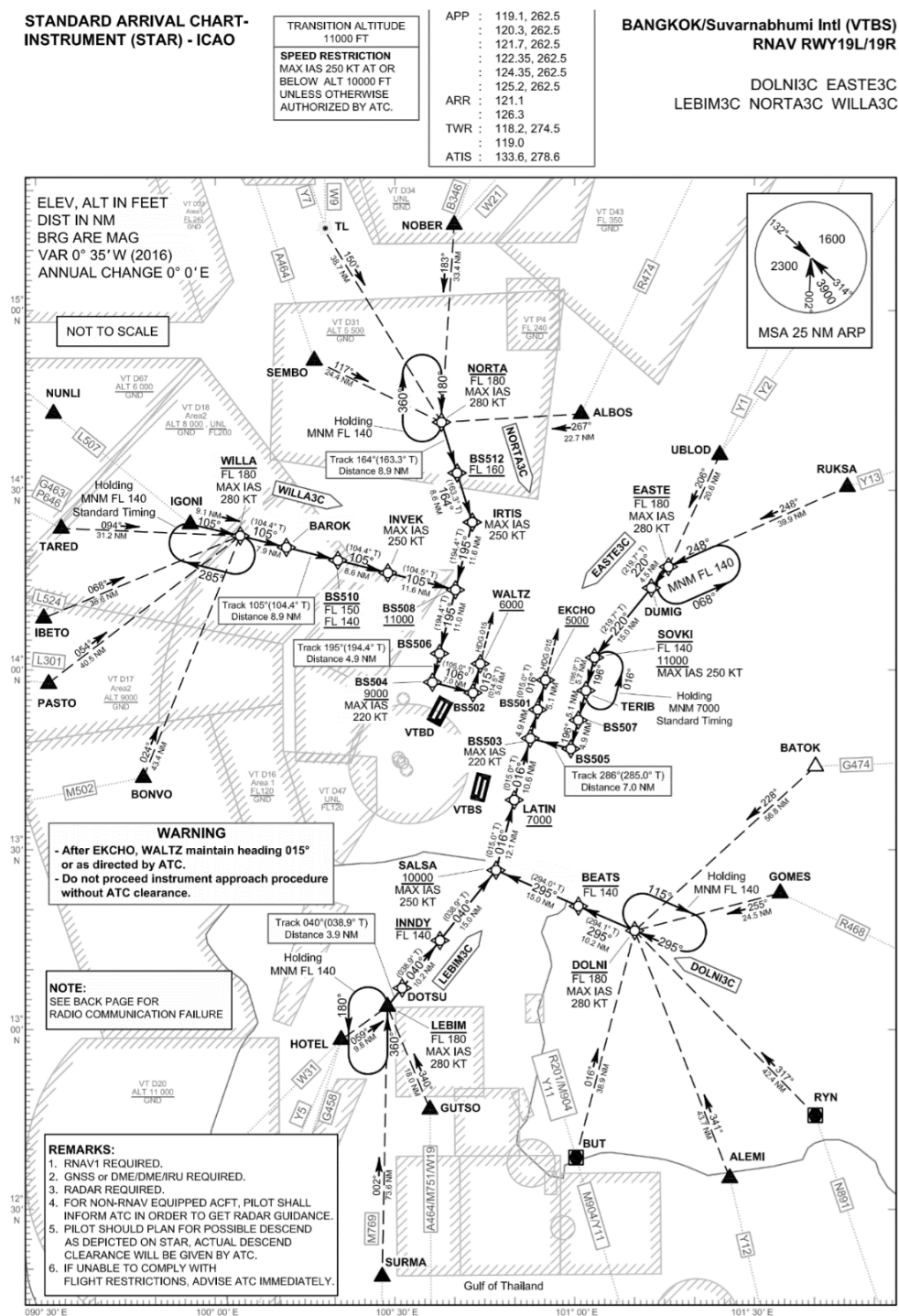
อย่างไรก็ตามปัญหาในรูปแบบ TSP นั้น ใช้ทรัพยากรของโปรแกรมในการแก้ปัญหาไม่ สามารถคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ 33 เที่ยวบินได้ในเวลาจำกัด ผู้วิจัยจึงได้ทำการแบ่งชุด เที่ยวบินออกเป็นชุดเที่ยวบินย่อยจำนวน 8 ชุดเที่ยวบินย่อย โดยลำดับสุดท้ายของแต่ละเที่ยวบินย่อย จะถูกพิจารณาเป็นลำดับแรกในชุดเที่ยวบินย่อยถัดไป ในแต่ละชุดเที่ยวบินย่อยจึงประกอบด้วย เที่ยวบินที่มีลำดับดังต่อไปนี้ 1-5, 5-9, 9-13,..., 29-33 ตามลำดับ

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบการเข้าหาสนามบินของอากาศยาน โดยอากาศยานแต่ละลำ จะต้องบินผ่านที่จุดแรกเข้า (Entry Point) ตามรูปแบบการเข้าสู่สนามบินด้วยการบินด้วยเครื่องวัด ประกอบการบินซึ่งอ้างอิงจาก Standard Arrival Chart – Instrument (STAR) – ICAO ซึ่งเป็น เอกสารเผยแพร่สำหรับผู้ทำการบินโดยสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย ดังแสดงใน ภาพที่ 3.4 และระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอากาศยานจาก Entry Point มายังจุดเริ่มต้นของทางวิ่ง (Runway Threshold) นั้นสามารถประมาณการตามค่าอ้างอิงที่ใช้ในระบบ Arrival Manager (AMAN) สำหรับทางวิ่ง 19R ซึ่งใช้ในการวิจัยครั้งนี้ซึ่งมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.3

อย่างไรก็ดีในการวิจัยครั้งนี้ได้มีการดัดวิธีปฏิบัติในการเปลี่ยนเส้นทางบินของอากาศยานโดย เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศซึ่งเรียกว่า Vectoring ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติหนึ่งของเจ้าหน้าที่ ควบคุมการจราจรทางอากาศที่นำมาใช้ในการจัดการจราจรโดยใช้ระบบติดตามอากาศยาน (Surveillance System) ดังนั้นเวลาและลำดับที่อากาศยานลงจอดจริงจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในการ ทดสอบครั้งนี้ เนื่องจากผลของการ Vectoring นั้นมีความไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงไปตามอุปนิสัยและ ความชำนาญของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศ และมีผลทำให้ระยะทางรวมถึงเวลาในการ ทำการบินนั้นเกิดความไม่แน่นอน ไม่สามารถควบคุมได้ ในการทดลองครั้งนี้จึงได้ควบคุมระยะเวลา ในการเข้าสู่ทางวิ่งของทำอากาศยานให้เป็นไปตามลำดับและจะต้องมีระยะต่อขั้นต่ำ (Minimum Longitudinal Separation) เป็นไปตามที่องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศกำหนดเท่านั้น

ตารางที่ 3.3 ระยะเวลาจากจุดแรกเข้าถึงจุดเริ่มต้นทางวิ่ง

จุดแรกเข้า	ระยะเวลา (นาที)
EASTE	19
NORTA	17
WILLA	18
LEBIM	17
DOLNI	17



ภาพที่ 3.4 รูปแบบการเข้าสู่สนามบินโดยวิธีปฏิบัติแบบใช้เครื่องวัดประกอบการบิน
แหล่งที่มา: Civil Aviation Authority of Thailand, 2018.

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ความสามารถในการจัดลำดับอากาศยานขาเข้าที่สามารถบรรลุเป้าประสงค์ต่างๆ ที่เกิดจากการลงจอดล่าช้าของอากาศยานซึ่งประกอบด้วย ค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน (Airport Opportunity Cost) ค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน (Excess Fuel Cost) และค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน (Excess Carbon Tax) ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้เป็นข้อมูลเที่ยวบินขาเข้าท่าอากาศยานสุวรรณภูมิในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2560 โดยคัดเลือกตัวอย่างชุดเที่ยวบินที่มีโอกาสพบความล่าช้าในชุดเที่ยวบินซึ่งพิจารณาจากปริมาณเที่ยวบินเทียบกับเวลาคาดการณ์มาถึง ในหนึ่งชุดเที่ยวบินจะประกอบด้วยเที่ยวบินจำนวน 33 เที่ยวบิน ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็นชุดเที่ยวบินย่อยตั้งชุดเที่ยวบินย่อยที่ 1 – 8 เพื่อให้โปรแกรม Excel Solver สามารถแก้ปัญหาได้ในเวลาจำกัด และผู้วิจัยได้ทำการทดสอบชุดเที่ยวบินกับค่าถ่วงน้ำหนักต่างๆ ดังนี้

ชุดเที่ยวบินที่ 1 และ 2 ใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_o = 0.1$, $w_f = 0.3$, $w_t = 0.6$ เพื่อมุ่งเน้นเป้าประสงค์ด้านการลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน

ชุดเที่ยวบินที่ 3 และ 4 ใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_o = 0.2$, $w_f = 0.4$, $w_t = 0.4$ เพื่อมุ่งเน้นเป้าประสงค์ที่มีความสมดุลกัน

ชุดเที่ยวบินที่ 3 และ 4 ใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_o = 0.3$, $w_f = 0.3$, $w_t = 0.6$ เพื่อมุ่งเน้นเป้าประสงค์ด้านการลดค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน

ทั้งนี้เหตุที่ค่าถ่วงน้ำหนักของค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน (w_o) มีค่าต่ำกว่าค่าถ่วงน้ำหนักอื่นอย่างมีนัยยะสำคัญเนื่องจากอัตรารายได้ของท่าอากาศยานจากการเก็บค่าบริการขึ้นลงสนามบิน (R_o) มีค่าสูงกว่าอัตราเชื้อเพลิง (R_f) และอัตราค่าภาษีคาร์บอน (R_t) มาก จึงมีความจำเป็นต้องปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ระบบสามารถจัดลำดับอากาศยานเพื่อบรรลุเป้าหมายต่างๆ ได้ ซึ่งการทดสอบการจัดลำดับเทียบกับระบบ FCFS และ AMAN ปรากฏผลดังนี้

4.1.1 ผลการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเป้าประสงค์ด้านการค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน และค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน

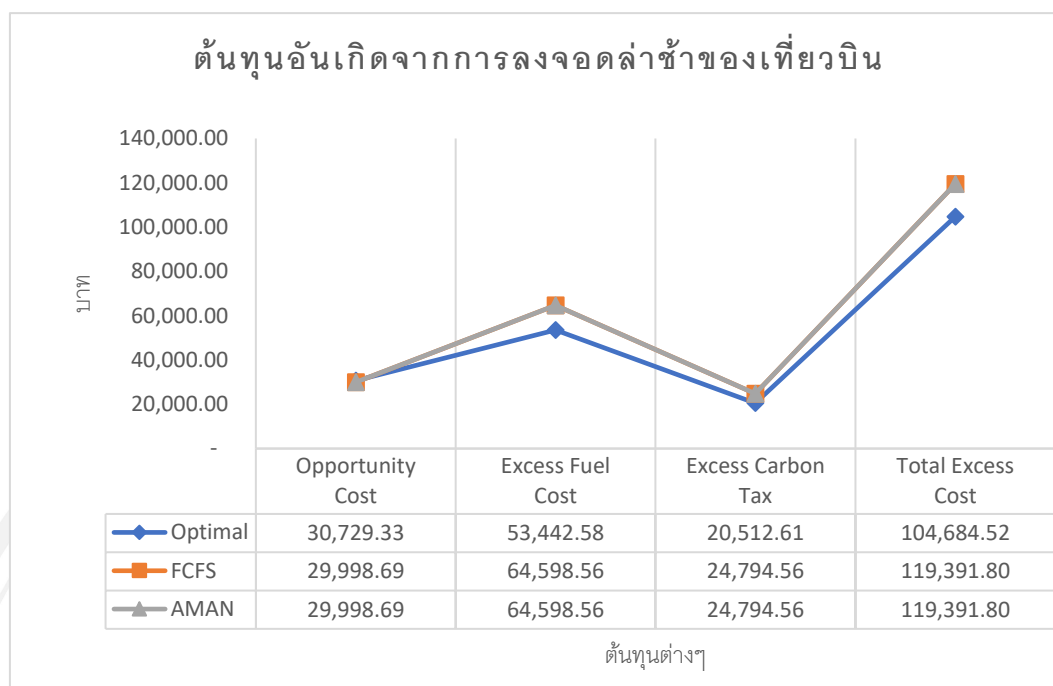
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบชุดเที่ยวบินที่ 1 และ 2 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก $w_o = 0.1$, $w_f = 0.3$, $w_t = 0.6$ เพื่อมุ่งเน้นเป้าประสงค์ด้านการลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน โดยชุดเที่ยวบินที่ 1 เป็นชุดเที่ยวบินจากการทำการบินของอากาศยานขาเข้า ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2560 มีเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินในชุดนี้อยู่ระหว่างเวลา 07:25 – 08:37 เวลาสากล หรือคิดเป็น 33 เที่ยวบินในช่วงเวลา 72 นาที ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะและการจัดการลำดับการลงจอดดังแสดงใน ตารางที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 1

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์มาถึง	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
CSH883	B738	M	07:25	1	1	1
BKP930	A319	M	07:26	2	2	2
THA641	A333	H	07:28	3	3	3
HVN615	A321	M	07:28	4	4	4
DLH772	B744	H	07:33	5	5	5
THD571	A320	M	07:33	6	6	9
CPA653	A333	H	07:33	7	7	7
THA601	B744	H	07:34	8	8	6
PIC661	A320	M	07:34	9	9	8
ELY081	B772	H	07:36	10	10	10
THD310	A320	M	07:46	11	11	11
THA645	B773	H	07:47	12	12	12
CES741	B738	M	07:47	13	13	13
TGW604	A320	M	07:51	14	14	14
SBI761	A320	M	07:56	15	15	15
TVJ301	A320	M	08:00	16	16	16
BKP948	A319	M	08:03	17	17	17
AUA25	B772	H	08:06	18	18	19

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์มาถึง	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
THA623	B77W	H	08:06	19	19	18
BKP134	A319	M	08:11	20	20	20
CXA833	B738	M	08:13	21	21	21
BKP992	AT76	M	08:16	22	22	22
THA208	A333	H	08:17	23	23	23
THA476	B744	H	08:18	24	24	24
THA917	A359	H	08:18	25	25	25
THA671	B744	H	08:20	26	26	26
EVA068	B77W	H	08:21	27	27	27
THD045	A320	M	08:26	28	28	28
THA484	B788	H	08:27	29	29	29
THA621	B772	H	08:28	30	30	30
CPA712	A333	H	08:30	31	31	31
CSH833	B738	M	08:36	32	32	32
CXA7559	B738	M	08:37	33	33	33

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าชุดเที่ยวบินที่ 1 ประกอบด้วยหลายเที่ยวบินที่มีเวลาคาดการณ์มาถึงในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน และมีหลายเที่ยวบินที่มีเวลาคาดการณ์มาถึง ณ นาที่เดียวกัน คือ ในนาที่ที่ 07:28, 07:33, 07:34, 07:47, 08:06 และ 08:18 :ซึ่งระบบ AMAN ได้เลือกการจัดลำดับอากาศยานลงจอดเช่นเดียวกับระบบ FCFS ในขณะที่ระบบ Optimal มีการเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินขาเข้าจำนวน 5 เที่ยวบินด้วยกัน โดยข้อสังเกตคือในลำดับเที่ยวบินที่ 18 - 19 ที่มีเวลาคาดการณ์มาถึง ณ นาที่เดียวกัน และระบบ Optimal ได้มีการเปลี่ยนแปลงลำดับการลงจอด เพราะอากาศยานทั้ง 2 เที่ยวบินมีขนาดเท่ากัน และแบบเครื่องที่คล้ายกันมาก คือ B777 ต่างกันเพียงรุ่นย่อยเท่านั้น คือลำดับเที่ยวบินที่ 18 เป็นรุ่น B772 ซึ่งเป็นรุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า รุ่น B77W ที่มีการขยายคววาลำตัวออกไปและมีอัตราเผาผลาญเชื้อเพลิงที่สูงกว่า ซึ่งผลการลดค่าใช้จ่ายนั้นปรากฏดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการลงจอดลำช้าของชุดเที่ยวบินที่ 1

จากภาพที่ 4.1 ได้แสดงให้เห็นว่า การจัดลำดับแบบ Optimal ที่มีการเปลี่ยนแปลงคู่ลำดับของเที่ยวบินนั้น สามารถเลือกเปลี่ยนคู่ลำดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากการลงจอดลำช้าได้ดีที่สุดจากทั้ง 3 ระบบ แม้ระบบ Optimal มีค่าเสียโอกาสจากการลงจอดลำช้าของท่าอากาศยานสูงที่สุด เป็นเหตุให้มีความจุทางวิ่งที่ต่ำที่สุดด้วยที่ 27.13 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ขณะที่ระบบ FCFS และ AMAN ที่มีการจัดลำดับเหมือนกันนั้นมีความจุทางวิ่งอยู่ที่ 27.32 เที่ยวบินต่อชั่วโมง แต่ระบบ Optimal มีผลการจัดลำดับที่สามารถลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่าภาษีมลพิษคาร์บอนส่วนเกินได้ดีกว่าอีก 2 ระบบ จึงทำให้ผลดำเนินการโดยรวมนั้น ระบบ Optimal สามารถลดที่เกิดจากการลงจอดลำช้าได้ดีกว่าระบบ FCFS และ AMAN อยู่ 14,707.28 บาท

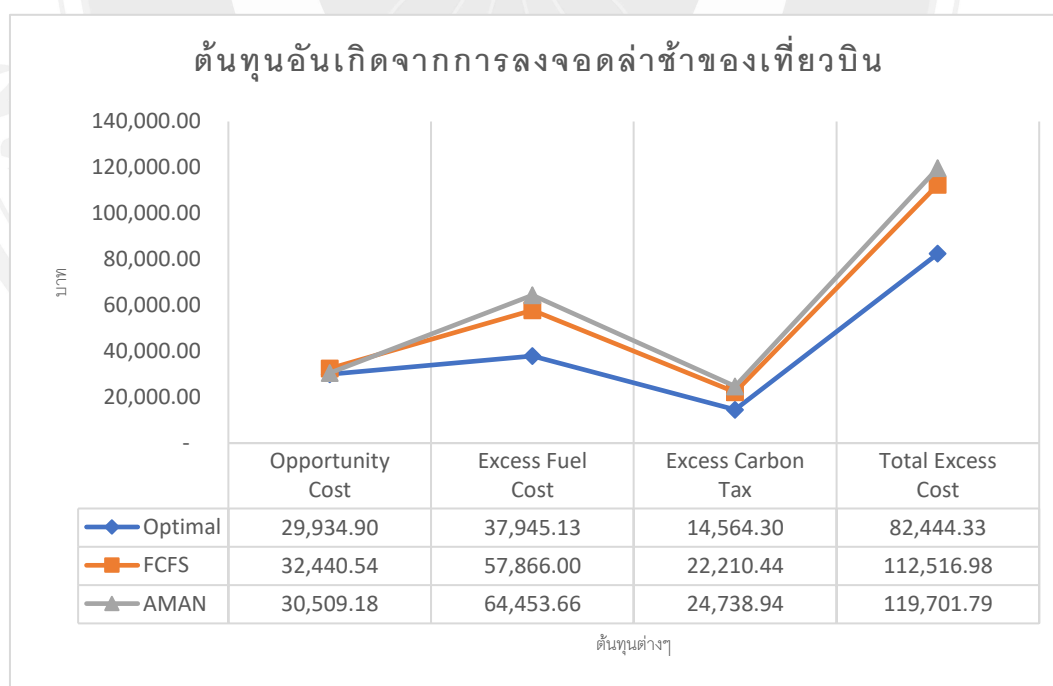
ชุดเที่ยวบินที่ 2 ที่นำมาทดสอบการจัดลำดับด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์และใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเช่นเดียวกับชุดเที่ยวบินที่ 1 คือชุดเที่ยวบินจากการทำการบินของท่าอากาศยานขาเข้า ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อวันที่ 3 พฤศจิกายน 2560 ใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก 0.1 : 0.3 : 0.6 มีเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินในชุดนี้อยู่ระหว่างเวลา 07:25 – 08:37 เวลาสากล หรือคิดเป็น 33 เที่ยวบินในช่วงเวลา 72 นาที ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะและการจัดการลำดับการลงจอดดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 2

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์ มาถึง	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
TVJ103	A320	M	06:50	1	1	1
MAS788	B738	M	06:52	2	2	2
VJC905	A320	M	06:54	3	3	3
FIN143	A333	H	06:56	4	4	4
THA416	B77W	H	06:58	5	5	5
CPA653	A333	H	06:59	6	7	6
BKP124	A319	M	07:01	7	6	7
BKP906	A319	M	07:02	8	10	8
BKP306	AT76	M	07:03	9	8	9
BKP942	AT76	M	07:03	10	9	12
BBC088	B738	M	07:05	11	11	10
IGO075	A320	M	07:06	12	12	11
THD025	A320	M	07:10	13	13	13
TGW604	A320	M	07:18	14	14	14
DLH772	A388	S	07:20	15	15	15
CSN3081	B738	M	07:22	16	17	17
EVA076	B77W	H	07:22	17	16	16
THD133	A320	M	07:24	18	18	21
THA641	A333	H	07:25	19	19	18
PIC661	A320	M	07:26	20	20	20
SIA974	A333	H	07:27	21	21	19
BKP930	A319	M	07:31	22	22	22
JAL737	B788	H	07:33	23	23	23
THA601	B744	H	07:37	24	24	24
THD571	A320	M	07:38	25	25	25
THY68	B77W	H	07:38	26	26	26

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
THA685	A333	H	07:40	27	27	27
THD161	A320	M	07:41	28	28	29
ELY081	B744	H	07:43	29	29	28
THA645	B773	H	07:50	30	30	30
THA683	B77W	H	07:52	31	31	31
BKP948	A319	M	07:56	32	32	32
THA623	B77W	H	07:57	33	33	33

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าชุดเที่ยวบินที่ 2 มีหลายเที่ยวบินที่มีเวลาคาดการณ์มาถึงที่ใกล้เคียงกัน คล้ายกับชุดเที่ยวบินที่ 1 โดยเฉพาะในนาทิตี่ 07:03, 07:22 และ 07:38 ซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่อาจก่อให้เกิดการล่าช้าได้ชัดเจนที่สุด โดยระบบ AMAN มีการเปลี่ยนลำดับการลงจอดของเที่ยวบินถึง 7 ลำดับ คือในลำดับที่ 6,7,8,9,10,16 และ 17 หรือคิดเป็นร้อยละ 21.21 ขณะที่แบบ Optimal มีการเปลี่ยนลำดับการลงจอดที่มากกว่า คือ 10 ลำดับด้วยกัน คือในลำดับที่ 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 21, 28 และ 29 คิดเป็นร้อยละ 30.30 ซึ่งมีผลลัพธ์ปรากฏดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 2

จากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ผลของการจัดลำดับในชุดเที่ยวบินที่ 2 นี้ ระบบ Optimal ยังคงเป็นระบบที่สามารถลดค่าใช้จ่ายจากการลงจอดล่าช้าของเที่ยวบินได้ดีที่สุด โดยผลลัพธ์โดยทั่วไปคล้ายคลึงกับในชุดเที่ยวบินที่ 1 แต่ในชุดเที่ยวบินที่ 2 นี้ ระบบ Optimal สามารถลดค่าใช้จ่ายทุกประเภทได้ต่ำที่สุด โดยมีค่าความจุทางวิ่งอยู่ที่ 27.34 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ในขณะที่ระบบ AMAN นั้นมีผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าระบบ FCFS เล็กน้อย มีความจุทางวิ่งที่ 27.19 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ในขณะที่ระบบ FCFS นั้นสามารถสร้างความจุทางวิ่งได้ 26.71 เที่ยวบินต่อชั่วโมง โดยเป้าหมายที่ระบบ Optimal ทำได้ดีกว่าระบบอื่นๆ อย่างชัดเจนคือเป้าหมายด้านการลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน ขณะที่ค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานนั้นไม่แตกต่างกันมากนักจึงเป็นผลให้ระบบ Optimal สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ต่ำกว่าระบบอื่นๆ อย่างมีนัยยะสำคัญ โดยสามารถลดได้ต่ำกว่าระบบ AMAN 37,257.46 บาท และลดได้ต่ำกว่าระบบ FCFS 30,072.65 บาท

โดยสรุปแล้วเมื่อทำการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อบ่งเน้นเป้าประสงค์ด้านการลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน พบว่าระบบ Optimal สามารถสร้างลำดับการลงจอดของเที่ยวบินที่สามารถให้ผลลัพธ์ในการลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ดีกว่า โดยเฉพาะในส่วนของการลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน แม้ในชุดเที่ยวบินที่ 1 ระบบ Optimal จะมีค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานสูงกว่าเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนลำดับที่สำคัญของระบบ Optimal คือ จะเปลี่ยนเฉพาะลำดับที่มีเวลาคาดการณ์มาถึงใกล้เคียงกัน โดยจะให้อากาศยานที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือมีอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงสูงกว่าได้เป็นลำดับลงก่อนหน้า ซึ่งแตกต่างจากการจัดลำดับของระบบ AMAN ที่จัดลำดับตามความพร้อมของหลุมจอด ซึ่งหากพิจารณาในภาคอากาศแล้วการจัดลำดับดังกล่าวนำมาซึ่งค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นของผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้อง การเปลี่ยนลำดับลงจอดเพียงเล็กน้อยโดยระบบ Optimal จึงสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้ นอกเหนือจากความคล่องตัวในการปฏิบัติงานภาคพื้นเพียงอย่างเดียว

4.1.2 ผลการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเป้าประสงค์ที่มีความสมดุลกัน

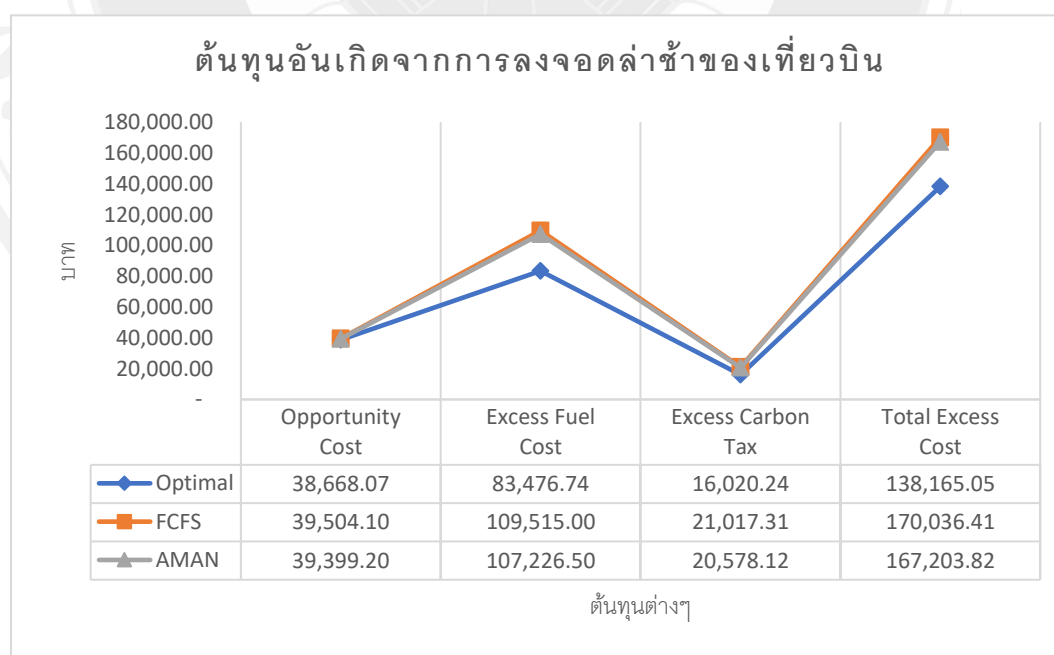
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบชุดเที่ยวบินที่ 3 และ 4 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก $w_o = 0.2$, $w_f = 0.4$, $w_c = 0.4$ เพื่อบ่งเน้นเป้าประสงค์ที่มีความสมดุลกัน โดยชุดเที่ยวบินที่ 3 เป็นชุดเที่ยวบินจากการทำการบินของอากาศยานขาเข้า ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2560 มีเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินในชุดนี้อยู่ระหว่างเวลา 08:59 – 10:01 เวลาสากล หรือคิดเป็น 33 เที่ยวบินในช่วงเวลา 62 นาที ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะและการจัดการลำดับการลงจอดแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 3

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์ มาถึง	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
JAL31	B772	H	08:59	1	1	1
BKP136	AT76	M	09:02	2	2	2
BKP210	AT76	M	09:06	3	3	3
MAS782	B738	M	09:09	4	4	4
THA434	B788	H	09:10	5	5	5
CXA833	B738	M	09:10	6	6	6
BKP208	AT76	M	09:12	7	7	7
THD169	A320	M	09:16	8	8	8
BKP144	A319	M	09:16	9	9	9
CPA751	A333	H	09:18	10	10	10
THD428	A320	M	09:18	11	11	11
BKP710	A320	M	09:21	12	13	13
BKP274	A320	M	09:22	13	12	12
GIA868	B738	M	09:29	14	14	14
BKP146	A319	M	09:30	15	15	15
THA621	B772	H	09:31	16	16	16
THD302	A320	M	09:33	17	17	17
THA111	A333	H	09:35	18	18	18
BKP934	A320	M	09:36	19	20	21
THA613	A333	H	09:37	20	19	19
THA643	B77W	H	09:38	21	22	20
FDX6091	B763	H	09:38	22	21	24
QFA23	A332	H	09:39	23	23	22
BTN700	A319	M	09:41	24	24	25
CKK288	B772	H	09:42	25	25	23
CAL835	A333	H	09:42	26	26	26

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
CQH8579	A320	M	09:44	27	27	27
BKP914	AT76	M	09:50	28	28	28
THA324	B772	H	09:53	29	29	29
CQH8517	A320	M	09:53	30	30	32
THA669	B77W	H	09:55	31	31	30
BKP268	A320	M	09:56	32	32	31
THA927	A359	H	10:01	33	33	33

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าชุดเที่ยวบินที่ 3 มีเที่ยวบินที่มีเวลาคาดการณ์ใกล้เคียงกันจำนวนมาก โดยเฉพาะในนาที่ที่ 09:10, 09:16, 09:18, 09:38, 09:42, 09:53 คล้ายกับชุดเที่ยวบินที่ 1 และ 2 แต่ในชุดเที่ยวบินที่ 3 มีความวิกฤติกว่าเนื่องจากชุดเที่ยวบินนี้มีเวลาคาดการณ์ของลำแรกและลำสุดท้ายห่างกันเพียง 62 นาที โดยระบบ AMAN มีการเปลี่ยนลำดับการลงจอดจำนวน 6 ลำดับ คือในลำดับที่ 12, 13, 19, 20, 21 และ 22 คิดเป็นร้อยละ 18.18 ในขณะที่แบบ Optimal นั้นมีการเปลี่ยนลำดับการลงจอด มากถึง 12 ลำดับด้วยกัน คือในลำดับที่ 12, 13, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 30, 31 และ 32 คิดเป็นร้อยละ 24.24 ซึ่งปรากฏผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แผนภูมิแสดงค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 3

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า การจัดลำดับแบบ Optimal มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ โดยในชุดเที่ยวบินที่ 3 นี้ ระบบ Optimal นั้นมีผลลัพธ์ในการดำเนินการดีที่สุดในทุกด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและต้นทุนภาษีคาร์บอนส่วนเกินนั้น สามารถลดได้มากกว่าระบบอื่นๆ อย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้ระบบ Optimal มีค่าความจุทางวิ่งที่ดีที่สุดที่ 30.35 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ขณะที่ระบบ AMAN มีความจุทางวิ่ง 30.24 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ตามด้วยระบบ FCFS ที่มีความจุทางวิ่งน้อยกว่าเล็กน้อยที่ 30.22 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ทั้งนี้ระบบ Optimal สามารถลดต้นทุนโดยรวมได้ต่ำกว่าระบบ AMAN 29,038.77 บาท และต่ำกว่าระบบ FCFS 31,871.37 บาท

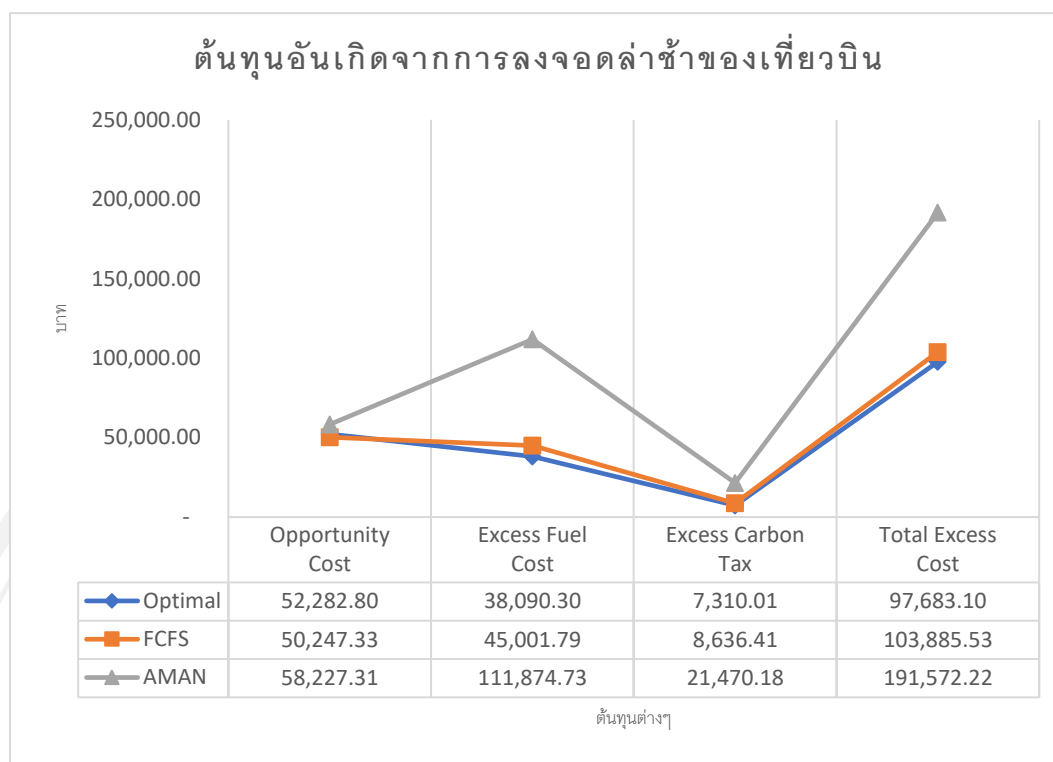
ชุดเที่ยวบินที่ 4 เป็นชุดเที่ยวบินที่ได้รับการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดียวกันกับชุดเที่ยวบินที่ 3 ซึ่งเป็นชุดเที่ยวบินของอากาศยานขาเข้า ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2560 มีเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินในชุดนี้อยู่ระหว่างเวลา 13:50 – 15:00 เวลาสากล หรือคิดเป็น 33 เที่ยวบินในช่วงเวลา 70 นาที ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะและการจัดการลำดับการลงจอดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 4

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์ มาถึง	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
THA466	A359	H	13:50	1	1	1
VJC805	A320	M	13:52	2	2	2
THA639	A333	H	13:54	3	3	3
THA117	B773	H	13:55	4	4	4
THA218	A333	H	13:58	5	5	5
AMU882	A321	M	13:59	6	7	7
THA250	A333	H	14:00	7	6	6
ESR511	B738	M	14:04	8	10	8
BKP704	A320	M	14:05	9	8	9
THD284	A320	M	14:06	10	9	12
JNA003	B772	H	14:06	11	11	10
KAL651	A388	S	14:08	12	12	11
BKP264	A319	M	14:12	13	13	13

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
THD328	A320	M	14:13	14	14	14
DRK120	A319	M	14:14	15	17	15
BKP278	A320	M	14:19	16	15	16
PAL732	A343	H	14:21	17	16	17
JAI66	B737	M	14:22	18	19	18
BKP806	A319	M	14:27	19	18	19
THA615	B77W	H	14:29	20	20	20
THD029	A320	M	14:30	21	21	21
THA472	B744	H	14:31	22	22	22
THD047	A320	M	14:37	23	23	23
ESR921	B738	M	14:38	24	24	24
CSN361	B738	M	14:39	25	25	25
THA673	A388	S	14:42	26	27	26
THD591	A320	M	14:45	27	26	27
CSH853	B738	M	14:46	28	30	28
BKP236	A320	M	14:50	29	28	29
THA585	A333	H	14:52	30	29	30
CSN605	A320	M	14:56	31	31	31
THA222	B744	H	14:58	32	32	32
THA565	B772	H	15:00	33	33	33

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าชุดเที่ยวบินที่ 4 มีเที่ยวบินที่มีเวลาคาดการณ์ใกล้เคียงกันไม่มากนัก มีเพียงเที่ยวบินคู่เดียวที่มีเวลาคาดการณ์มาถึงพร้อมกันคือในนาทิตี่ 14:06 โดยการจ้ดลำดับเที่ยวบินด้วยระบบ AMAN มีการเปลี่ยนแปลงลำดับการลงจอดจำนวนมาก โดยมีมากถึง 15 ลำดับด้วยกัน คือในลำดับที่ 6, 7, 8, 9, 10, 15, 16, 17, 18, 19, 26, 27, 28, 29 และ 30 หรือคิดเป็นร้อยละ 45.45 ในขณะที่ระบบ Optimal กลับมีการเปลี่ยนแปลงลำดับเที่ยวบินเพียง 5 ลำดับ คือในลำดับที่ 6, 7, 10, 11 และ 12 คิดเป็นร้อยละ 15.15 ซึ่งผลลัพธ์จากการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 4 นี้มีผลดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดลำช้าของชุดเที่ยวบินที่ 4

จากภาพที่ 4.4 พบว่าต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดลำช้าของระบบ AMAN นั้นมีค่าสูงสุด และสูงกว่าระบบอื่นๆ อย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากชุดเที่ยวบินที่ 4 นี้ ลำดับของเที่ยวบินมีการเรียงลำดับที่ค่อนข้างดีอยู่แล้ว การเปลี่ยนแปลงที่มากเกินไปจึงทำให้ระบบ AMAN เกิดต้นทุนส่วนเกินที่มากเกินไป โดยในชุดเที่ยวบินที่ 4 นี้ ระบบ AMAN มีต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดลำช้าสูงถึง 191,572.22 บาท ซึ่งสูงกว่าระบบ Optimal และ FCFS ถึงเกือบเท่าตัว เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่าระบบ AMAN นั้นแม้จะนำเที่ยวบินลงจอดได้ช้ากว่า ทำให้มีต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานมากกว่าระบบอื่น แต่นับได้ว่าแตกต่างกับระบบอื่นๆ ไม่มากนักเมื่อเทียบกับต้นทุนอันค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน และต้นทุนค่าภาษีมลพิษคาร์บอนส่วนเกินซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบอื่นๆ ถึงเกือบ 2 เท่าตัว ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนลำดับการลงจอดที่มากเกินไป ก่อให้เกิดการล่าช้าสะสมจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเผาผลาญเชื้อเพลิงที่ไม่จำเป็นเกิดขึ้น ทั้งนี้ระบบที่ทำได้ดีที่สุดยังคงเป็นระบบ Optimal ที่มีต้นทุนส่วนเกินต่ำที่สุด แต่มีความจุทางวิ่งเป็นอันดับสองรองจากระบบ FCFS ที่ทำได้ 28.63 เที่ยวบินต่อชั่วโมง การจัดลำดับของระบบ Optimal แม้ใช้เวลาในการลงจอดมากขึ้น แต่สามารถลดการเผาผลาญมลพิษส่วนเกิน และการปล่อยมลพิษคาร์บอนส่วนเกินได้ ทั้งนี้ระบบ Optimal มีต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดลำช้าของเที่ยวบินต่ำกว่าระบบ FCFS 6,202.43 บาท และต่ำกว่าระบบ AMAN 93,889.12 บาท

โดยสรุปแล้ว ในการใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_o = 0.2$, $w_f = 0.4$, $w_t = 0.4$ เพื่อมุ่งเน้นเป้าประสงค์ที่มีความสมดุลกัน ระบบ Optimal ยังคงเป็นระบบที่สามารถสร้างผลลัพธ์ในการจัดลำดับลงจอดได้ดีที่สุด โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ต่ำที่สุดจากทั้ง 3 ระบบ โดยทั้ง 2 เที่ยวบินมีข้อแตกต่างกันตรงที่ ในชุดเที่ยวบินที่ 3 นั้น ค่าใช้จ่ายที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินมากที่สุด คือ ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงส่วนเกิน เนื่องจากในชุดเที่ยวบินที่ 3 มีระยะเวลาคาดการณ์มาถึงที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก หรือมีความถี่มากกว่า ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อท่าอากาศยานที่จะมีค่าเสียโอกาสลดลง ขณะที่อากาศยานจะต้องต่อคิวรอลงจอดซึ่งในระหว่างทำการในอากาศจะต้องมีการเผาผลาญเชื้อเพลิงไปด้วย ซึ่งเป็นเหตุให้ในชุดเที่ยวบินที่ 3 นั้น ค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินมีอิทธิพลต่อการจัดลำดับสูงสุด ซึ่งแตกต่างจากในชุดเที่ยวบินที่ 4 ที่มีความถี่ของเที่ยวบินน้อยกว่า การต้องทำการบินในอากาศเพื่อรอลงจอดจึงไม่สูงนัก ค่าใช้จ่ายที่มีอิทธิพลสูงที่สุดจึงกลายเป็นค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน

4.1.3 ผลการทดสอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเป้าประสงค์ด้านการลดค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน

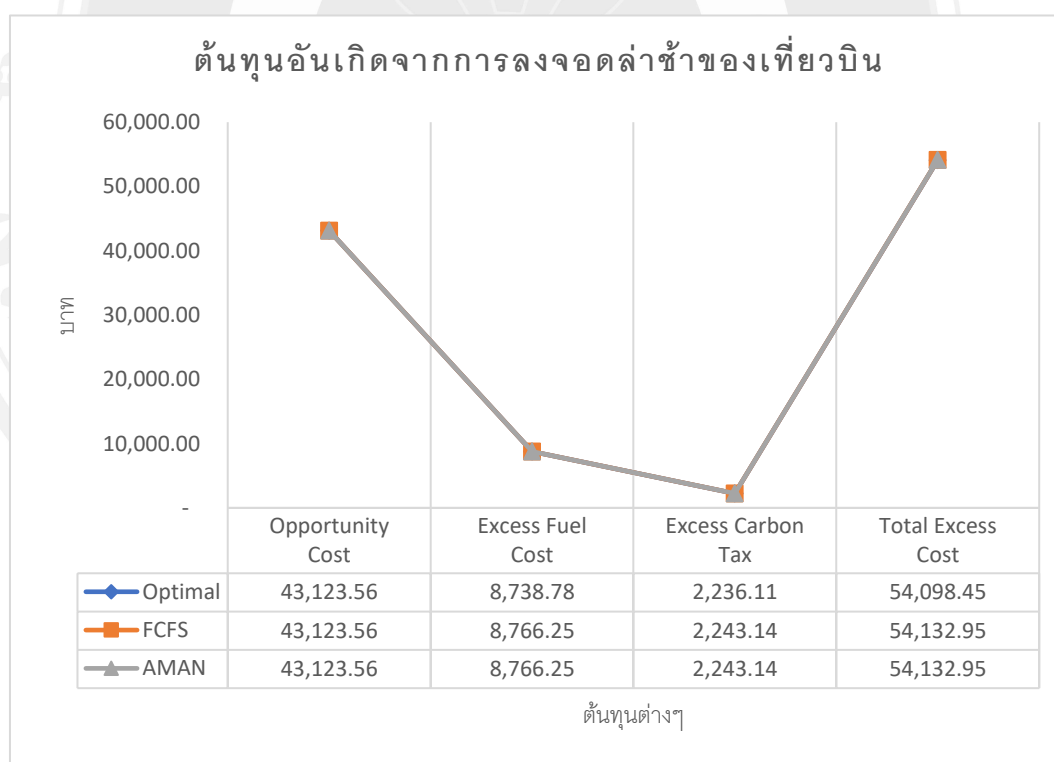
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบชุดเที่ยวบินที่ 5 และ 6 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก $w_o = 0.3$, $w_f = 0.3$, $w_t = 0.4$ เพื่อมุ่งเน้นเป้าประสงค์ด้านการลดค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน โดยชุดเที่ยวบินที่ 5 เป็นชุดเที่ยวบินจากการทำการบินของอากาศยานขาเข้า ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน 2560 มีเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินในชุดนี้อยู่ระหว่างเวลา 09:36 – 10:40 เวลาสากล หรือคิดเป็น 33 เที่ยวบินในช่วงเวลา 64 นาที ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะและการจัดการลำดับการลงจอดดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 5

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์มาถึง	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
THA629	B773	H	09:36	1	1	1
BKP710	A320	M	09:38	2	2	2
THD169	A320	M	09:39	3	3	3
BKP144	A319	M	09:42	4	4	4
THD302	A320	M	09:44	5	5	5
THA613	A333	H	09:45	6	6	6
THA111	A333	H	09:47	7	7	7
BKP146	A319	M	09:50	8	8	8

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
CQH8579	A320	M	09:52	9	9	9
BKP234	A320	M	09:53	10	10	11
CAL839	B738	M	09:53	11	11	10
BKP268	A320	M	09:56	12	12	12
EWG106	A332	H	10:00	13	13	13
THA669	B773	H	10:02	14	14	14
THD254	A320	M	10:04	15	15	15
JAL717	B788	H	10:06	16	16	16
THA322	A333	H	10:08	17	17	17
BKP148	AT76	M	10:10	18	18	18
HVN613	A321	M	10:13	19	19	19
SIA976	A333	H	10:15	20	20	20
CSH855	B738	M	10:17	21	21	21
TGW610	A320	M	10:18	22	22	22
CXA875	B738	M	10:20	23	23	23
PAL736	A343	H	10:22	24	24	24
THD007	A320	M	10:23	25	25	25
CES5083	A320	M	10:24	26	26	26
CSN3057	B738	M	10:28	27	27	27
THD689	A320	M	10:29	28	28	28
BKP708	A320	M	10:33	29	29	29
THA414	B772	H	10:35	30	30	30
THD266	A320	M	10:37	31	31	31
CSN363	A321	M	10:39	32	32	32
NWS2407	A332	H	10:40	33	33	33

จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าชุดเที่ยวบินนี้มีเวลาคาดการณ์มาถึงที่กระจายตัว มีเพียงนาทีเดียวเท่านั้นที่มีเที่ยวบินมาถึงพร้อมกัน คือ ในนาที่ที่ 09:53 จึงเป็นการยากที่จะมีการปรับเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากชุดเที่ยวบินนี้ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่มุ่งเน้นการเพิ่มความจุของทางวิ่ง คือลดค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน ซึ่งมีค่าของการสูญเสียต่อวินาทีสูงมากกว่าค่าใช้จ่ายประเภทอื่นหลายเท่า การเปลี่ยนลำดับการบินเพื่อให้ลดการเผาะลาญจึงอาจไม่เกิดขึ้นมากนัก ทั้งนี้เป็นการทดสอบให้มั่นใจว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้มีความสามารถในการบรรลุวัตถุประสงค์หลักคือการเพิ่มความจุของทางวิ่งได้ดี ซึ่งผลการจัดลำดับนั้นก็เป็นไปตามคาดการณ์ระบบ Optimal มีการเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินเพียง 2 ลำดับ คือในลำดับที่ 10 และ 11 ซึ่งเป็นเที่ยวบินที่มีเวลาคาดการณ์มาถึงเท่ากัน และมีขนาดอากาศยานเท่ากันคือขนาดกลาง ต่างกันเพียงแบบเครื่อง ที่อากาศยานแบบ B738 นั้นมีอัตราเผาะลาญเชื้อเพลิงสูงกว่าอากาศยานแบบ A320 ระบบ Optimal จึงได้ทำการสลับลำดับการลงจอดของเที่ยวบินทั้ง 2 ขณะที่ระบบ AMAN นั้นไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงลำดับเที่ยวบินเลย ผลลัพธ์ของการจัดลำดับเที่ยวบินในลักษณะนี้จึงแทบไม่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดล่าช้าของชุดเที่ยวบินที่ 5

จากภาพที่ 4.5แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 ระบบสามารถจัดลำดับได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะระบบ FCFS และ AMAN ที่มีผลการจัดลำดับเท่าเทียมกันทุกประการเนื่องมาจากระบบ AMAN ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลำดับเที่ยวบิน ขณะที่ระบบ Optimal มีการปรับเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินเล็กน้อยในลำดับที่ 10 และ 11 ซึ่งมีเวลาคาดการณ์มาถึงในนาทีเดียวกัน และมีขนาดอากาศยานเท่ากัน การปรับเปลี่ยนลำดับจึงไม่กระทบต่อค่าสูญเสียโอกาสของท่าอากาศยานและความจุทางวิ่ง โดยทั้ง 3 ระบบมีความจุทางวิ่งเท่ากันที่ 32.00 เที่ยวบินต่อชั่วโมง

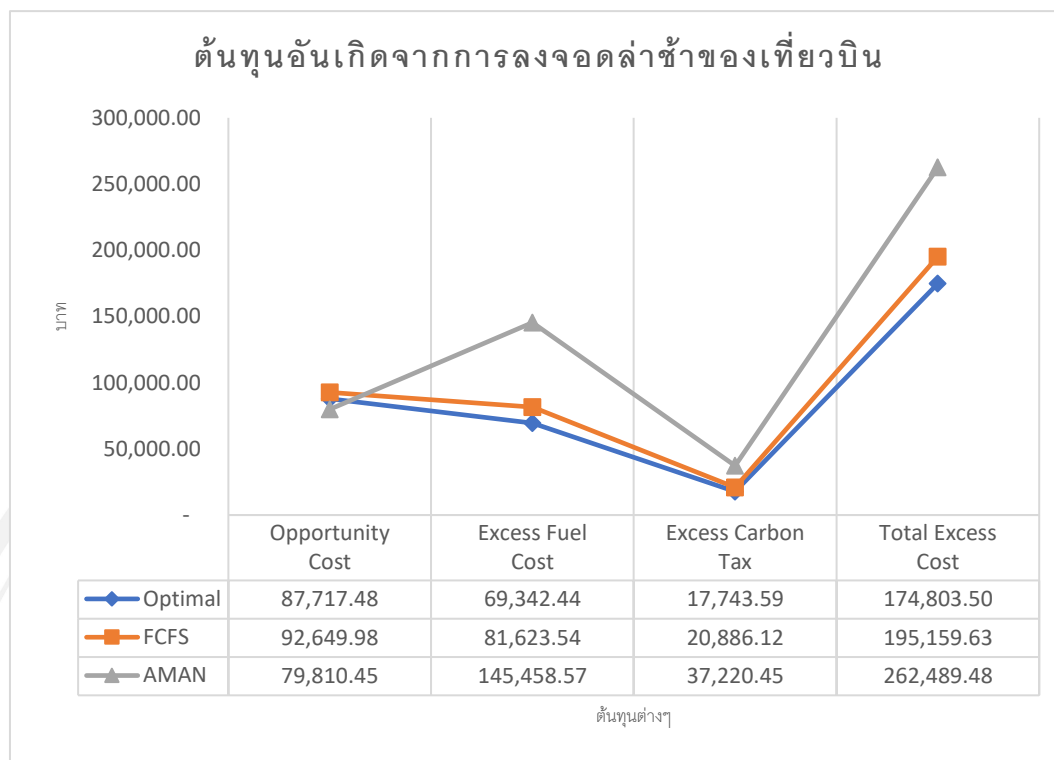
ชุดเที่ยวบินที่ 6 เป็นชุดเที่ยวบินจากการทำการบินของอากาศยานขาเข้า ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2560 มีเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินในชุดนี้อยู่ระหว่างเวลา 13:50 – 15:00 เวลาสากล หรือคิดเป็น 33 เที่ยวบินในช่วงเวลา 70 นาที ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะและการจัดการลำดับการลงจอดดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบินและการจัดลำดับชุดเที่ยวบินที่ 6

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์มาถึง	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
THA304	A333	H	04:53	1	2	1
EVA6077	B744	H	04:55	2	1	2
CSN6099	B738	M	04:56	3	3	3
CSH839	B738	M	04:58	4	5	4
THA242	A333	H	05:00	5	4	5
UAE384	A388	S	05:01	6	6	6
BKP932	A319	M	05:02	7	7	9
PAL730	B77W	H	05:03	8	8	7
ALK404	A333	H	05:03	9	9	8
THD131	A320	M	05:06	10	10	10
THA105	B772	H	05:07	11	11	11
CPA615	B77W	H	05:11	12	13	12
QTR834	B77W	H	05:13	13	12	13
EVA067	B77W	H	05:15	14	14	14
BKP702	A320	M	05:26	15	15	15
RBA513	A320	M	05:28	16	16	16

ข้อมูลจำเพาะเที่ยวบิน			เวลาคาดการณ์	ลำดับลงจอด		
นามเรียกขาน	แบบเครื่อง	ขนาด		FCFS	AMAN	OPTIMAL
SDM5871	B744	H	05:30	17	17	17
THA561	B772	H	05:30	18	19	18
BKP944	A319	M	05:31	19	18	21
CAL831	B738	M	05:32	20	21	19
JSA515	A320	M	05:34	21	20	20
THA204	B744	H	05:36	22	22	22
KAL657	B744	H	05:36	23	24	23
UAE376	B77W	H	05:40	24	23	24
EVA201	B77W	H	05:44	25	25	25
CQH8517	A320	M	05:48	26	26	26
CCA757	B738	M	05:52	27	27	27
MSR960	A333	H	05:52	28	28	28
THD005	A320	M	05:52	29	29	29
THD043	A320	M	05:52	30	30	31
MMA337	B777	H	05:52	31	31	30
CSN8355	B738	M	06:00	32	32	32
BKP262	A320	M	06:01	33	33	33

จากข้อมูลในตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าชุดเที่ยวบินนี้มีหลายเที่ยวบินที่มีเวลาคาดการณ์มาถึงใกล้เคียงกัน หากนับเฉพาะนาทีเดียวกันมีถึง 4 ช่วงเวลา ซึ่งมีจำนวนเที่ยวบินทั้งหมด 11 เที่ยวบินด้วยกัน โดยเฉพาะในนาที่ที่ 05:52 นั้นมีเที่ยวบินที่คาดการณ์ว่าจะมาถึง ณ เวลานั้น ถึง 5 เที่ยวบิน ทั้งนี้ผลการจัดลำดับที่ปรากฏพบว่าระบบ AMAN นั้นมีการเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินจำนวนมากที่สุด คือ 12 ลำดับ คือในลำดับที่ 1, 2, 4, 5, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 23 และ 24 หรือคิดเป็นร้อยละ 36.36 ขณะที่ระบบ Optimal มีการเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินจำนวน 8 เที่ยวบิน ในลำดับที่ 7, 8, 9, 19, 20 และ 21 หรือคิดเป็นร้อยละ 24.24 ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงต้นทุนอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงลำดับอากาศยานลงจอดนั้นปรากฏอยู่ในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 แผนภูมิแสดงต้นทุนอันเกิดจากการลงจอดลำช้าของชุดเที่ยวบินที่ 6

จากข้อมูลในภาพที่ 4.6 พบว่าระบบ Optimal เป็นระบบที่สามารถลดต้นทุนการลงจอดของชุดเที่ยวบินที่ 6 ได้ดีที่สุด ขณะที่ระบบ FCFS และ AMAN นั้นมีผลการลดต้นทุนในลำดับถัดมา อย่างไรก็ตามเมื่อค่าความต่างระหว่างระบบ FCFS กับ AMAN นั้นมีมูลค่าสูงมากถึง 67,329.84 บาท และต่างกับระบบ Optimal ถึง 87,685.98 บาท ซึ่งสูงเป็น 4 เท่าของผลลัพธ์ระหว่างระบบ FCFS และ Optimal ที่มีผลต่างเพียง 20,356.13 บาท เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะระบบ AMAN มีการเปลี่ยนลำดับการลงจอดของเที่ยวบินที่ไม่เหมาะสม ซึ่งก่อให้เกิดความล่าช้ามากขึ้น จึงมีค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินและค่ามลพิษคาร์บอนส่วนเกินจำนวนมาก โดยระบบ AMAN นั้น มีความจุทางวิ่งอยู่ที่ 27.10 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ขณะที่ระบบ Optimal และระบบ FCFS นั้นมีความจุทางวิ่งอยู่ที่ 27.52 และ 28.22 เที่ยวบินต่อชั่วโมงตามลำดับ

โดยสรุปแล้ว ระบบ Optimal ยังคงเป็นระบบที่สร้างผลลัพธ์ที่เกิดจากการจัดลำดับลงจอดของอากาศยานได้ดีที่สุดจากทั้ง 3 ระบบ แม้จะทดสอบกับค่าถ่วงน้ำหนักที่เปลี่ยนไป และทำการทดสอบกับชุดเที่ยวบินที่มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง แม้ค่าใช้จ่ายที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนลำดับของทั้ง 2 ชุดเที่ยวบินจะเป็นค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน แต่ในชุดเที่ยวบินที่ 5 นั้น มีเวลาคาดการณ์มาถึงค่อนข้างกระจายตัว ระบบ Optimal จึงไม่มีการเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินมากนัก และจะทำการเปลี่ยนเที่ยวบินกับลำดับเที่ยวบินที่ก่อให้เกิดประโยชน์เท่านั้น ขณะที่ชุดเที่ยวบินที่ 6 นั้น มี

ลักษณะเวลาคาดการณ์มาถึงที่เกาะกลุ่มกันมากกว่า จึงเอื้อต่อการเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินมากกว่าเช่นกัน แม้ในชุดเที่ยวบินที่ 6 ระบบ Optimal จะมีค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานที่สูงกว่าระบบ AMAN แต่โดยรวมแล้วกลับทำได้ดีกว่าระบบ AMAN อย่างมหาศาล ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าถ่วงน้ำหนักแล้วการที่ระบบ AMAN มีค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินมีค่าสูงในระดับนี้ ย่อมมีเหตุมาจากการล่าช้าสะสมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงลำดับเที่ยวบินที่ไม่มีประสิทธิภาพเมื่อพิจารณาจากมุมมองในภาคอากาศเป็นสำคัญ

4.2 สรุปผลการทดสอบตัวแบบคณิตศาสตร์

จากการทดลองตัวแบบทางคณิตศาสตร์กับชุดเที่ยวบินที่มีความหนาแน่น ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิทั้ง 6 ชุดเที่ยวบินด้วยค่าถ่วงน้ำหนักต่างๆ พบว่า ระบบ Optimal สามารถจัดลำดับออกมาได้ดีที่สุดในทุกชุดเที่ยวบิน ไม่ว่าจะในค่าถ่วงน้ำหนักลักษณะใด ทั้งนี้หากนำข้อมูลทั้ง 6 ชุดเที่ยวบินมารวมกันแล้วแยกพิจารณาตามรายวัตถุประสงค์จะปรากฏผลดำเนินการจะทำให้เห็นผลลัพธ์ของการดำเนินการที่ชัดเจนขึ้นดังต่อไปนี้

4.2.1 สรุปผลการทดสอบด้านการลดต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 ระบบ สามารถจัดลำดับเที่ยวบินลงจอดเพื่อลดค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานได้ใกล้เคียงกัน แม้จากข้อมูลจะพบว่าระบบ AMAN มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการปรับเปลี่ยนลำดับลงจอดในชุดที่ 6 ซึ่งมีผลลัพธ์ที่ชัดเจนกว่าระบบอื่นๆ อย่างชัดเจน แต่จากข้อมูลในผลการทดสอบชุดเที่ยวบินที่ 6 ทำให้ทราบว่า การจัดลำดับในลักษณะดังกล่าวของระบบ AMAN ก่อให้เกิดผลเสียมากกว่าประโยชน์โดยเฉพาะในด้านของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกิน และต้นทุนภาษีคาร์บอนส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล แต่จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่า การจัดลำดับอากาศยานเข้าจอดสามารถเพิ่มความจุทางวิ่งและลดต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานได้จริง โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ของระบบ FCFS ซึ่งไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงลำดับการลงจอดเลย

อย่างไรก็ดีค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานถือเป็นค่าใช้จ่ายที่ยากต่อการควบคุม เนื่องจากขึ้นอยู่กับเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินเป็นสำคัญ ซึ่งหมายถึงความถี่ของการใช้ทางวิ่ง หากในช่วงโม่งทำการบินใดมีเที่ยวบินเข้ามาสู่ท่าอากาศยานในปริมาณที่ไม่สูง ย่อมต้องส่งผลให้ท่าอากาศยานมีค่าเสียโอกาสในปริมาณมาก การเปลี่ยนลำดับลงจอดเพื่อเพิ่มความจุของทางวิ่งหรือลดค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานจะปรากฏผลชัดเจนที่สุดในช่วงโม่งทำการบินที่มีการทำการบินหนาแน่นเท่านั้น

ตารางที่ 4.7 ผลสรุปต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน

ผลสรุปต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน (บาท)			
ชุดเที่ยวบิน	FCFS	AMAN	Optimal
1	29,998.69	29,998.69	30,729.33
2	32,440.54	30,509.18	29,934.90
3	39,504.10	39,399.20	38,668.07
4	39,504.10	39,399.20	38,668.07
5	43,123.56	43,123.56	43,123.56
6	92,649.98	79,810.45	87,717.48
ผลรวม	277,220.96	262,240.28	268,841.40
ค่าเฉลี่ย	46,203.49	43,706.71	44,806.90

4.2.2 สรุปผลการทดสอบด้านการลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า ระบบ Optimal เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการลดค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน ทั้งนี้เนื่องจากการจัดลำดับของระบบ Optimal ได้มีการพิจารณาในเรื่องของอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงของอากาศยานร่วมด้วย ซึ่งจากที่ได้ตั้งข้อสังเกตไปแต่ต้นว่า อากาศยานขนาดเดียวกันไม่จำเป็นต้องมีอัตราการเผาผลาญที่เท่ากัน ซึ่งจากผลลัพธ์ได้แสดงให้เห็นว่าการนำข้อมูลเรื่องอัตราการเผาผลาญของเชื้อเพลิงมาร่วมพิจารณาด้วยนั้น ก่อให้เกิดการลดลงของต้นทุนอย่างมหาศาล ขณะที่การจัดลำดับอากาศยานโดยระบบ AMAN นั้นแม้จะให้ค่าความจุทางวิ่งได้ดีที่สุดดังข้อมูลในสรุปผลการทดสอบด้านการลดต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยาน แต่กลับเป็นระบบที่ก่อให้เกิดการล่าช้าสะสมของอากาศยาน และก่อให้เกิดการเผาผลาญเชื้อเพลิงที่ไม่จำเป็นสูงที่สุด โดยมีค่าสูงกว่าระบบ Optimal ถึงเกือบเท่าตัว ซึ่งชุดเที่ยวบินที่มีการเผาผลาญเชื้อเพลิงสูงสุดของระบบ AMAN คือชุดเที่ยวบินที่ 4 และ 6 ซึ่งมีการสับเปลี่ยนลำดับเที่ยวบินมากถึง 15 และ 12 เที่ยวบินตามลำดับ ขณะที่ระบบ FCFS ซึ่งเป็นการจัดลำดับตามเวลาคาดการณ์มาถึงของเที่ยวบินนั้น กลับมีการล่าช้าที่ไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับการดำเนินการของระบบ AMAN จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่าการจัดลำดับอากาศยานโดยไม่มีการพิจารณาอย่างครอบคลุมสามารถส่งผลเสียต่อระบบการบินทั้งระบบได้มากกว่าการไม่จัดลำดับใดๆ

ตารางที่ 4.8 ผลสรุปต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน

ผลสรุปต้นทุนค่าเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน (บาท)			
ชุดเที่ยวบิน	FCFS	AMAN	Optimal
1	64,598.56	64,598.56	53,442.58
2	57,866.00	64,453.66	37,945.13
3	109,515.00	107,226.50	83,476.74
4	45,001.79	111,874.73	38,090.30
5	8,766.25	8,766.25	8,738.78
6	81,623.54	145,458.57	69,342.44
ผลรวม	367,371.14	502,378.27	291,035.96
ค่าเฉลี่ย	61,228.52	83,729.71	48,505.99

4.2.3 สรุปผลการทดสอบด้านการลดต้นทุนค่าภาษีคาร์บอน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าระบบ Optimal สามารถช่วยลดมลพิษก๊าซเรือนกระจกได้ดีที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับการเผาผลาญเชื้อเพลิงส่วนเกินของอากาศยาน ทั้งนี้หากมีการนำกลไกชดเชยและการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการบินระหว่างประเทศมาใช้จริงในอนาคต การจัดลำดับโดยพิจารณาถึงภาษีคาร์บอนที่จะเกิดขึ้นกับองค์กรย่อมช่วยให้องค์กรสามารถประหยัดต้นทุนได้อย่างมหาศาล ช่วยผู้โดยสารในการแบกรับค่าใช้จ่ายภาษีที่เพิ่มขึ้น และช่วยสังคมในการรักษาสีเขียวสิ่งแวดล้อมได้ดีขึ้นในอนาคต

ตารางที่ 4.9 ผลสรุปต้นทุนค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน

ผลสรุปต้นทุนค่าภาษีคาร์บอนส่วนเกิน (บาท)			
ชุดเที่ยวบิน	FCFS	AMAN	Optimal
1	24,794.56	24,794.56	20,512.61
2	22,210.44	24,738.94	14,564.30
3	21,017.31	20,578.12	16,020.24
4	8,636.41	21,470.18	7,310.01
5	2,243.14	2,243.14	2,236.11
6	20,886.12	37,220.45	17,743.59
ผลรวม	99,787.98	131,045.39	78,386.86
ค่าเฉลี่ย	16,631.33	21,840.90	13,064.48

4.2.4 สรุปผลการทดสอบในภาพรวม

จากข้อมูลในตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำต้นทุนทุกด้านมารวมกันแล้วจะทำให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นว่าการจัดลำดับเที่ยวบินที่มีความเหมาะสมมีความสำคัญอย่างไร โดยระบบ โดยระบบ Optimal สามารถลดต้นทุนที่เกิดจากการลงจอดล่าช้าได้ต่ำกว่าระบบ FCFS 17,685.98 บาท และต่ำกว่าระบบ AMAN 42,899.95 บาทต่อชุดเที่ยวบิน ซึ่งหากประมาณการว่าชุดเที่ยวบินที่นำมาทดสอบใช้ระยะเวลาโดยประมาณ 1 ชั่วโมงในการลงจอด ดังนั้นการจัดลำดับเที่ยวบินที่ดีจะสามารถลดต้นทุนให้กับองค์กรด้านการบินต่อวันได้อย่างมหาศาล ซึ่งเป็นผลดีต่อทุกภาคส่วนรวมถึงผู้โดยสารที่มีโอกาสจะได้รับการบริการที่มีคุณภาพในราคาที่ถูกลงในอนาคต

ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า ตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้งานกับข้อมูลจริงได้ดีเป็นที่น่าพอใจ และเป็นเครื่องยืนยันว่าการจัดลำดับเที่ยวบินนั้นมีความสำคัญในการบริหารจัดการจราจรทางอากาศ ซึ่งเป็นประโยชน์กับหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้อง อาทิ ท่าอากาศยาน สายการบิน เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศ ผู้โดยสาร และประชาชนโดยทั่วไปที่ นอกจากนี้การที่ระบบสามารถจัดลำดับอากาศยานที่เหมาะสมจะมีส่วนช่วยในการลดภาระงานของเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศ ซึ่งจะส่งผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพในการปฏิบัติงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความปลอดภัย และฝ่ายสนับสนุนการบินหรือผู้เกี่ยวข้องที่ปฏิบัติงานภาคพื้นจะสามารถวางแผนการปฏิบัติงานได้เป็นระบบกว่าในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากในปัจจุบันเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศใช้ลำดับการลงจอดจากระบบ AMAN เป็นเบื้องต้นแล้วมีการสลับลำดับเที่ยวบินในภายหลัง ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการลงจอดและกระทบกับผู้ปฏิบัติงานภาคพื้นได้

ตารางที่ 4.10 ผลสรุปต้นทุนรวมที่เกิดจากการลงจอดล่าช้าของเที่ยวบิน

ผลสรุปต้นทุนรวมที่เกิดจากการลงจอดล่าช้าของเที่ยวบิน (บาท)			
ชุดเที่ยวบิน	FCFS	AMAN	Optimal
1	119,391.80	119,391.80	104,684.52
2	112,516.98	119,701.79	82,444.33
3	170,036.41	167,203.82	138,165.05
4	93,142.30	172,744.11	84,068.37
5	54,132.95	54,132.95	54,098.45
6	195,159.63	262,489.48	174,803.50
ผลรวม	744,380.07	895,663.94	638,264.22
ค่าเฉลี่ย	124,063.35	149,277.32	106,377.37

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอแนวคิดในการเปลี่ยนแปลงลำดับการลงจอดของเที่ยวบินขาเข้า เพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการจัดการจราจรทางอากาศและเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรทั้งในด้านของเวลาและต้นทุนดำเนินการ โดยผู้วิจัยได้นำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพัฒนามาจากตัวแบบ Travelling Salesman Problem (TSP) ซึ่งเป็นตัวแบบที่ใช้ในการพิจารณาเส้นทางการเดินทางของพนักงานขายที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสิ่งที่ตัวแบบทำคือการเลือกลำดับในการเดินทางที่เหมาะสมสำหรับพนักงานขายเพื่อให้เกิดต้นทุนที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการจัดลำดับลงจอดของเที่ยวบิน ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นข้อมูลที่ได้รับความสะดวกจาก บริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย ทั้งด้านข้อมูลทางสถิติและโอกาสให้เข้าสังเกตการณ์การทำงานของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศ ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

วัตถุประสงค์แรกของการจัดลำดับลงจอดคือการเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับความจุของทางวิ่งซึ่งถือเป็นคอขวดของระบบ และพัฒนาไปเป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่สามารถตอบวัตถุประสงค์ที่หลากหลายหรือเรียกว่า Multi-Objective คือ เพิ่มความจุของทางวิ่ง ลดการลงจอดล่าช้า และลดการปล่อยมลพิษสู่ชั้นบรรยากาศของอากาศยาน โดยแต่ละเที่ยวบินจะต้องลงจอดด้วยความปลอดภัยตามมาตรฐานขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ทั้งนี้เป็นการทดสอบกับการจัดลำดับอากาศยานแบบมาถึงก่อนให้บริการก่อน (First Come First Serve : FCFS) และลำดับที่ได้รับการจัดโดยระบบจัดลำดับเที่ยวบินของบริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทยที่เรียกว่า Arrival Manager หรือ AMAN

จากการทดสอบพบว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพัฒนานั้นสามารถจัดลำดับการลงจอดของเที่ยวบินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในบางเที่ยวบินนั้นจะพบว่ามีการดำเนินการที่ต่ำกว่าระบบ FCFS หรือ AMAN แต่เมื่อวิเคราะห์ในรายละเอียดแล้วพบว่า เป็นผลมาจากการที่ผู้วิจัยจำเป็นต้องแบ่งชุดเที่ยวบินออกเป็นชุดเที่ยวบินย่อย ชุดเที่ยวบินย่อยละ 5 เที่ยวบิน เพื่อให้โปรแกรม Microsoft Excel Solver สามารถประมวลผลได้ การจัดลำดับดังกล่าวจึงเป็นการจัดลำดับชุดเที่ยวบินย่อยที่ดีที่สุดมากต่อกันมากกว่าจะเป็นการจัดลำดับชุดเที่ยวบินในครั้งเดียว อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของโปรแกรม Microsoft Excel ที่ไม่สามารถประมวลผลชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้

อย่างไรก็ดีข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นได้ทำการคัดกรองข้อมูลบางประการออก ที่อาจมีผลต่อผลลัพธ์ในการจัดลำดับเที่ยวบินเข้า อาทิ ความคุ้นเคยต่อสภาพแวดล้อมของผู้ทำการบิน (นักบิน) รวมถึงการตัดความสามารถในการเปลี่ยนเส้นทางบินให้กับเที่ยวบินโดยเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศ ทั้งนี้เพื่อควบคุมระยะทางของอากาศยานให้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งต่างจากการปฏิบัติจริงที่เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศมักจะมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางบินของอากาศยานเพื่อเพิ่มหรือลดระยะทางการบินซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติหนึ่งในการจัดการจราจรทางอากาศด้วยเรดาร์ ดังนั้นลำดับการลงจอดที่แท้จริงของอากาศยานจึงไม่ถูกนำมาพิจารณาในตัวแบบนี้ จึงกล่าวได้ว่าการทดสอบนี้เป็นตัวอย่างง่ายในการทดสอบการจัดลำดับเที่ยวบินเข้าเท่านั้น ยังต้องได้รับการปรับปรุงอีกหลายขั้นตอนก่อนจะนำไปสู่การปฏิบัติจริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนลำดับลงจอดของอากาศยานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรองรับความจุของทางวิ่งและการลดต้นทุนต่างๆ อันเกิดจากการทำการบินล่าช้า โดยเป็นการทดสอบอย่างง่าย และจำเป็นต้องได้รับการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติมก่อนจะนำไปสู่การปฏิบัติจริง ซึ่งผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตดังนี้

1) ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีข้อจำกัดด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงเลือกใช้โปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมอย่างง่าย และมีข้อจำกัดในการคำนวณผลการจัดลำดับลงจอดของอากาศยาน โดยผู้วิจัยจำเป็นต้องแบ่งชุดเที่ยวบินออกเป็นชุดเที่ยวบินย่อยเพื่อให้เหมาะสมต่อความสามารถของโปรแกรม ผลการจัดลำดับที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลการจัดลำดับชุดเที่ยวบินย่อยมาต่อกัน ซึ่งส่งผลต่อผลลัพธ์ซึ่งไม่ใช่ลำดับที่ดีที่สุดที่แท้จริง และในบางชุดเที่ยวบินมีผลการดำเนินการที่ต่ำกว่าระบบ FCFS และ AMAN จึงขอเสนอแนะว่าในการศึกษาครั้งต่อไป ผู้ศึกษาวิจัยควรเลือกโปรแกรมที่มีศักยภาพมากกว่านี้หรือเขียนโปรแกรมที่เหมาะสมเป็นการเฉพาะ ซึ่งจะสามารถทำให้สามารถรองรับจำนวนเที่ยวบินต่อชุดเที่ยวบินย่อยได้มากขึ้น หรือสามารถคำนวณทั้งชุดเที่ยวบินในคราวเดียวได้ อันจะเป็นผลลัพธ์ที่สมบูรณ์มากขึ้น

2) ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกเฉพาะชุดเที่ยวบินที่มีการทำการบินในสภาพการณ์ปกติ กล่าวคือ ไม่ได้เลือกชุดเที่ยวบินที่มีสภาพแวดล้อมพิเศษ อาทิ การทำการบินในทัศนวิสัยต่ำ ซึ่งต้องใช้วิธีปฏิบัติเฉพาะ (Low Visibility Procedure) หรือการทำการบินในสภาพทางวิ่งที่ไม่สมบูรณ์อัน

จะทำให้อากาศยานมีเวลาในการครอบครองทางวิ่งสูงขึ้น การทำการบินในขณะที่มีเที่ยวบินพิเศษ (VIP) หรือการทำการบินในสภาวะการณ์อื่นๆ ซึ่งมีผลกระทบต่อการจัดลำดับของอากาศยาน

3) ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้สร้างชุดข้อมูลอย่างง่ายเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบต้นทุนในการดำเนินการต่างๆ อาทิ ต้นทุนค่าเสียโอกาสของท่าอากาศยานนั้น ผู้วิจัยเลือกเพียงค่าเสียโอกาสอันเกิดจากการเรียกเก็บค่าธรรมเนียมการใช้ทางวิ่งเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วท่าอากาศยานยังสูญเสียผลประโยชน์ทั้งในด้านการบิน และที่ไม่ใช่การบินอีกมากมาย รวมถึงต้นทุนของสายการบินที่เกิดจากการลงจอดล่าช้าไม่ได้มีเพียงค่าน้ำมันเท่านั้น แต่ยังรวมถึงค่าจ้างพนักงาน ค่าเช่าสถานที่ ค่าเสื่อมของอากาศยานและอะไหล่ และค่าเสียโอกาสในการเพิ่มเที่ยวบิน ซึ่งรายละเอียดต่างๆ เหล่านี้ผู้ศึกษาวิจัยสามารถนำมาพิจารณาร่วมเพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ขึ้น

4) ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกตัดวิธีปฏิบัติในการเปลี่ยนเส้นทางบินของอากาศยานโดยเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศซึ่งเรียกว่า Vector ออก เพื่อไม่ให้เกิดความเหลื่อมล้ำในการทำการบินแต่ละเที่ยวบิน อย่างไรก็ตามการ Vector เป็นวิธีการทำงานหนึ่งของเจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศที่จะสามารถช่วยให้อากาศยานสามารถลงจอดได้เร็วขึ้น เมื่อมีการตัดลดเส้นทางบิน หรือเพิ่มระยะทางบินเพื่อสร้างโอกาสให้กับเที่ยวบินอื่น ซึ่งการที่เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศจำเป็นต้องตัดสินใจนั้นเป็นการเพิ่มภาระงาน (Workload) ของเจ้าหน้าที่ไปในตัว การนำ Workload มาเป็นประเด็นหนึ่งในการพิจารณาน่าจะทำให้งานวิจัยในครั้งต่อไปมีความสมบูรณ์ขึ้น

5) ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นท่าอากาศยานที่มีการแบ่งทางวิ่งสำหรับอากาศยานที่วิ่งขึ้นและลงออกจากกัน ในการศึกษาวิจัยในอนาคตผู้ศึกษาวิจัยอาจเลือกใช้ข้อมูลจากสนามบินที่มีทางวิ่งที่ใช้ขึ้นลงร่วมกัน ซึ่งจะทำให้งานวิจัยมีความซับซ้อนและน่าสนใจยิ่งขึ้น

เหล่านี้เป็นข้อเสนอของผู้วิจัยที่มีต่อผู้ที่สนใจศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง ซึ่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อท่านในการศึกษาวิจัยพัฒนางานด้านการควบคุมจราจรทางอากาศให้มีศักยภาพยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

- ธวัชชัย แสงคำสุข. (2019). “ปณิธานระดับโลก” ของ ICAO กับการพัฒนาอุตสาหกรรมการบิน
คาร์บอนต่ำ (GLOBAL ASPIRATIONAL GOAL). สืบค้นจาก
[http://www.tgo.or.th/2020/index.php/th/post/ปณิธานระดับโลก-ของ-icao-กับการพัฒนา-
อุตสาหกรรมการบินคาร์บอนต่ำ-global-aspirational-goal-476](http://www.tgo.or.th/2020/index.php/th/post/ปณิธานระดับโลก-ของ-icao-กับการพัฒนา-อุตสาหกรรมการบินคาร์บอนต่ำ-global-aspirational-goal-476)
- ระพีพันธ์ ปิตาคะโส. (2559). *วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างสำหรับแก้ปัญหาทางการขนส่ง
โลจิสติกส์*. อุบลราชธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย. (2558). ข้อบังคับของคณะกรรมการการบินพลเรือน
ฉบับที่ ๙๖ ว่าด้วยค่าบริการในการขึ้นลงของอากาศยานและค่าบริการที่เก็บอากาศยาน ณ
สนามบินอนุญาต หรือที่ขึ้นลงชั่วคราวอนุญาตของอากาศยาน (กปร.96). *ราชกิจจานุเบกษา*,
132 (ตอนพิเศษ 152 ง), 8-10.
- ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ. (2563). ในวิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. สืบค้น เมษายน 24, 2020, จาก
[https://th.wikipedia.org/w/index.php?title=พิเศษ:อ้างอิง&page=ท่าอากาศยานสุวรรณ
ภูมิ&id=8824877&wpFormIdentifier=titleform](https://th.wikipedia.org/w/index.php?title=พิเศษ:อ้างอิง&page=ท่าอากาศยานสุวรรณ-
ภูมิ&id=8824877&wpFormIdentifier=titleform)
- ICAO. (2017a). *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology Version 10 June 2017
Table of Contents*.
- ICAO. (2017b). *Wake Turbulence Separation in Rvsm Airspace*.
<https://doi.org/10.18356/ea8513e4-en>
- Kolos-Lakatos, T. (2013). *The Influence of Runway Occupancy Time and Wake Vortex
Separation Requirements on Runway Throughput*. สืบค้น จาก
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/85804>
- Lee, H., & Balakrishnan, H. (2008). Fuel cost, delay and throughput tradeoffs in
runway scheduling. *Proceedings of the American Control Conference*, 2449–
2454. <https://doi.org/10.1109/ACC.2008.4586858>
- Luenberger, R. A. (1988). *A Traveling-Salesman-Based Approach to Aircraft
Scheduling in the Terminal Area*.

- Luppo, O., & Argunov, G. (2016). O. Luppo, G. Argunov, O. Golyash. Operational Concept of Arrival Manager 23. *Proceedings of the National Aviation University*, N 1(66)(045), 23–27.
- Mesgarpour, M., Potts, C. N., & Bennell, J. A. (2010). Models for aircraft landing optimization. *Proceedings of the 4th international conference on research in air transportation (ICRAT2010)*.
- Nordhaus, W. D. (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7), 1518–1523.
- Psaraftis, H. N. (1978). *A dynamic programming approach to the aircraft sequencing problem*. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล Natthawut Jirathamawat
ประวัติการศึกษา Bachelor of Technology (Air Traffic Control Management) Civil
Aviation Training Center
ประสบการณ์การทำงาน 2015 - 2016 Assistant Instructor at Civil Aviation Training Center
2016 - Present Instructor at Civil Aviation Training Center



