

การจัดการเส้นทางการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด

A Saving Algorithm Approach to Flight Path Management for Unmanned Aerial Vehicles

จิตรพล แสงศิริ¹, ยศพล พงษ์แก้ว^{1*}, จิรวุฒิ คล่องตรวโจ² และ ฐาปนัต บัวภิบาล¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

²ภาควิชาวิศวกรรมอากาศยาน กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Jittraphon Sangsiri¹, Yossapol Pongkaew^{1*}, Jiravud Klongtrujrok² and Thapanat Buaphiban¹

¹Industrial Engineering and Aviation Management Department, Academic Faculty,

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

²Aeronautical Engineering Department, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Corresponding Author Email : yossapol_pong@rtaf.mi.th

Received 25 December 2024

Revised 08 October 2025

Accepted 27 November 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจัดการเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับสำหรับการขนส่งเอกสารและหนังสือไปตามจุดต่าง ๆ ภายในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยจำลองสถานการณ์ที่มีการใช้งานอากาศยานไร้คนขับในการขนส่งจริง และนำหลักการจัดการจราจรทางอากาศมาประยุกต์ใช้ เพื่อจัดสรรทรัพยากรให้คุ้มค่าที่สุด โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบฮิวริสติกส์ วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) ในการสร้างรูปแบบเส้นทางการบินที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระยะทางของเส้นทางการบินสั้นที่สุด ซึ่งแต่ละจุดรับและจุดส่งนั้นกำหนดขึ้นมาจากได้เงื่อนไขทางด้านกฎหมาย โดยได้จำลองจุดขนส่งเอกสารจำนวนทั้งหมด 7 จุด แต่ละจุดสามารถเป็นทั้งจุดปล่อยและจุดรับเอกสารได้ การแก้ปัญหาเส้นทางใช้สูตร Saving Algorithm ควบคู่กับโปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณเส้นทางเพื่อหาค่าประหยัดและสร้างเส้นทาง จากศึกษาพบว่า เส้นทางที่ประหยัดที่สุดเมื่อจุดที่ 1 เป็นจุดขนส่ง ได้แก่ เส้นทางที่ 1 (1-8-9-7-4-3-1) และเส้นทางที่ 2 (1-2-1) จุดที่มีค่าความประหยัดมากที่สุดคู่แรก คือ จุดที่ 8, จุดที่ 9 (682.23 เมตร) ตามหลักการจัดการจราจรทางอากาศ ทำให้ได้รูปแบบเส้นทางที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ระยะทางการขนส่งสั้นลงขนส่งได้เร็วขึ้น นอกจากนั้นกองทัพอากาศสามารถนำผลการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางการขนส่งเอกสารในหน่วยงาน หรือสามารถนำไปปรับใช้ในการทำภารกิจอื่น ๆ ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, การจัดการจราจรทางอากาศ, การขนส่งทางอากาศ, วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด

Abstract

This study investigates the optimization of unmanned aerial vehicles (UAVs) flight routes for transporting documents and books within the Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy. A simulation was developed to reflect potential real-world UAV delivery operations, integrating air traffic management principles to improve resource utilization and efficiency. A heuristic approach, specifically the Savings Algorithm, was applied to design optimal flight paths with the objective of minimizing total travel distance. Seven designated locations were identified as both pickup and drop-off points, subject to legal constraints. Route construction and savings calculations were performed using the Savings Algorithm in combination with Microsoft Excel. The results indicated that, when Node 1 was set as the starting point, the most efficient routes were Route 1 (1-8-9-7-4-3-1) and Route 2 (1-2-1). The greatest pairwise saving was observed between Node 8 and Node 9 (682.23 meters). By applying air traffic management concepts, the resulting flight patterns demonstrated improved efficiency, shorter travel distances, and faster delivery times. These findings suggest that the Royal Thai Air Force could adopt this routing framework as a practical guideline for document distribution within the organization, as well as adapt it to broader mission-related applications in the future.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Air Traffic Management, Air Transportation, Saving Algorithm

1. บทนำ

ระบบอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial System: UAS) มีการพัฒนาก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดดทั้งการพัฒนาในด้านศักยภาพ ประสิทธิภาพ และด้านจำนวนที่มากขึ้น รวมถึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระดับโลกและระดับประเทศ ซึ่งเมื่อมีจำนวนของอากาศยานไร้คนขับมากขึ้น ปัญหาที่จะเกิดขึ้นตามมาอย่างแน่นอน คือ การจราจรทางอากาศของอากาศยานไร้คนขับ จึงต้องมีการนำระบบจัดการจราจรทางอากาศ (Unmanned Aircraft System Traffic Management: UTM) มาประยุกต์ใช้ เพื่อแก้ปัญหาระบบจัดการจราจรทางอากาศให้เกิดประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น [1], [2]

หน่วยงานทางการทหารในประเทศไทยหลายแห่ง โดยเฉพาะกองทัพอากาศไทย และหน่วยขึ้นตรงภายในกองทัพอากาศไทย ได้มีการนำอากาศยานไร้คนขับมาปฏิบัติภารกิจต่าง ๆ ในเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชเป็นหน่วยขึ้นตรงกองทัพอากาศไทย ได้มีการใช้อากาศยานไร้คนขับในการปฏิบัติการกิจด้านการเรียนการสอน ด้านการวิจัยและพัฒนา โดยใช้การวิเคราะห์การกำหนดเส้นทางการบิน (Routing Analysis) [3] ถูกนำมาใช้ในการจัดการเส้นทาง โดยคำนวณเส้นทางขณะที่อากาศยานไร้คนขับบินอยู่พร้อมกันหลายลำ คำนวณความคุ้มค่าของเส้นทางว่าจะใช้เส้นทางใดในการบิน เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการเดินทางมากที่สุด โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น ความสูงของอาคาร จำนวนอากาศยานไร้คนขับที่มีอยู่ โดยจะนำข้อจำกัดเหล่านี้จะนำมาสร้างเป็นเส้นทางทางการบินของอากาศยานไร้คนขับในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัดของ Clark และ Wright เป็นทฤษฎีที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและให้คำตอบตรงไปตรงมา ได้เส้นทางที่สั้นที่สุดและเข้าใจง่ายที่สุด แม้ว่าวิธีนี้จะไม่รับประกันถึงการได้คำตอบที่ดีที่สุดก็ตาม สำหรับการตัดสินใจในปัญหาที่ไม่ใหญ่มากนัก

นอกจากนี้แล้วงานวิจัยนี้ยังตอบสนองต่อเป้าหมายที่สำคัญของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช คือ การเป็นศูนย์กลางเทคโนโลยีและองค์ความรู้ด้านอากาศยานไร้คนขับภายในประเทศ ซึ่งอากาศยานไร้คนขับถูกนำไปใช้ในการกิจต่าง ๆ เช่น การขนส่งสิ่งของ การบินลาดตระเวน การบินส่งเอกสาร การบินประกาศข่าว และการบินเตือนภัย ซึ่งการปฏิบัติภารกิจหลายภารกิจรวมกัน ทำให้เกิดความจำเป็นต้องใช้อากาศยานไร้คนขับจำนวนมาก ซึ่งสามารถทำให้เกิดปัญหาทางด้านพื้นที่เดินอากาศที่มีความคับคั่งของจำนวนอากาศยานไร้คนขับมาก การใช้งานอากาศยานไร้คนขับเป็นจำนวนมากมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุและอันตราย [4] งานวิจัยนี้จึงได้มีการนำระบบการจัดการจราจรทางอากาศของอากาศยานไร้คนขับ และการวิเคราะห์การกำหนดเส้นทางการบินมาใช้ในการจัดการอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่ทางอากาศ เพื่อให้โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชเกิดความพร้อมที่จะทำภารกิจต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานไร้คนขับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาหลักการด้านการจัดการพื้นที่จราจรทางอากาศและกฎหมายเกี่ยวกับอากาศยานไร้คนขับ
- 2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองเส้นทางการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับภายในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

3. ขอบเขตงานวิจัย

- 3.1 ใช้พื้นที่ภายในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชในส่วนของอาคารกองการศึกษา อาคารกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ และอาคารกองบัญชาการ
- 3.2 กำหนดตัวอย่างของ UAV เพียงหนึ่งชนิด โดยใช้อากาศยานไร้คนขับของทีม Pegasus คือ Hexa-Rotor ซึ่งมีการใช้งานเป็นประจำภายในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการกำหนดเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับสำหรับการขนส่งเอกสารและหนังสือไปตามจุดต่าง ๆ ภายในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชนั้น สามารถสรุปและแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

4.1 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับ Unmanned Traffic Management (UTM)

ระบบอากาศยานไร้คนขับ หมายถึง อากาศยานใด ๆ ที่ปฏิบัติการหรือออกแบบเพื่อให้ปฏิบัติการได้โดยอิสระ [1] หรือให้สามารถขับในระยะไกลโดยไม่มีนักบินประจำเครื่อง โดย UTM [2] ได้รับการออกแบบมา เพื่อให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการของ UAS ได้รับความปลอดภัย มั่นคง และเท่าเทียมกันในการเข้าถึงน่านฟ้า ซึ่งมีข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติการและประสิทธิภาพ โดยคำนึงถึงผู้ปฏิบัติการ อากาศยาน สภาพแวดล้อมการปฏิบัติงาน และการพิจารณาระดับน่านฟ้าร่วมด้วย [5], [6]

4.2 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับ Routing Problem

โครงสร้างพื้นฐานของ Routing Problem มาจาก Vehicle Routing Problem (VRP) คือ การหาเส้นทางที่เหมาะสมและเกิดความคุ้มค่ามากที่สุดสำหรับยานพาหนะตั้งแต่ 1 คันขึ้นไป เพื่อให้การส่งสินค้าหรือสิ่งของจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดย VRP เป็นปัญหาที่มีการศึกษาและนำไปใช้ในการจัดส่งสินค้าและบริการในอุตสาหกรรมส่งออก อุตสาหกรรมโลจิสติกส์ และอุตสาหกรรมขนส่ง เป็นต้น [3], [7]

4.3 กฎหมายและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานไร้คนขับ

ประกาศกระทรวงคมนาคม เรื่อง หลักเกณฑ์การขออนุญาตและเงื่อนไขในการบังคับหรือปล่อยอากาศยานซึ่งไม่มีนักบินประเภทอากาศยานที่ควบคุมการบินจากภายนอก พ.ศ.2558

กฎหมายและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานไร้คนขับของหน่วยงาน รวมไปถึงความปลอดภัยด้านการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย

4.4 สมรรถนะของอากาศยานไร้คนขับ

คณะผู้วิจัยได้กำหนดชนิดของอากาศยานไร้คนขับขึ้นมา 1 ชนิด เพื่อใช้ประกอบในการคำนวณจากสูตรสมการเพื่อหารูปแบบเส้นทางในการบิน (Flight Path Management) และได้นำสมรรถนะของอากาศยานไร้คนขับจากทีม Pegasus เพื่อมาใช้เป็นแบบอย่างในการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 1

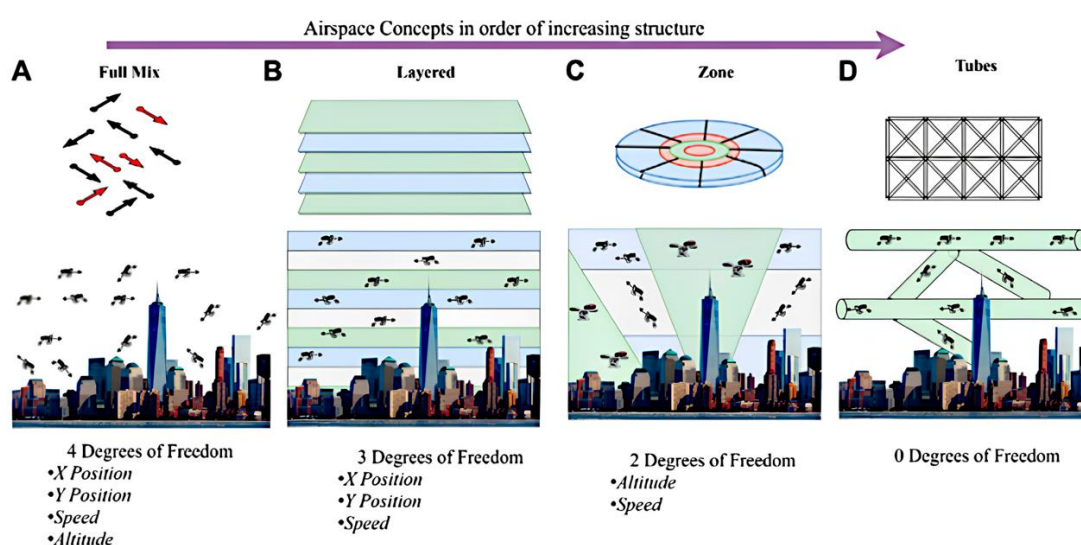
ตารางที่ 1 ข้อมูลแสดงสมรรถนะอากาศยานไร้คนขับของทีม Pegasus

ประเภท	Hexa-Rotor
ความสามารถในการบรรทุก	5 กิโลกรัม
ความจุแบตเตอรี่	32,000 มิลลิแอมป์
ระยะเวลาในการบิน	30 นาที
ความสูงในการบินสูงสุด	200 เมตร
ระบบ GPS	Here link 3.0
ระบบการเชื่อมต่อ	สัญญาณ RFD

5. การดำเนินการวิจัย

5.1 แนวทางการจัดการจราจรทางอากาศ

การออกแบบพื้นที่การจราจรทางอากาศจะอ้างอิงจากทฤษฎีการจัดการจราจรทางอากาศ (Air Traffic Management) และ แนวคิดห้วงอากาศ (Airspace Concept) [8]



รูปที่ 1 Airspace Concept [9]

5.1.1 Airspace Concept

คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้รูปแบบการจราจรทางอากาศแบบชั้น (Layered) ซึ่งการจัดการจราจรทางอากาศรูปแบบดังกล่าวเป็นการจัดการจราจรแบบแบ่งชั้นการบินอย่างชัดเจน โดยที่มีปัจจัยในการกำหนด คือ จำนวนของอากาศยานที่มากหรือน้อย และปัจจัยเรื่องความเร็วของอากาศยาน รวมไปถึงตำแหน่งในแกน x และแกน y [9]

ในกรณีที่มีอากาศยานหลายลำทำการบินใน Layered เดียวกัน จะไม่มีปัจจัยเรื่องความสูงมาเกี่ยวข้อง เนื่องจากมีการแบ่งอย่างชัดเจนว่าอากาศยานลำไหนทำงานที่ความสูงเท่าไรตามชั้นของ Layered ที่ทางคณะผู้วิจัยได้กำหนดไว้

5.1.2 Air Traffic Management

คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกหัวข้อการกำหนดชั้นการบิน (Layered Assignment) สำหรับใช้ในการทำวิจัยและดำเนินงาน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อย และเข้าใจง่าย โดยวิธีนี้จะใช้การแบ่งชั้นการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับแต่ละลำอย่างชัดเจนตั้งแต่แรกเริ่ม จะไม่มีการนำปัจจัยเรื่องความสำคัญของภารกิจ หรือปัจจัยที่ต้องเลือกว่าอากาศยานลำไหนควรทำการบินขึ้นก่อนหรือหลังเหมือนกับวิธีการหน่วงเวลาภาคพื้นดิน (Ground Delay) หรือปัจจัยที่ต้องบินหลบหลีกกลางอากาศดังวิธีการลดระดับการบินตามความต้องการ (On-demand Descending) [10], [11] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางรูปแบบของ Air Traffic Management [12]

Layer assignment	Single-layer	Multi-layer
Centralized	Ground delay	Layered assignment
Distributed	Hovering	On-demand descending

ซึ่งข้อดีของการเลือกวิธี Layered assignment ได้แก่

- 1) ป้องกันการสับสนว่าอากาศยานลำไหนต้องบินขึ้นใด
- 2) ป้องกันการเกิดอุบัติเหตุการบินชนกันของอากาศยาน
- 3) ไม่จำเป็นต้องให้อากาศยานมีระบบหลบหลีกซึ่งกันและกันเนื่องจากถูกแบ่งแยกชั้นการบินไว้อย่างชัดเจน คณะผู้วิจัยได้กำหนดให้อากาศยานไร้คนขับ 1 ลำต่อชั้นการบิน 1 ชั้น เนื่องจากเป็นแนวทางเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ และไม่มีโอกาสเกิดอุบัติเหตุระหว่างอากาศยานไร้คนขับด้วยกัน

5.2 การกำหนดจุดต่าง ๆ สำหรับการปล่อยอากาศยาน

ประกาศกระทรวงคมนาคม เรื่อง หลักเกณฑ์การขออนุญาตและเงื่อนไขในการบังคับหรือปล่อยอากาศยานซึ่งไม่มีนักบินประเภทอากาศยานที่ควบคุมการบินจากภายนอก พ.ศ. 2558

5.2.1 ระหว่างทำการบิน

- 1) ห้ามทำการบินโดยใช้ความสูงเกิน 90 เมตร (300 ฟุต) เหนือพื้นดิน
- 2) ห้ามทำการบินโดยมีระยะห่างในแนวราบกับบุคคล ยานพาหนะ สิ่งก่อสร้าง หรืออาคาร น้อยกว่า 30 เมตร (100 ฟุต) [13]

คณะผู้วิจัยได้ทำการกำหนดตำแหน่งจุดต่าง ๆ สำหรับปล่อยอากาศยานให้ได้มากที่สุด โดยมีข้อจำกัดทางกฎหมายเข้ามาเกี่ยวข้อง คือ ตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยานจะต้องห่างจากตึกไม่ต่ำกว่า 30 เมตร จึงทำการสำรวจพื้นที่จริง และหาพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับปล่อยอากาศยาน โดยกำหนดให้จุดสีแดงเป็นตำแหน่งในการปล่อยของอากาศยานจำนวนทั้งสิ้น 9 จุด ซึ่งเป็นตำแหน่งในการปล่อยของอากาศยานที่เป็นไปได้มากที่สุดสำหรับการทำวิจัย โดยแต่ละจุดนั้นจะทำหน้าที่เป็น depot หรือจุดเริ่มต้นในการทำภารกิจ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชจากดาวเทียม

5.3 ขั้นตอนการลดจำนวนตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับ

ในขั้นตอนนี้เป็นการลดจำนวนตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับ สำหรับการคำนวณระยะทาง (Distance) ที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบประหยัด ในกรณีแรกคณะผู้วิจัยเริ่มจากการสำรวจตำแหน่งจุดรับ-ส่งเอกสารจุดใดมีโอกาสถูกใช้งานน้อย และจุดใดถูกตั้งไว้เกินความจำเป็น ซึ่งจากการสำรวจพบว่าจุดที่สามารถนำออกไปได้ คือ จุดที่ 5 และจุดที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากเป็นจุดที่นักเรียนนายเรืออากาศ (นนอ.) ใช้ในการเดินแถว รวมแถวตรวจสอบยอด และการใช้เป็นพื้นที่สำหรับการฝึกของ นนอ. จึงเป็นเหตุผลหลักในการตัดจุดรับส่งเอกสารจุดที่ 5 และจุดที่ 6 ออกไป ประกอบกับจุดที่ 5 และจุดที่ 6 เป็นจุดที่อยู่ระหว่างพื้นที่ของกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ และกองการศึกษา ซึ่งบริเวณพื้นที่ของกองการศึกษามีจุดรับส่งเอกสารถึง 4 จุดที่ครอบคลุมพื้นที่ทุกอาคารของกองการศึกษาอยู่แล้ว และพื้นที่ของอาคารกองบังคับการกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ มีจุดที่ 8 ซึ่งอยู่ด้านหลังของอาคารอยู่แล้วจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้จุดที่ 5 และจุดที่ 6 โดยหลังจากได้ทำการลดจุดสำหรับปล่อยอากาศยานแล้วจะเหลือจุดเพียง 7 จุด ซึ่งทั้ง 7 จุดนี้สามารถเป็นได้ทั้งจุดรับและจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 3 แสดงการลดจำนวนตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับ

5.4 วางแผนในการวางเสาสัญญาณเพื่อให้ครอบคลุมระยะการบินของอากาศยานไร้คนขับ

คณะผู้วิจัยได้กำหนดกรอบของระยะสัญญาณที่จำเป็นต้องใช้ในการบิน ซึ่งจะครอบคลุมจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับทั้งหมด และเพียงพอต่อการบินเป็นระยะกระจัดจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง โดยสัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีเหลืองคือจุดในการวางเสาสัญญาณประเภท Antenna 800-950MHz Dipole 8 dBi ซึ่งเป็นเสาส่งสัญญาณและรับสัญญาณชนิดที่มีรัศมีการรับส่งสัญญาณไกลสุดถึง 12 กิโลเมตร และรูปแบบการกระจายสัญญาณนั้นจะกระจายสัญญาณออกเป็นรัศมีวงกลม ซึ่งตำแหน่งของการวางเสาสัญญาณนั้นเป็นตำแหน่งที่วางแล้วทำให้สัญญาณครอบคลุมในรอบสี่น้ำเงินตามแต่ละส่วนที่ได้แบ่งไว้และกรอบสี่น้ำเงินคือระยะของสัญญาณที่จำเป็นต้องใช้ในการบิน ดังแสดงในรูปที่ 4



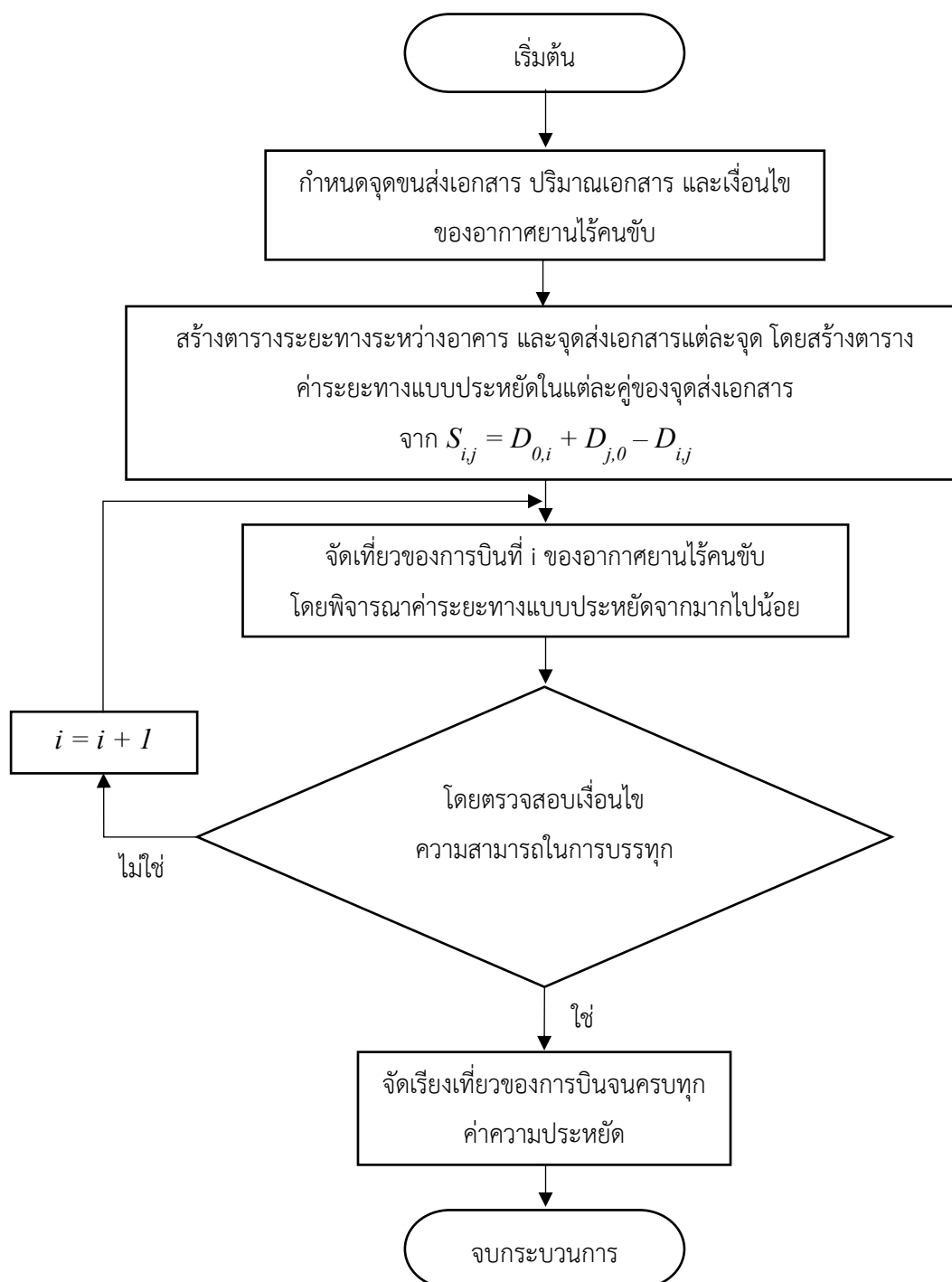
รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งการวางเสาสัญญาณเพื่อให้ครอบคลุมระยะการบินของอากาศยานไร้คนขับ

5.5 การคำนวณหาระยะทางที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบประหยัด

คณะผู้วิจัยมีความจำเป็นที่จะต้องทำการลดจำนวนตำแหน่งจุด depot ให้ได้มากที่สุด เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้งานในกรณีนี้ที่วิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้งานจริงแต่ด้วยงบประมาณที่ไม่ทราบแน่ชัดหรืออาจจะไม่เพียงพอจึงต้องทำการลดจำนวนตำแหน่งจุดในการตั้งเสาสัญญาณและจุดปล่อยอากาศยาน โดยมีข้อจำกัดในการลดจุดปล่อยอากาศยานไว้คนขับคือแต่ละหน่วยหลักยังต้องมีจุดในการปล่อยอากาศยานไว้คนขับอย่างน้อย 1 จุด คือ กองการศึกษา กรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ กองบัญชาการโรงเรียนนายเรืออากาศ และอากาศยานไว้คนขับมีความสามารถในการบรรทุกน้ำหนักไม่เกิน 5 กิโลกรัม

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลตำแหน่งที่ทำการสำรวจ

ลำดับ	สถานที่	พิกัด (WGS1984; DD.DDDDDD°)		ความต้องการ
		ละติจูด	ลองจิจูด	
1	หน้าอาคารกองวิชาวิศวกรรมอากาศยาน	14.649040240954118	101.186373562151	1 กิโลกรัม
2	หน้าอาคารกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และอุตสาหกรรม	14.649509557242858	101.185610816031	1 กิโลกรัม
3	ด้านหลังอาคารห้องสมุด	14.650346774346119	101.184872457099	1 กิโลกรัม
4	หน้าอาคารกองวิชามนุษยศาสตร์ และสังคมศาสตร์	14.652154012215801	101.184732931591	1 กิโลกรัม
5	หน้าอาคารกองวิชาทหาร	14.65098925267382	101.184271351105	1 กิโลกรัม
6	หน้าอาคารกรมนักเรียนนายเรืออากาศ รักษาพระองค์	14.65142880948574	101.185192074387	1 กิโลกรัม
7	ด้านข้างอาคารกองบัญชาการฝั่งซ้าย	14.65104513468727	101.186343326036	1 กิโลกรัม
8	สนามหญ้าหลังกรมนักเรียนนายเรืออากาศ รักษาพระองค์	14.652151854302181	101.184728331773	1 กิโลกรัม
9	ด้านข้างอาคารกองบัญชาการฝั่งขวา	14.652514522787802	101.185583590458	1 กิโลกรัม



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการหาคำตอบด้วยวิธีอัลกอริทึมแบบประหลัด

จากรูปที่ 5 ขั้นตอนของวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด มีขั้นตอนดังนี้

1) ทำการสร้างตารางแสดงระยะห่างระหว่างจุด (Distance Matrix) การขนส่งเอกสาร โดยจะมีรูปแบบทั้งหมด 15 เส้นทาง มีหน่วยระยะทางเป็นเมตร

ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างการสร้างตารางแสดงระยะทางระหว่างจุดส่งเอกสาร (เมตร)

	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 7	จุดที่ 8
จุดที่ 1	0	98.94	219.16	202.18	222.33	388.75
จุดที่ 2	98.94	0	123.59	125.84	186.64	308.91
จุดที่ 3	219.16	123.59	0	74.49	175.69	201.13
จุดที่ 4	202.18	125.84	74.49	0	100.86	187.18
จุดที่ 7	222.33	186.64	175.69	100.86	0	212.44
จุดที่ 8	388.75	308.91	201.13	187.18	212.44	0

2) นำระยะห่างระหว่างแต่ละจุดการขนส่งมาคำนวณค่าระยะทางประหยัดและสร้างเมตริก ค่าระยะทางประหยัดของแต่ละจุดการขนส่ง โดยคำนวณค่าระยะทางประหยัดจากสูตร ดังนี้

$$S_{ij} = D_{0,i} + D_{j,0} - D_{ij} \quad (1)$$

โดยที่ S_{ij} คือ ระยะการเดินทางที่ประหยัดได้ เมื่อทำการบินหนึ่งเที่ยว

D_{ij} คือ ระยะทางระหว่างจุด i ไปจุด j

0 คือ แทนสัญลักษณ์ Depot

3) เรียงลำดับค่าความประหยัด (Saving) จากค่ามากที่สุดไปน้อยสุด

4) เริ่มจัดเส้นทางการขนส่งเอกสาร โดยเรียงค่าความประหยัดมากที่สุดเป็นจุดแรกและพิจารณาจุดที่มีค่าความประหยัดที่มากที่สุดเพื่อพิจารณาเป็นลำดับถัดไป

5) พิจารณาเงื่อนไขความสามารถการบรรทุกของอากาศยานไร้คนขับ ที่ใช้ในการขนส่งเอกสาร หากไม่สามารถเพิ่มจำนวนจุดส่งเข้ามาในเส้นทางได้ ให้ทำการจัดเส้นทางแบบใหม่ ซึ่งมีเงื่อนไขคือ อากาศยาน 1 ลำสามารถบรรจุเอกสารได้ไม่เกิน 5 จุด

6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 – 5 จนจัดเส้นทางได้ทุกค่าความประหยัด จึงหยุดกระบวนการ

คณะผู้วิจัยต้องคำนวณเส้นทางด้วยวิธีดังกล่าวเป็นจำนวน 6 ครั้ง เนื่องจากแต่ละจุดนั้นสามารถเป็นจุดปล่อยอากาศยาน หรือ depot ได้นั่นเอง

ตารางที่ 5 แสดงแผนภาพของอัลกอริทึมแบบประหยัด กรณีกำหนดให้จุดที่ 1 เป็น depot (เมตร)

node	node	$D_{0,i}$	$D_{j,0}$	$D_{i,j}$	$S_{i,j}$
จุดที่2	จุดที่3	98.94	219.16	123.59	194.51
จุดที่2	จุดที่4	98.94	202.18	125.84	175.28
จุดที่2	จุดที่7	98.94	222.33	186.64	134.63
จุดที่2	จุดที่8	98.94	388.75	308.91	178.78
จุดที่3	จุดที่4	219.16	202.18	74.49	346.85
จุดที่3	จุดที่7	219.16	222.33	175.69	265.8
จุดที่3	จุดที่8	219.16	388.75	201.13	406.78
จุดที่4	จุดที่7	202.18	222.33	100.86	323.65
จุดที่4	จุดที่8	202.18	388.75	187.18	403.75
จุดที่7	จุดที่8	222.33	388.75	212.44	398.64

ตารางที่ 6 แสดงตัวอย่างผลการจัดเส้นทาง กรณีกำหนดให้จุดที่ 1 เป็น depot

เส้นทางที่ 1	1 – 3 – 8 – 1
เส้นทางที่ 2	1 – 4 – 7 – 1
เส้นทางที่ 3	1 – 2 – 1

6. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้รูปแบบการจำลองขนส่งเอกสารผ่านอากาศยานไร้คนขับ โดยอากาศยานไร้คนขับ Hexa-Rotor สามารถบรรทุกน้ำหนักเพิ่มเติมจากน้ำหนักเดิมได้อยู่ที่ 5 กิโลกรัม โดยคณะผู้วิจัยกำหนดให้แต่ละจุดรับส่งเอกสาร (Node) มีเอกสารที่สามารถบรรทุกได้สูงสุด 1 กิโลกรัมต่อจุดส่ง จากข้อมูลในรูปที่ 3 คณะผู้วิจัยได้กำหนดตำแหน่งจุดรับส่งเอกสารที่สามารถเป็นไปได้ในพื้นที่ของอาคารกองบัญชาการ รร.นนท. พื้นที่อาคารกองการศึกษา พื้นที่ของกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ ภายใต้กฎการบินของอากาศยานไร้คนขับของประเทศไทย ที่จุดปล่อยตัวต้องมีระยะในแนวระนาบห่างจากวัตถุต่าง ๆ 30 เมตร และเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับต้องไม่เกิน 90 เมตร โดยทำการลดจำนวนตำแหน่งจุดรับส่งเอกสารให้เหลือเพียง 7 จุด เท่าที่สามารถจัดตั้งได้ตามหลักความเป็นจริงและเท่าที่จำเป็น

6.1 การคำนวณระยะทางระหว่างจุด

เนื่องจากมีตำแหน่งจุดรับส่งเอกสารบางจุดเป็นพื้นที่ทับซ้อนกันทำให้ต้องมีการตัดจุดออกไป 2 จุด ได้แก่ จุดรับส่งเอกสารที่ 5 และ 6 เมื่อนำจุดที่ 5 และ 6 ออก จากเดิมที่กำหนดไว้ 9 จุด จะทำให้เหลือ 7 จุด ซึ่งทั้ง 7 จุดนี้เป็นจุดรับส่งเอกสารที่เหมาะสมและครอบคลุมพื้นที่ของกองบัญชาการโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

กองการศึกษา และกรรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ โดยสามารถคำนวณเป็นระยะห่างระหว่างแต่ละจุดได้ดังตารางที่ 4 โดยหน่วยวัดที่ใช้ในการคำนวณในตารางเป็นหน่วยเมตร ซึ่งใช้การวัดระยะห่างผ่านโปรแกรม Google Maps ในการวัดแต่ละจุด หรือการวัดโดยเทียบอัตราส่วนผ่านระบบดาวเทียม [13]

6.2 ผลการคำนวณหาเส้นทางที่ประหยัด

การคำนวณหาค่าความประหยัดและหาเส้นทางในการขนส่งเอกสาร ภายใต้ข้อจำกัดความสามารถในการบรรทุกของอากาศยานไร้คนขับ Hexa-Rotor ที่บรรทุกเอกสารได้ไม่เกิน 5 กิโลกรัม โดยผลลัพธ์ที่ได้กรณีจุดที่ 1 เป็นจุดส่งเอกสารจากการคำนวณ เมื่อจุดที่ 1 เป็นจุดสำหรับส่งเอกสารและจุดที่เหลือเป็นจุดรับเอกสาร ซึ่งจากการคำนวณด้วยวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) จะได้ดังตารางที่ 7 และได้เส้นทางที่ประหยัดที่สุดเมื่อจุดที่ 1 เป็นจุดส่ง ได้แก่ เส้นทางที่ 1 (1-8-9-7-4-3-1) และเส้นทางที่ 2 (1-2-1) ดังภาพที่ 6 ที่แสดงถึงเส้นทางเมื่อกำหนดให้จุดที่ 1 เป็นจุดส่ง (Depot)

ตารางที่ 7 ตารางการหาค่าความประหยัดเมื่อจุดที่ 1 เป็นจุดส่งเอกสาร

node 0	node i	node j	$D_{0,i}$	$D_{j,0}$	$D_{i,j}$	$S_{i,j}$
จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	98.94	219.16	123.59	194.51
	จุดที่ 2	จุดที่ 4	98.94	202.18	125.84	175.28
	จุดที่ 2	จุดที่ 7	98.94	222.33	186.64	134.63
	จุดที่ 2	จุดที่ 8	98.94	388.75	308.91	178.78
	จุดที่ 2	จุดที่ 9	98.94	395.6	334.28	160.26
	จุดที่ 3	จุดที่ 4	219.16	202.18	74.49	346.85
	จุดที่ 3	จุดที่ 7	219.16	222.33	175.69	265.8
	จุดที่ 3	จุดที่ 8	219.16	388.75	201.13	406.78
	จุดที่ 3	จุดที่ 9	219.16	395.6	254.14	360.62
	จุดที่ 4	จุดที่ 7	202.18	222.33	100.86	323.65
	จุดที่ 4	จุดที่ 8	202.18	388.75	187.18	403.75
	จุดที่ 4	จุดที่ 9	202.18	395.6	209.8	387.98
	จุดที่ 7	จุดที่ 8	222.33	388.75	212.44	398.64
	จุดที่ 7	จุดที่ 9	222.33	395.6	182.58	435.35
	จุดที่ 8	จุดที่ 9	388.75	395.6	102.12	682.23

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าจุดที่ค่าความประหยัดมากที่สุดคู่แรก คือ จุดที่ 8, จุดที่ 9 (682.23 เมตร) หากจุดรับเอกสารต่อไป คือ จุดที่ 7, จุดที่ 9 (435.35 เมตร) คู่ต่อไป คือ จุดที่ 4, จุดที่ 7 (323.65 เมตร) และคู่สุดท้าย คือ จุดที่ 3, จุดที่ 4 (346.85 เมตร) เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับสามารถบรรทุกได้ไม่เกิน 5 กิโลกรัม และแต่ละจุดสามารถ

รับเอกสารได้จุดละ 1 กิโลกรัม จะได้เส้นทางที่ 1 คือ 1-8-9-7-4-3-1 และจะเหลืออีก 1 จุด (จุดที่ 2) จึงต้องเริ่มในเส้นทางที่ 2 คือ 1-2-1 โดยสามารถเขียนเส้นทางทั้งหมดได้ดังนี้ จุดที่ 1 (Depot) -จุดที่ 8-จุดที่ 9-จุดที่ 7-จุดที่ 4-จุดที่ 3-จุดที่ 1 (Depot)-จุดที่ 2-จุดที่ 1 (Depot)



รูปที่ 6 เส้นทางที่ประหยัดเมื่อกำหนดให้จุดที่ 1 เป็นจุดส่งเอกสาร (Depot)

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า เส้นทางสีฟ้าเป็นเส้นทางการบินที่ 1 (1-8-9-7-4-3-1) โดยเริ่มจากจุดที่ 1 เป็นจุดที่ต้องการส่งเอกสารไปยังจุดต่าง ๆ และเส้นทางสีส้มเป็นเส้นทางการบินที่ 2 (1-2-1) ตามลำดับ

7. สรุป

จากการศึกษารูปแบบการจัดเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับสำหรับการขนส่งเอกสารและหนังสือไปตามจุดต่าง ๆ ภายในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ด้วยวิธีการแก้ปัญหาแบบฮิวริสติกส์ วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัดในการสร้างเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระยะทางของเส้นทางการบินสั้นที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

7.1 ผลการศึกษาหลักการด้านการจัดการจราจรทางอากาศและกฎหมายเกี่ยวกับอากาศยานไร้คนขับ พบว่า คณะผู้วิจัยได้วางแผนการจัดเส้นทางการบินตามหลักการจัดการจราจรทางอากาศของอากาศยานไร้คนขับ โดยจำลองตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับขึ้นมาทั้งหมดจำนวน 9 จุด หลังจากนั้นทำการสำรวจตำแหน่งจุดรับส่งเอกสารจุดใดมีโอกาสถูกใช้งานน้อยและจุดใดถูกตั้งไว้เกินความจำเป็น พบว่าจุดที่สามารถตัดออกไปได้จำนวน 2 จุด ได้แก่ จุดที่ 5 และจุดที่ 6 เนื่องจากเป็นจุดที่ นนอ.ใช้การเดินแถว รวมแถวตรวจสอบยอด และการใช้เป็นพื้นที่สำหรับการฝึกของ นนอ. ดังนั้นจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับจะเหลือเพียง 7 จุด ภายใต้ข้อจำกัดที่คณะผู้วิจัยได้กำหนดไว้ โดยทุกจุดสามารถเป็นทั้งจุดรับเอกสารและจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับแต่จะไม่มีการบินรับเอกสารระหว่างทาง ซึ่งหลังจากได้กำหนดจุดสำหรับปล่อยขึ้นมาแล้วในระหว่างทางการบินไปแต่ละจุดจะเป็นการบิน เพื่อไปส่งเอกสารได้อย่างเดียวไม่มีการรับเอกสารกลับระหว่างไปส่งแต่ละจุด หลังจากนั้นจึงทำการวัดระยะทางระหว่างจุดและนำมาคำนวณผ่านสูตรการหาค่าประหยัดแบบฮิวริสติกส์ทำให้ได้เส้นทางการบินทั้ง 7 กรณี

7.2 ผลการสร้างแบบจำลองสำหรับอากาศยานไร้คนขับภายในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช พบว่า เส้นทางที่ประหยัดที่สุดเมื่อจุดที่ 1 เป็นจุดส่ง ได้แก่ เส้นทางที่ 1 (1-8-9-7-4-3-1) และเส้นทางที่ 2 (1-2-1)

โดยจุดที่มีค่าความประหัยมากที่สุดคู่แรก คือ จุดที่ 8, จุดที่ 9 (682.23 เมตร) หากจุดรับเอกสารต่อไป คือ จุดที่ 7, จุดที่ 9 (435.35 เมตร) คู่ต่อไป คือ จุดที่ 4, จุดที่ 7 (323.65 เมตร) และคู่สุดท้าย คือ จุดที่ 3, จุดที่ 4 (346.85 เมตร) เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับสามารถบรรทุกได้ไม่เกิน 5 กิโลกรัม และแต่ละจุดสามารถรับเอกสารได้จุดละ 1 กิโลกรัม ส่งผลให้ต้นทุนในการขนส่งลดลงและใช้เวลาน้อยที่สุด ทำให้สามารถจัดสรรทรัพยากรสำหรับภารกิจของอากาศยานไร้คนขับได้อย่างคุ้มค่า เมื่อใช้ระยะทางสั้นลง เวลาสั้นลง ทำให้สามารถลดขนาดแบตเตอรี่ของอากาศยานไร้คนขับส่งผลให้น้ำหนักเบาขึ้น โดยทำการคำนวณด้วยสูตรของฮิวริสติกส์เพื่อหาค่าความประหัยของเส้นทางในการขนส่งผ่านโปรแกรม Microsoft Excel Solver

8. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้คำนึงถึงโอกาสในการทดสอบรูปแบบเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับระดับภาคสนามในอนาคต จึงได้ข้อเสนอแนะจากการจัดทำงานวิจัยในเรื่องต่าง ๆ ดังนี้ การขยายขอบเขตพื้นที่ทำวิจัย การปรับรูปแบบการบินของอากาศยานไร้คนขับ และการจัดทำโครงการในกรณีที่มีงบประมาณจำกัด เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต้นแบบในการสร้างแบบจำลองเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับ ทำให้มีขอบเขตที่ไม่กว้างขวางมาก ทางคณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าสามารถนำไปต่อยอดและขยายขอบเขตพื้นที่ในการวิจัยต่อไปในอนาคตได้ อีกทั้งยังสามารถปรับรูปแบบเส้นทางการบินให้เป็นรูปแบบอื่นได้ ในกรณีที่อากาศยานไร้คนขับมีมากขึ้นจนเกินขีดความสามารถของรูปแบบ Layered Assignment และสามารถจัดทำโครงการในกรณีที่มีงบประมาณจำกัด ด้วยการลดตำแหน่งจำนวนจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับในจุดที่มีโอกาสถูกใช้งานน้อยเพื่อลดงบประมาณในการติดตั้งตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยานไร้คนขับ

นอกจากนั้น สามารถขยายผลงานวิจัยนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทเมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉินขึ้น เช่น การวางแผนจัดเส้นทางรับส่งยาและเวชภัณฑ์ฉุกเฉินกรณีเกิดอุทกภัย หรือภัยสงคราม ในพื้นที่ที่อันตรายและยากต่อการเข้าถึง เป็นต้น รวมไปถึงนำผลวิจัยไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงนโยบายในบริบทการปฏิบัติงานในภารกิจต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และสามารถใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่ามากที่สุด

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีจากความร่วมมือของบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน และความร่วมมือจากภาควิชาวิศวกรรมอากาศยาน กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทราชธิราชทุกท่านที่กรุณาให้การสนับสนุนทรัพยากรที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ให้สำเร็จด้วยดี หากมีข้อบกพร่องประการใดคณะผู้วิจัยต้องขออภัยมา ณ ที่นี้

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] 112th Congress of United States of America, Public Law 112-95, Feb. 14, 2012. [Online]. Available: <https://www.congress.gov/112/plaws/publ95/PLAW-112publ95.pdf>
- [2] Federal Aviation Administration, *UAS Traffic Management (UTM) Research Transition Team (RTT) Plan*, Version 1.0, 2016. [Online]. Available: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/FAA_NASA_UAS_Traffic_Management_Research_Plan.pdf
- [3] A. Thibbotuwawa, G. Bocewicz, P. Nielsen, and Z. Banaszak, "Unmanned aerial vehicle routing problems: A literature review," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 13, Art. no. 4504, Jun. 2020, doi.org/10.3390/app10134504.

- [4] European Union Aviation Safety Agency, “Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947”, 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0947.pdf>
- [5] Civil Aviation Authority of Malaysia, “Civil Aviation Regulation 2016”, P.U. (A) 97/2016, Malaysia, Mar. 28, 2016. [Online]. Available: <https://legal.airforce.mil.my/images/lawofmalaysia/Civil-Aviation-Regulations-2016.pdf>
- [6] Federal Aviation Administration, *Concept of Operation Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM)*, Version 2.0, 2022. [Online]. Available: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/UTM_ConOps_v2.pdf
- [7] P. Toth and D. Vigo, Eds., *The Vehicle Routing Problem*, Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [8] E. Sunil, et al., "Metropolis: Relating airspace structure and capacity for extreme traffic densities", in *Proceedings of the 11th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 2015)*, Lisbon, Portugal, Jun. 23–26, 2015. [Online]. Available: <https://enac.hal.science/hal-01168662v1/document>
- [9] R. Shrestha, I. Oh, and S. Kim, “A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management”, *Frontiers in Future Transportation*, vol. 2, Art. no. 626935, Apr. 2021, doi.org/10.3389/ffutr.2021.626935.
- [10] International Civil Aviation Organization, “*Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM): A Common Framework with Core Principle for Global Harmonization*”, 2021. [Online]. Available: <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/safety/UA/Documents/UTM%20Framework%20Edition%203.pdf>
- [11] K. Thana, J. Sangsiri, K. Jitt-Aer, and T. Buaphiban, “Development of a GIS-based Bird Map Application for the Royal Thai Air Force’s Aviation Safety Management”, *Engineering and Technology Horizons*, vol. 42, no. 1, Art. no. 420108, March 2025, doi.org/10.55003/ETH.420108.
- [12] L. Sedov and V. Polishchuk, "Centralized and distributed UTM in layered airspace," in *Proceedings of the 8th International Conference on Research in Air Transportation*, Barcelona, Spain, 2018, pp. 1–8. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1DadAYMkZD4HxV6Y2FwbseJ_EF5-ICU5L/view
- [13] K. Thana and J. Sangsiri, “The most efficient route analysis using 3D maps for assistance to aircraft accident victims”, *NKRAFA Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 58–71, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/251204>