



## การออกแบบเบื้องต้นโดยการหาจุดเหมาะสมสำหรับอากาศยานไร้คนขับประเภทขึ้นลงในแนวตั้งแบบตั้งหาง

ลักขมณณ์ สวัสดิ์ดิพล\* ชินภัทร ทิพโยภาส วิศว์ ศรีพวาทกุล และ ทศพล ฉายานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 7778 9868 อีเมล: lucksawatdipon@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.04.004

รับเมื่อ 18 กรกฎาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2562 ตอรับเมื่อ 16 มกราคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 15 เมษายน 2563

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กประเภทขึ้นลงในแนวตั้งรูปแบบตั้งหาง (Tail-sitter VTOL UAV) เป็นหนึ่งในรูปแบบที่ได้รับความนิยม และถูกนำมาศึกษาอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อตอบสนองต่อภารกิจ และเพิ่มขีดความสามารถของอากาศยาน แต่การออกแบบอากาศยานโดยผ่านการตั้งสมมติฐาน และการประมาณน้ำหนักโดยเบื้องต้น จะต้องใช้เวลาในการออกแบบและการทดสอบที่มากขึ้น เนื่องจากต้นแบบที่ได้จากการออกแบบในแต่ละรอบจะมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ส่งผลให้ต้นแบบที่ผ่านการออกแบบมานั้นไม่ใช่ต้นแบบที่มีประสิทธิภาพ (ตัดสินโดยระยะเวลาการบิน) สูงสุด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างระเบียบวิธีการออกแบบเบื้องต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบด้วยการเก็บข้อมูลชุดอุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดมาสร้างเป็นฐานข้อมูล และการลดระยะเวลาในการออกแบบด้วยกระบวนการหาจุดเหมาะสมในกระบวนการการเลือกชุดใบพัด ซึ่งผลจากการทดลองออกแบบอากาศยานบนเงื่อนไข 3 ชุด เพื่อออกแบบอากาศยานที่บินได้นานที่สุดสำหรับแต่ละเงื่อนไข การใช้ระเบียบวิธีการออกแบบร่วมกับกระบวนการหาจุดเหมาะสมรูปแบบ Hooke-Jeeves Pattern Search ทำให้สามารถเลือกชุดอุปกรณ์ (มอเตอร์ ใบพัด และแบตเตอรี่) ในท้องตลาดที่เหมาะสมต่อภารกิจ และสามารถลดระยะเวลาในการออกแบบลงได้เฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเวลาในการหาชุดอุปกรณ์ที่เหมาะสมจากทุกความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น

**คำสำคัญ:** อากาศยานไร้คนขับ ขึ้นลงในแนวตั้งรูปแบบตั้งหาง การออกแบบเบื้องต้น กระบวนการหาจุดเหมาะสมรูปแบบ Hooke-Jeeves Pattern Search



## A Preliminary Design by Using Optimization for Tail-sitter VTOL UAV

Luk Sawatdipon\*, Chinnapat Thipyopas, Vis Sripawadkul and Tossapol Chayanon  
Aerospace Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 7778 9868, E-mail: lucksawatdipon@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.04.004

Received 18 July 2019; Revised 19 November 2019; Accepted 16 January 2020; Published online: 15 April 2020

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Tail-sitter vehicle take-off and landing unmanned aerial vehicle (Tail-sitter VTOL UAV) is a type of aircraft that is receiving a lot of attention and being widely studied today. But a design through initial assumptions and weight estimates will have to spend more time designing and testing because the prototype obtained from the design in each cycle will deviate from the reality. As a result, the designed prototype is not the most efficient prototype (judged by the flight endurance). Studies are aimed to increase its capabilities to fulfill various mission objectives. This study is aimed to create a preliminary tail-sitter design algorithm with optimization to improve designing capabilities using collected data from resources available in the market to make a database and decreasing design time by using optimization in choosing propeller process. Finding the best endurance UAV for every 3 cases of design condition. By using Hooke-Jeeves pattern search optimization method, a result show an algorithm can select the right equipment for a require mission and designing time are decrease up to 55% from the whole time that used to compare every possible solution.

**Keywords:** VTOL UAV, Tail-sitter, Preliminary Design, Hooke-Jeeves Pattern Search Optimization

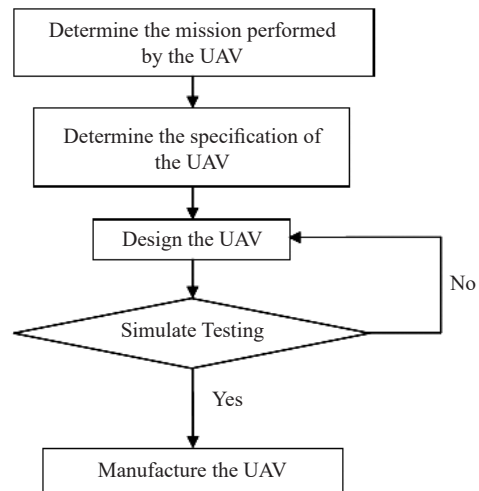
## 1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของอากาศยานให้สามารถตอบสนองต่อภารกิจต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอากาศยานประเภทขึ้นลงในแนวตั้ง (VTOL) เป็นหนึ่งในประเภทของอากาศยานที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยหนึ่งในรูปแบบของอากาศยานที่ได้รับความนิยม และถูกนำมาศึกษาอย่างแพร่หลายคือ อากาศยานไร้คนขับประเภทขึ้นลงในแนวตั้งรูปแบบตั้งหาง (Tail-sitter VTOL UAV) ซึ่งมีลักษณะเหมือนอากาศยานปีกตรึงรูปแบบปีกบินตั้งรูปที่ 1 โดยได้ชื่อมาจากวิธีการทำงานของอากาศยานซึ่งนำเครื่องตั้งตรงในแนวตั้ง ใช้ส่วนปลายหางของเครื่องในการตั้ง การนำเครื่องขึ้นจะอาศัยชุดใบพัดสร้างแรงยก เมื่อถึงความสูงที่เหมาะสมจะทำการพลิกเครื่องให้อยู่ในแนวระนาบเพื่อบินไปข้างหน้า โดยใช้ปีกเป็นส่วนที่สร้างแรงยกแทนชุดใบพัด Wingtra [1] ได้นำเสนอให้เห็นถึงความเหมาะสมต่อการนำอากาศยานรูปแบบนี้ไปใช้งานในพื้นที่จริงด้วยขนาดที่เล็ก น้ำหนักที่เบา และกลไกที่ไม่ซับซ้อน ใน ค.ศ. 1988 มีการศึกษาโดย Nixon [2] พบว่า มุมบิดของใบพัดที่เหมาะสมสำหรับการบินลอยนึ่งคือ มุม  $20^\circ$  และมุมที่มากกว่า  $45^\circ$  สำหรับการบินไปข้างหน้า รวมถึงมีการศึกษาใน ค.ศ. 2012 ของ Zawawi, Grondin และ Moschetta [3] ที่ได้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบใบพัดสำหรับอากาศยานรูปแบบตั้งหางผ่านการนำกระบวนการจุดเหมาะสมมาร่วมในกระบวนการออกแบบใบพัด

ทั้งสองงานวิจัยในข้างต้นที่มีความต้องการในการออกแบบใบพัดสำหรับอากาศยานรูปแบบนี้ ซึ่งแสดงถึงความสำคัญของใบพัดต่ออากาศยานไร้คนขับรูปแบบตั้งหางในกระบวนการออกแบบอากาศยาน แต่ในแง่ของการสร้างอากาศยานต้นแบบโดยทั่วไปที่อาศัยการซื้อสินค้าที่มีขายในท้องตลาดเป็นหลัก ปัญหาจึงเกิดจากการที่ไม่สามารถออกแบบใบพัดได้ตามต้องการ การเลือกใบพัดที่มีในท้องตลาดจึงกลายเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องแน่ใจว่าใบพัดที่ถูกเลือกมาเหมาะสมกับลักษณะของการบินทั้งสองช่วงการบิน ไม่ใช่เหมาะสมเพียงช่วงการบินใดช่วงการบินหนึ่ง รวมถึงปัญหา



รูปที่ 1 อากาศยานไร้คนขับประเภทขึ้นลงในแนวตั้ง รูปแบบตั้งหาง (Tail-sitter VTOL UAV)



รูปที่ 2 ขั้นตอนการออกแบบอากาศยานไร้คนขับ [4]

ของการออกแบบอากาศยานโดยไม่มีฐานข้อมูลของอุปกรณ์ในท้องตลาด (มอเตอร์ แบตเตอรี่) ซึ่งส่งผลให้หนักของต้นแบบไม่เป็นไปตามการคำนวณ ซึ่งในปี 2012 Ling [4] ได้นำเสนอระเบียบวิธีการออกแบบอากาศยานไร้คนขับรูปแบบตั้งหางไว้ดังรูปที่ 2

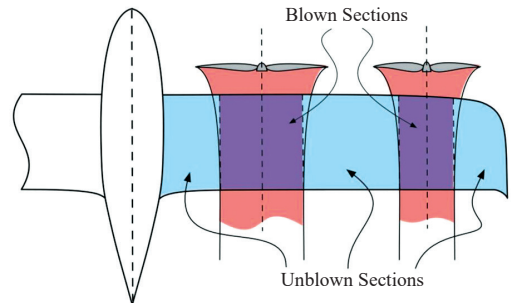
จากระเบียบวิธีการในข้างต้น ถ้าทำการออกแบบอากาศยานโดยผ่านการตั้งสมมติฐาน และการประมาณน้ำหนักโดยเบื้องต้น จะต้องใช้เวลาในการออกแบบและการทดสอบที่มากขึ้น เนื่องจากต้นแบบที่ได้จากการออกแบบในแต่ละรอบจะมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงด้วยปัจจัยสองปัจจัย 1) การขาดฐานข้อมูลของอุปกรณ์ (ฐานข้อมูลมอเตอร์ แบตเตอรี่ และใบพัด) ที่มีส่วนสำคัญในกระบวนการออกแบบ ถ้าออกแบบอากาศยานก่อน และ

เลือกซื้ออุปกรณ์ภายหลัง จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการออกแบบ และ 2) ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ การออกแบบโดยการประมาณค่าหลายๆ ค่านี้ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ อาทิ การคำนวณพื้นที่ปีกของอากาศยานขึ้นกับน้ำหนักรวมของอากาศยานแต่เมื่อได้พื้นที่ปีกใหม่ย่อมส่งผลให้น้ำหนักรวมของอากาศยานเปลี่ยนไป ไม่ตรงกับพื้นที่ของปีกที่ได้ทำการคำนวณไว้ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้ต้นแบบที่ผ่านการออกแบบมานั้นมีคุณสมบัติที่คลาดเคลื่อนจากการคำนวณหรือความต้องการ (ตัดสินใจโดยระยะเวลาการบิน) สูงสุด ดังนั้นถ้าสามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ย่อมส่งผลให้สามารถสร้างต้นแบบที่มีความมั่นใจได้ว่าจะจะเป็นไปตามความต้องการอย่างแน่นอน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสร้างระเบียบวิธีการออกแบบเบื้องต้นสำหรับอากาศยานไร้คนขับประเภทขึ้นลงในแนวตั้งรูปแบบตั้งหาง (An Algorithm of Preliminary Design for Tail-sitter VTOL UAV) เพื่อให้สอดคล้องกับปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบอย่างครอบคลุม เช่น การนำชุดอุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดมาเป็นฐานข้อมูล การเลือกชุดใบพัดที่เหมาะสมผ่านกระบวนการหาจุดเหมาะสมทำให้ลดระยะเวลาในการออกแบบและได้ต้นแบบที่ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากที่กล่าวในข้างต้นการสร้างแรงยกใน 2 รูปแบบการบิน (การบินแบบลอยตัวและการบินไปข้างหน้า) มีต้นกำเนิดของแรงยกที่ต่างกันจึงต้องเกิดการออกแบบแยกกัน สำหรับ 2 ลักษณะการบินนี้ รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ชุดใบพัดที่เหมาะสมสำหรับการบินไปข้างหน้าและการบินลอยตัวเป็นชุดใบพัดที่ต่างกัน เนื่องจากผลของความเร็วสัมพันธ์ที่กระทบต่อหน้าใบพัด แต่ชุดใบพัดที่อยู่บนอากาศยานมีได้เพียงชุดเดียว จึงต้องหาชุดใบพัดที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำการบินทั้งใน 2 รูปแบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลกระทบจากใบพัดต่อปีกเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการเลือกชุดใบพัด และกำหนดขนาดปีกของอากาศยานตามรูปที่ 1 การติดตั้งชุดใบพัดไว้หน้าปีกนั้นจะส่งผลให้ลมที่เกิดจากการหมุนของใบพัดมีความเร็วสูงกว่าความเร็วของ



รูปที่ 3 พื้นที่ปีกและผลกระทบจากลมเป่าหลังใบพัด

กระแสอากาศอิสระ จากขั้นตอนที่ถูกพัฒนาโดย Jameson [5] ผ่านทฤษฎีโมเมนตัม แรงจากใบพัดสามารถคำนวณร่วมกับทฤษฎีแผ่นกระตุ้น (Actuator Disk) จากแรงขับ ( $T$ ) ความเร็วของกระแสอากาศอิสระ ( $V_\infty$ ) ความเร็วของลมเป่าหลังชุดใบพัด ( $V_{jet}$ ) และพื้นที่หน้าตัดของแผ่นกระตุ้น ( $S_p$ ) ดังสมการที่ (2)

$$\mu = \frac{V_\infty}{V_{jet}} = \sqrt{1 - \frac{T}{0.5\rho V_{jet}^2 S_p}} \quad (1)$$

และสามารถคำนวณความกว้างของลมเป่าหลังใบพัดที่เข้าสู่ช่วงพัฒนาเต็มที่ได้ที่แสดงในรูปที่ 3 ร่วมกับความกว้างของใบพัด ( $b_{pc}$ ) ผ่านสมการที่ (2)

$$b_{pc} = b_p \sqrt{\frac{1+\mu}{2}} \quad (2)$$

จุดสำคัญของการทำให้ต้นแบบมีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดคือ การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมากที่สุดในอากาศยาน และมีผลต่อประสิทธิภาพของอากาศยานโดยตรง MIT Laboratory [6] ได้อธิบายประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของมอเตอร์ไฟฟ้า แรงต้านทานไฟฟ้าของมอเตอร์ ( $R$ ) กระแสไฟฟ้า ณ ภาระกรรมเท่าศูนย์ ( $i_0$ ) ค่าคงที่ความเร็วของมอเตอร์ ( $kv$ ) เป็นไปดังสมการที่ (3)

$$\eta_m = \left[ 1 - \frac{i_0 R}{v - \Omega/kv} \right] \frac{\Omega}{vkv} \quad (3)$$

จากที่กล่าวมาในข้างต้นสามารถแก้ไข และพัฒนาการออกแบบอากาศยานให้แม่นยำ และได้ต้นแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้แต่ความซับซ้อนในการออกแบบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาสำหรับการออกแบบเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน การนำกระบวนการหาจุดเหมาะสม (Optimization) เข้ามาร่วมระหว่างขั้นตอนการออกแบบจะสามารถลดระยะเวลาในการออกแบบลงได้ โดยรูปแบบของกระบวนการที่ใช้ในการหาจุดเหมาะสมมีหลากหลายรูปแบบ แต่สำหรับงานวิจัยนี้ รูปแบบของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดคือ รูปแบบ Direct Search [7] เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ไม่ต้องการข้อมูลความซับซ้อนการคำนวณโดยรูปแบบ Direct Search ที่นำมาพิจารณา คือ วิธี Evolutionary และ Hooke-Jeeves Pattern Search

Evolutionary: พัฒนาโดย G.E.P. Box วิธีการนี้ต้องการจุดข้อมูลจำนวน  $2^N+1$  จะเป็นจุด ณ มุมของกล่องขนาด  $N$  มิติและเป็นจุดกลางอีกหนึ่งจุดโดยผลของคำตอบในทุกๆ จุดจะถูกเปรียบเทียบเพื่อหาจุดที่ดีที่สุดและจุดๆ นั้นจะเป็นจุดเริ่มต้นในการคำนวณรอบถัดไป

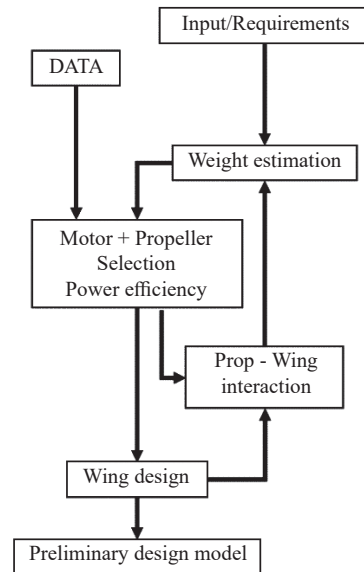
Hooke-Jeeves Pattern Search เป็นวิธีที่รวมการเดินสำรวจและการเดินเพื่อหาคำตอบโดยการเดินสำรวจ จะทำการหาจุดที่ดีที่สุดรอบจุดเริ่มต้น และการเดินหาคำตอบ จะทำการเดินแบบก้าวกระโดดไปในทิศทางของจุดที่ดีที่สุดจากการเดินสำรวจ ในปัญหาจำนวน  $N$  มิติ จะต้องการข้อมูลจำนวน  $N$  ระบาย

## 2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ ทำการเขียนระเบียบวิธีการการออกแบบเบื้องต้นสำหรับอากาศยานประเภทตั้งหาง เก็บฐานข้อมูลและคำนวณบนโปรแกรม Matlab

### 2.1 ผังระเบียบวิธีการออกแบบ

การออกแบบระเบียบวิธีการออกแบบอากาศยานรูปแบบตั้งหางเริ่มจากการนำปัจจัยที่มีผลต่ออากาศยานมาสร้างความสัมพันธ์ต่อกันและกันจึงได้ความสัมพันธ์ในการออกแบบ



รูปที่ 4 ผังระเบียบวิธีการออกแบบอากาศยานเบื้องต้น

ตามรูปที่ 4 แสดงถึงวิธีการออกแบบเบื้องต้นของอากาศยานแบบปีกตรึงที่เพิ่มรายละเอียด จะสังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละกลุ่มกระทบต่อกันและกัน ดังนั้นการออกแบบในระเบียบวิธีนี้จึงอยู่ในรูปแบบของการวนซ้ำ (Loop-design) เพื่อที่จะได้คำตอบที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยส่วนสำคัญในระเบียบ วิธีการออกแบบมี 7 ส่วนด้วยกัน ดังนี้

#### 2.1.1 ค่าเริ่มต้น

งานวิจัยนี้มีความตั้งใจที่จะปรับการกรอกค่าเริ่มต้นให้อยู่ในรูปแบบที่ผู้ใช้สามารถให้ข้อมูลได้ง่ายโดยการเก็บข้อมูลเพียงน้ำหนักของภาระกรรม ( $W_p$ ) ความกว้างของปีกและลักษณะของภารกิจ ซึ่งลักษณะของภารกิจจะเป็นส่วนที่บ่งบอกถึงความเร็วในการบิน ( $V_c$ ) และอัตราส่วนระยะเวลาการบินต่อระยะเวลาการบินทั้งหมด ( $H/T$ )

#### 2.1.2 การประมาณน้ำหนัก

การประมาณน้ำหนักรวมของอากาศยานเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการออกแบบอากาศยาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแบ่งลักษณะของน้ำหนักออกเป็นทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 น้ำหนักที่คงที่ในทุกรอบของการออกแบบนั้นคือน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ทุกอากาศยานต้องใช้ เช่น Control

Board, Pitot Tube เป็นต้น ส่วนที่ 2 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามอุปกรณ์ น้ำหนักส่วนนี้ ได้แก่ น้ำหนักของแบตเตอรี่และมอเตอร์ไฟฟ้า และส่วนที่ 3 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบการออกแบบโดยน้ำหนักของส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสมการที่ขึ้นกับตัวแปรที่จะเปลี่ยนไปในแต่ละรอบ ได้แก่ น้ำหนักของปีก [8] และใบพัด ดังสมการที่ (4), (5)

$$W_{wing} = 0.03(N_Z w_0)^{0.826} A^{0.28} S_w^{0.19} (1 + \lambda)^{0.21} tc^{0.14} \quad (4)$$

$$W_{prop} = 0.0007x^3 - 0.0132x^2 + 0.1463x - 0.3632 \quad (5)$$

### 2.1.3 การเก็บข้อมูล

หัวใจสำคัญของงานวิจัยคือ การสร้างฐานข้อมูลเพื่อความแม่นยำของต้นแบบที่จะถูกออกแบบบนฐานข้อมูลนี้ ข้อมูลที่เก็บมี 3 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลใบพัด ข้อมูลมอเตอร์ไฟฟ้า และข้อมูลแบตเตอรี่ โดยมีเกณฑ์สำคัญในการเลือกเก็บข้อมูลคือ ต้องเป็นสินค้าที่สามารถหาซื้อในท้องตลาด

ข้อมูลใบพัดมีเป้าหมายหลักในการนำไปใช้คือ การคำนวณพลังงานสำหรับการสร้างแรงขับ (T) โดยข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลจากผลการทดลองของผู้ผลิต (APC Propeller) ข้อมูลของใบพัดทั้งหมด 99 ใบ ที่ถูกเก็บเป็นฐานข้อมูล ได้แก่ พลังงาน (Pwr) และแรงขับในแต่ละความเร็วปะทะ (V) ในแต่ละความเร็วรอบของการหมุน (RPM)

ข้อมูลมอเตอร์ไฟฟ้า นอกเหนือจากข้อมูลน้ำหนักที่สำคัญต่อการประเมินน้ำหนักรวมของอากาศยานอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ ข้อมูลสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าตามสมการที่ (3) เช่นเดียวกับข้อมูลแบตเตอรี่ซึ่งจะถูกเก็บข้อมูลของความต่างศักย์ (V) จำนวนเซลล์ (Cell) และน้ำหนัก

### 2.1.4 การออกแบบปีก

พื้นที่และขนาดของปีกจะขึ้นตรงต่อน้ำหนักรวมของอากาศยาน ในกรณีออกแบบอากาศยานรูปแบบตั้งหางตามสมการที่ (1) และสมการที่ (2) แรงยกและแรงต้านที่เกิดจากลมเป่าหลังใบพัดจะมีผลต่อแรงยก ( $L_{req}$ ) และแรงขับที่อากาศยานต้องสร้าง ดังสมการที่ (6)–(8)

$$L_{req} = (W_{AUW} \times 9) - (Exlift \times N_{motor}) \quad (6)$$

$$S_{cruise} = 2L_{req} / 1.225V_c^2 C_L \quad (7)$$

$$S_{wing} = S_{cruise} + S_{jet} \quad (8)$$

โดยที่  $C_L$  คือ สัมประสิทธิ์แรงยกของปีกที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศ ( $C_l$ ) และอัตราส่วนความกว้างและความยาวของปีกเครื่องบิน ( $AR$ ) ดังสมการที่ (9)

$$C_L = C_l \left( \frac{AR}{AR + 2} \right) \quad (9)$$

### 2.1.5 การเลือกใบพัด

เป้าหมายของการเลือกใบพัดคือ การหาใบพัดที่สามารถสร้างแรงขับที่ต้องการ ( $T_{req}$ ) โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งแรงขับที่ต้องการในระหว่าง 2 ช่วงการบินจะมีค่าที่แตกต่างกัน ดังสมการที่ (10), (11)

$$T_{req} = (W_{AUW} \times g) + Exdrag : Hover \quad (10)$$

$$T_{req} = Drag + Exdrag : Cruise \quad (11)$$

หลังจากทราบแรงขับที่ต้องการสามารถคำนวณพลังงานที่จำเป็นในการหมุนใบพัดตามรูปที่ 5

### 2.1.6 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างใบพัดและปีก

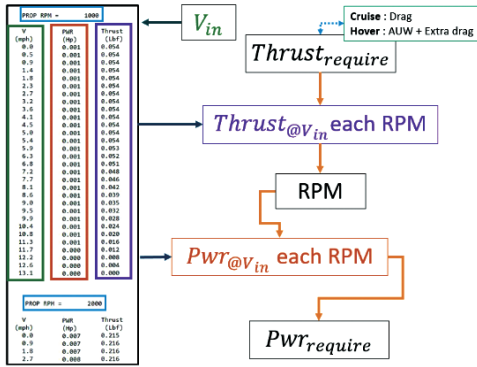
ตามสมการที่ (1) สมการที่ (2) และข้อมูลที่ได้จากกระบวนการเลือกใบพัดร่วมกับขนาดความกว้างของปีก (Chord) สามารถคำนวณแรงยก และแรงต้านที่เพิ่มขึ้นบนพื้นที่ปีกที่ถูกลมเป่า ( $S_{jet}$ ) และความเร็วของลมเป่า ( $V_{jet}$ ) ดังสมการที่ (12)–(14)

$$S_{jet} = C \times b_p \quad (12)$$

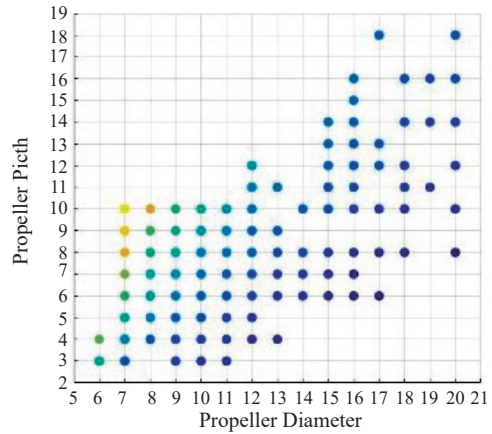
$$Exlift = \frac{1}{2} \rho V_{jet}^2 S_{jet} C_L \quad (13)$$

$$Exdrag = 1 \frac{1}{2} \rho V_{jet}^2 S_{jet} C_D \quad (14)$$





รูปที่ 5 ผังการคำนวณพลังที่ใบพัดต้องการ



(ก)

2.1.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า

จากกระบวนการเลือกใบพัด ข้อมูลของพลังงานสำหรับการหมุนใบพัดนั้นเป็นพลังปลายทางที่ยังไม่ผ่านการรวมพลังที่สูญเสียไประหว่างมอเตอร์ไฟฟ้า โดยสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ทั้งหมดผ่านค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า ( $\eta_m$ ) ดังสมการที่ (3) และ (15), (16)

$$P_{cruise} = P_{prop_c} / \eta_m \tag{15}$$

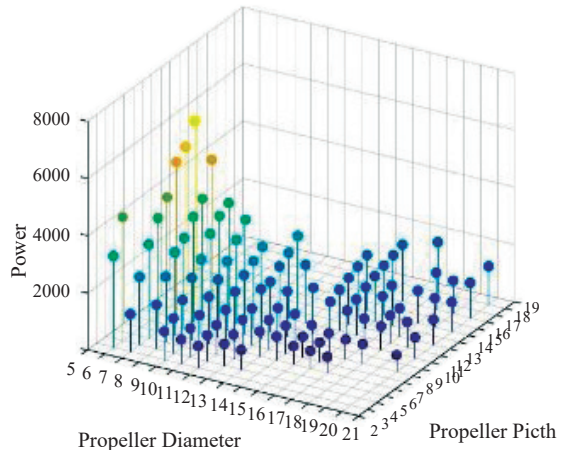
$$P_{hover} = P_{prop_h} / \eta_m \tag{16}$$

พลังงานรวมของอากาศยานแปรตามอัตราส่วนระยะเวลาการบินของหนึ่งต่อระยะเวลาการบินทั้งหมด ( $H/T$ ) ดังสมการที่ (17)

$$P_{total} = [(H/T)P_{hover}] + [(1-H/T)P_{cruise}] \tag{17}$$

2.2 กระบวนการหาจุดเหมาะสมแบบ Direct Search

หนึ่งในเป้าหมายของงานวิจัยคือ การลดระยะเวลาในการออกแบบ โดยพื้นฐานคำตอบที่ดีที่สุดย่อมเกิดจากการเปรียบเทียบคำตอบทั้งหมด ซึ่งการนำกระบวนการหาจุดเหมาะสมเข้ามาช่วยในระเบียบวิธีการออกแบบจะสามารถลดระยะเวลาในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ ในงานวิจัยนี้จะนำกระบวนการหาจุดเหมาะสมมาใช้ในขั้นตอนการเลือกใบพัด เนื่องจากการเปรียบเทียบใบพัด 99 ใบต่อหนึ่งมอเตอร์ไฟฟ้า



(ข)

รูปที่ 6 (ก) การกระจายตัวของข้อมูลใบพัด (ข) ผลพลังงานที่ต้องการของข้อมูลใบพัดแต่ละจุด

และต่อหนึ่งแบตเตอรี่นั้นส่งผลต่อจำนวนของกรณีที่จะต้องคำนวณเป็นอย่างมาก

การคัดเลือกรูปแบบของกระบวนการหาจุดเหมาะสมมีเกณฑ์ที่เป็นไปตามลักษณะของฐานข้อมูล จากรูปที่ 6 (ก) แสดงให้เห็นถึงการกระจายของข้อมูลใบพัดที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบไม่ต่อเนื่องและมีระยะห่างของจุดข้อมูลไม่คงที่ ซึ่งส่งผลให้คำตอบของชุดข้อมูลไม่สามารถแสดงในลักษณะของพื้นผิวได้ดังรูปที่ 6 (ข)

ด้วยลักษณะของข้อมูลที่มีการกระจายตัวแบบไม่คงที่

จึงไม่สามารถนำกระบวนการหาจุดเหมาะสมมาใช้โดยไม่ผ่านการปรับปรุง ซึ่งสองส่วนที่ทำการปรับปรุงคือ การข้ามจุดที่ไม่มีข้อมูล และการสรุปคำตอบของการหาจุดเหมาะสม โดยทำการปรับปรุงกระบวนการทั้งในวิธี Evolutionary และ Hooke-Jeeves Pattern Search

การปรับปรุง Evolutionary ได้ทำการเปลี่ยนรูปแบบการเดิน จากการสำรวจจุด ณ มุมสี่จุดเป็นการสำรวจจุดบนล่าง ซ้าย และขวาแทน รวมถึงการข้ามจุดที่ขาดไปของข้อมูล ตามทิศทางจากจุดเริ่มต้นต่อจุดที่ขาดไปเพื่อเลือกจุดข้อมูลใหม่ สรุปวิธีการดังนี้

ขั้นที่ 1: เลือกค่า  $(x_0, y_0)$  3 คู่อันดับและตั้งค่า  $i = 3$

ขั้นที่ 2: ถ้า  $i > 3$  เปรียบเทียบหาค่า  $f_{min}(i)$  ที่น้อยที่สุดและสิ้นสุดการหาจุดเหมาะสม ถ้าไม่ ตั้งค่าเริ่มต้น  $(x_0(i), y_0(i))$

ขั้นที่ 3: เปรียบเทียบคำตอบทั้ง 5 จุดเพื่อหาค่าที่ต่ำที่สุด  
จุดที่ 1.  $f(x_0, y_0)$

จุดที่ 2.  $f(x_0 + 1, y_0)$  ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล  $x = x + 1$

จุดที่ 3.  $f(x_0, y_0 + 1)$  ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล  $y = y + 1$

จุดที่ 4.  $f(x_0 - 1, y_0)$  ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล  $x = x - 1$

จุดที่ 5.  $f(x_0, y_0 - 1)$  ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล  $y = y - 1$

ขั้นที่ 4: ถ้า  $f_{min} = f(x_0, y_0)$  ไปที่ขั้นที่ 2 ถ้าไม่ กำหนดให้  $(x_0, y_0) = (x_{min}, y_{min})$  และไปขั้นที่ 3

วิธีการ Hooke-Jeeves Pattern Search มีการปรับปรุงการเดินสำรวจให้สามารถข้ามจุดที่ขาดไปของข้อมูลได้ และในขั้นตอนการเดินเพื่อหาค่าคำตอบสามารถกระโดดข้ามจุดตามทิศทางจากที่กำหนดจากการเดินสำรวจ

ขั้นที่ 1: เลือกค่า  $(x_0, y_0)$  3 คู่อันดับและตั้งค่า  $i = 3$

ขั้นที่ 2: ถ้า  $i > 3$  เปรียบเทียบหาค่า  $f_{min}(i)$  ที่น้อยที่สุดและสิ้นสุดการหาจุดเหมาะสม ถ้าไม่ ตั้งค่าเริ่มต้น  $(x_0(i), y_0(i))$

ขั้นที่ 3: คำนวณหาผลของคำตอบ

$$f = f(x_0, y_0)$$

$$f^+ = f(x_0 + 1, y_0) \text{ ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล } x = x + 1$$

$$f^- = f(x_0 - 1, y_0) \text{ ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล } x = x - 1$$

ขั้นที่ 4: หาค่าต่ำที่สุด  $f_{min} = \min(f, f^+, f^-)$  และกำหนดค่า  $x_N$  ให้สอดคล้องกับค่า  $f_{min}$

ขั้นที่ 5: คำนวณหาผลของคำตอบ

$$f = (x_N, y_0)$$

$$f^+ = (x_N, y_0 + 1) \text{ ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล } y = y + 1$$

$$f^- = (x_N, y_0 - 1) \text{ ถ้าเป็นจุดที่ขาดข้อมูล } y = y - 1$$

ขั้นที่ 6: หาค่าต่ำที่สุด  $f_{min} = \min(f, f^+, f^-)$  และกำหนดค่า  $y_N$  ให้สอดคล้องกับค่า  $f_{min}$

ขั้นที่ 7: ถ้า  $(x_N, y_N) = (x_0, y_0)$  ไปขั้นที่ 2

ขั้นที่ 8: กำหนด  $(x_p, y_p) = 2(x_N, y_N) - (x_0, y_0)$

ถ้า  $(x_p, y_p)$  อยู่ในจุดที่ขาดข้อมูล ทำการข้ามจุดตามเงื่อนไขของ  $x_N$  ต่อ  $x_0$  และ  $y_N$  ต่อ  $y_0$  และทำการปรับค่า  $x_N, x_0, y_N$  และ  $y_0$  ไปหนึ่งหน่วย

ขั้นที่ 9: หาค่า  $f(x_p, y_p)$

ถ้า  $f(x_p, y_p) < f(x_N, y_N)$  กำหนดให้  $(x_0, y_0) = (x_p, y_p)$  และไปขั้นที่ 3

ถ้า  $f(x_p, y_p) > f(x_N, y_N)$  กำหนดให้  $(x_0, y_0) = (x_N, y_N)$  และไปขั้นที่ 3

### 3. ผลการทดลอง

ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการออกแบบทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) ระเบียบวิธีการร่วมกับการเปรียบเทียบทุกจุด 2) ระเบียบวิธีการร่วมกับการกระบวนการ Evolutionary และ 3) ระเบียบวิธีการร่วมกับการกระบวนการ Hooke-Jeeves Pattern Search โดยทำการทดลองบนฐานข้อมูลแบตเตอรี่จำนวน 7 ก้อน และมอเตอร์ไฟฟ้าจำนวน 38 ลูก ตามเงื่อนไข 3 ชุด โดยแนวคิดของเงื่อนไขการทดลองทั้งสามชุดสื่อถึงตัวแทนของขนาดของอากาศยานที่ต่างกันตั้งแต่ เล็ก กลาง และใหญ่ ส่วนในกลุ่มตัวแปรอื่นๆ เป็นการสุ่มค่าเพื่อให้เกิดความหลากหลายของต้นแบบเพื่อศึกษาถึงระยะเวลาการคำนวณต่อชุดตัวแปรต้นที่แตกต่างกัน

เงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 1:  $W_p = 100 \text{ g}$ ,  $\text{Span}(b) = 1 \text{ m}$ ,  $V_c = 10 \text{ m/s}$ ,  $H/T = 0.1$

เงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 2:  $W_p = 700 \text{ g}$ ,  $\text{Span}(b) = 1.2 \text{ m}$ ,  $V_c = 10 \text{ m/s}$ ,  $H/T = 0.68$

เงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 3:  $W_p = 500 \text{ g}$ ,  $\text{Span}(b) = 2 \text{ m}$ ,  $V_c = 11 \text{ m/s}$ ,  $H/T = 0.2$



### 3.1 เปรียบค่าตอบของระเบียบวิธีการ

เปรียบเทียบผลค่าตอบที่ดีที่สุด 5 อันดับแรก ของแต่ละระเบียบวิธี โดยใช้ความสามารถในการทำระยะเวลาการบินเป็นตัวตัดสินลำดับ

3.1.1 ผลค่าตอบที่ดีที่สุด 5 อันดับ ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 1

ผลของการใช้ระเบียบวิธีการออกแบบจากตารางที่ 1-3 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการนำกระบวนการหาจุดเหมาะสมมาใช้จะให้ค่าตอบที่แตกต่างจากการเปรียบเทียบผลจากทุกความเป็นไปได้ เนื่องจากกระบวนการหาจุดเหมาะสมจะหาใบพัดที่ดีที่สุดเพียงหนึ่งใบสำหรับมอเตอร์หนึ่งตัว ต่างจากการเปรียบเทียบทุกจุด เช่น ลำดับที่ 1 และลำดับที่ 3 ของตารางที่ 1 ที่ได้คำตอบมาจากแบตเตอรี่และมอเตอร์ตัวเดียวกัน

**ตารางที่ 1** ผลค่าตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับการเปรียบเทียบทุกจุดตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 1

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	68.70	1,375.80	7	14	13×6
2	68.40	1,380.00	7	6	13×6
3	65.30	1,375.80	7	14	13×7
4	65.00	1,380.00	7	6	13×7
5	63.10	1,406.10	7	30	11×5

**ตารางที่ 2** ผลค่าตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Evolutionary ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 1

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	68.70	1,357.80	7	14	13×6
2	68.40	1,380.00	7	6	13×6
3	62.40	1,412.20	7	30	12×4
4	58.40	1,636.00	7	8	15×7
5	52.40	1,805.20	7	17	17×8

**ตารางที่ 3** ผลค่าตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Hooke-Jeeves Pattern ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 1

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	68.70	1,375.80	7	14	13×6
2	68.40	1,380.00	7	6	13×6
3	63.10	1,406.10	7	30	11×5
4	58.40	1,636.00	7	8	15×7
5	53.60	1,793.60	7	19	19×11

**ตารางที่ 4** ผลค่าตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับการเปรียบเทียบทุกจุดตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 2

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	28.30	1,973.90	7	30	13*4
2	26.50	2,230.90	7	8	17*6
3	25.90	2,215.20	7	8	16*7
4	25.40	2,391.70	7	17	20*8
5	24.80	2,244.10	7	8	18*8

3.1.2 ผลค่าตอบที่ดีที่สุด 5 อันดับ ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 2

ความแตกต่างของการใช้กระบวนการหาจุดเหมาะสมจากตารางที่ 5 และตารางที่ 6 กับการเปรียบเทียบค่าตอบทุกจุดจากตารางที่ 4 มีแนวโน้มเช่นเดียวกันจากข้อ 3.1.1 ที่จะมีค่าตอบแตกต่างกันจากการใช้มอเตอร์ตัวเดียวกันแต่ต่างใบพัด

3.1.3 ผลค่าตอบที่ดีที่สุด 5 อันดับ ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 3

ผลจากกระบวนการหาจุดเหมาะสมรูปแบบ Evolutionary จากตารางที่ 8 และกระบวนการหาจุดเหมาะสมรูปแบบ Hooke-Jeeves Pattern Search จากตารางที่ 9 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการหาค่าตอบที่แตกต่างกัน และแตกต่างจากตารางที่ 7 ซึ่งผลของความสามารถจะแปรผกผันกับระยะเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณตามตารางที่ 10

**ตารางที่ 5** ผลคำตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Evolutionary ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 2

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	26.50	2,230.90	7	8	17*6
2	23.70	1,989.70	7	14	17*6
3	22.00	1,994.10	7	30	15*6
4	22.00	2,238.50	7	36	15*6
5	21.70	2,344.80	7	38	13*4

**ตารางที่ 8** ผลคำตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Evolutionary ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 3

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	59.00	1,790.40	7	30	13*4
2	57.50	2,038.80	7	8	16*6
3	51.50	1,793.20	7	14	16*6
4	51.50	2,207.20	7	17	17*12
5	49.80	2,028.30	7	33	13*4

**ตารางที่ 6** ผลคำตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Hooke-Jeeves Pattern ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 2

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	24.80	2,244.10	7	8	18*8
2	23.70	1,989.70	7	14	17*6
3	22.00	1,994.10	7	30	15*6
4	22.00	2,238.50	7	36	15*6
5	21.70	2,344.80	7	38	13*4

**ตารางที่ 9** ผลคำตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Hooke-Jeeves Pattern ตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 3

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	59.00	1,790.40	7	30	13*4
2	57.50	2,038.80	7	8	16*6
3	54.20	2,221.90	7	17	18*11
4	51.50	1,793.20	7	14	16*6
5	48.10	2,038.70	7	36	13*7

**ตารางที่ 7** ผลคำตอบของระเบียบวิธีการร่วมกับการเปรียบเทียบทุกจุดตามเงื่อนไขของอากาศยานชุดที่ 3

ลำดับ	ระยะเวลาการบิน (นาท)	น้ำหนัก (กรัม)	แบตเตอรี่ (ลำดับที่)	มอเตอร์ (ลำดับที่)	ใบพัด (นิ้ว)
1	59.00	1,790.40	7	30	13*4
2	57.50	2,038.80	7	8	16*6
3	54.20	2,221.90	7	17	18*11
4	52.00	1,790.40	7	30	13*6
5	51.90	2,056.2	7	8	17*6

**ตารางที่ 10** ระยะเวลาในการหาคำตอบของแต่ละกระบวนการ

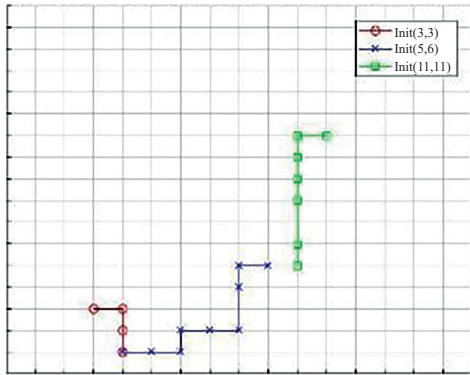
รูปแบบ	เงื่อนไขที่ 1 (นาท)	เงื่อนไขที่ 2 (นาท)	เงื่อนไขที่ 3 (นาท)	เฉลี่ย (นาท)
ระเบียบวิธีการร่วมกับการเปรียบเทียบทุกจุด	78.73	74.72	74.40	75.95
ระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ EVOLUTIONARY	62.24	50.42	53.41	55.36
ระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Hooke-Jeeves Pattern	40.87	29.74	30.05	33.55

### 3.2 ประสิทธิภาพของกระบวนการหาจุดเหมาะสม

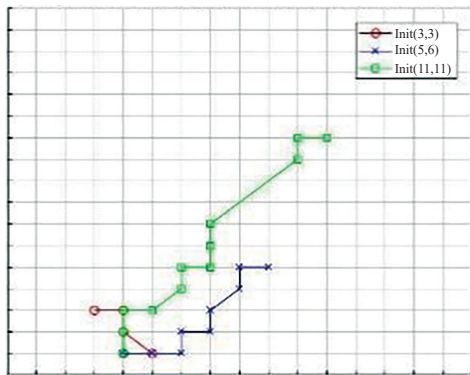
ประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการและกระบวนการหาจุดเหมาะสม นอกจากความแม่นยำของคำตอบ ระยะคือ หนึ่งในปัจจัยสำคัญเช่นเดียวกัน ความแตกต่างของระยะเวลาเกิดได้

จากทั้งรูปแบบการเดินของกระบวนการ และความซับซ้อนของกระบวนการ ซึ่งมีลักษณะของเดินหาคำตอบดังรูปที่ 7 (ก) และ 7 (ข)

จากตารางที่ 10 ความแตกต่างของระยะเวลาในการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 (ก) ลักษณะการเดินทางหาคำตอบของรูปแบบ Evolutionary (ข) ลักษณะการเดินทางหาคำตอบของรูปแบบ Hooke-Jeeves Pattern Search

คำนวณ ระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Evolutionary สามารถลดระยะเวลาได้ 27.11% และระเบียบวิธีการร่วมกับกระบวนการ Hooke-Jeeves Pattern สามารถลดระยะเวลาลงได้ถึง 55.83% และอีกหนึ่งข้อสังเกตที่ได้จากตารางที่ 10 คือ ระยะเวลาในการคำนวณของสามกระบวนการมีอัตราส่วนต่อกันและกันใกล้เคียงกันในทุกๆ เงื่อนไข ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดจากผลของน้ำหนักที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขที่มีส่วนในการลดกรอบความเป็นไปได้ (เช่น น้ำหนักมากขึ้นทำให้สามารถตัดมอเตอร์ตัวเล็กๆ ออกได้) จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของเวลาที่ใช้ในการออกแบบของแต่ละกระบวนการจะมีค่าใกล้เคียงผลจากตารางนี้เสมอ (ในกรณี

ของการใช้คอมพิวเตอร์ตัวชุดเดียวกัน)

#### 4. สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอการสร้างระเบียบวิธีการออกแบบเบื้องต้นสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบตั้งหางพบว่า การรวบรวมความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ให้เป็นระบบร่วมกับการนำกระบวนการหาจุดเหมาะสมทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบ และสามารถลดระยะเวลาในการออกแบบลงได้ แต่ความเร็วในการออกแบบทำให้ความแม่นยำในการออกแบบลดลงเช่นเดียวกัน กล่าวคือ หากใช้การพิจารณาทุกความเป็นไปได้ของคำตอบจะมีโอกาสเกิดคำตอบที่ใช้แบตเตอรี่และมอเตอร์ตัวเดียวกันแต่ใบพัดต่างกัน ใน 5 ลำดับ แต่เมื่อนำกระบวนการหาจุดเหมาะสมมารวม เหตุการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้น ซึ่งในแง่ของการนำไปใช้ความแม่นยำในระดับนี้ไม่เป็นปัญหาแต่อย่างใด เนื่องจากอุปกรณ์ที่ต้องใช้ที่แตกต่างกัน 5 อันดับ ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนกลายเป็นทางเลือกสำรองสำหรับการสร้างต้นแบบในกรณีที่ไม่สามารถหาซื้ออุปกรณ์ในลำดับต้นๆ ได้ โดยการใช้ระเบียบวิธีการร่วมกับวิธี Hooke-Jeeves Pattern Search สามารถลดระยะเวลาการออกแบบเฉลี่ยได้ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเวลาในการหาชุดอุปกรณ์ที่เหมาะสมจากทุกความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนการวิจัยและให้คำปรึกษาตลอดการวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Wingtra. (2018, Dec.). *What are the Differences between VTOL Quadplane and Tailsitter drones?* [Online]. Available: <https://wingtra.com/tailsitters-vs-quadplanes-why-a-vtol-tailsitter-is-the-best-surveying-drone-for-your-mapping-missions/>



- [2] W. Nixon. (1998, Apr.). Improvements to tilt rotor performance through passive blade twist control. Technical Momerandum 100583, NASA. Virginia, USA. Available Source: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880013050.pdf>
- [3] R. Varatharajoo, E. J. Abdullah, D. L. Majid, F. I. Romli, A. S. Mohd Rafie, and K. A. Ahmad, "Design of optimum torsionally flexible proprotors for tilt-body MAVs," *Applied Mechanics and Materials and Materials*, vol. 225, pp. 281–286, 2012.
- [4] A. Ling, "Design and manufacturing of generic unmanned aerial vehicle fuselage assembly (payload bay, empennage, wheel assembly and wingbox) via low cost fiber glass molding process," Thesis, Faculty of Engineering and Science, Universiti Tunku Abdul Rahman, 2012.
- [5] A. Jameson. "The analysis of propeller wing flow interaction, analytic methods in aircraft aerodynamics." in *NASA Symposium Proceedings SP-228*, Oct. 1969, pp. 721–749.
- [6] M. Drela. (2005, Mar.). *Dc Motor and Propeller Matching Lab 5 Lecture Note* [Online]. Available: <http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/motorprop.pdf>
- [7] K. Deb. *Optimization for Engineering Design Algorithms and Examples*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012, pp. 82–104
- [8] A. Essari. "Estimation of component design weights in conceptual design phase for tactical UAVs." Doctoral dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, 2015.