

## กลไกการบินแบบแมลงสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก Manuscript Preparation Guideline for CRMA Journal

นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมษัณฑ์ ธรรมวิชัย  
Squadron Leader Assistant Professor Dr. Mason Thammawichai

มศ.กศ.รร.นนก. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
Navaminda Kasatriyadhiraaj Royal Air Force Academy, Saimai, Bangkok, 10220, Thailand  
Corresponding Author: mason@rtaf.mi.th

(Received: April 18, 2019, Revised: July 24, 2019, Accepted: July 26, 2019)

**บทคัดย่อ :** เทคโนโลยีหุ่นยนต์บินขนาดเล็ก หรือ Micro Aerial Vehicles (MAV) กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างแพร่หลายในยุทธวิธีในการบรรเทาทุกข์และการปฏิบัติภารกิจในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ อาทิ การค้นหาและช่วยชีวิตในเหตุการณ์ระเบิดหรือเหตุไฟไหม้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะออกแบบกลไกและท่าทางการกระพือปีกของหุ่นยนต์บินขนาดเล็กแบบกระพือปีกเพื่อการบินแบบลอยตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบกลไกการบินจำนวน 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 เป็นการเลียนแบบท่าทางการบินของแมลงที่มีลักษณะการบินแบบปีกคู่ตบเข้าหากัน หรือที่เรียกว่า Clap-and-Fling สำหรับรูปแบบที่ 2 เป็นกลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบตบขึ้น-ลง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของกลไกการกระพือปีกโดยการวัดค่าแรงยกและแรงขับเคลื่อนเรียลไทม์ จากโพลดเซลล์ในแกน x และแกน y ข้อมูลที่ได้นำมาทำการประมวลผลผ่านบอร์ด Arduino ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า กลไกการบินแบบที่ 2 มุมปะทะที่ 60 องศา สร้างแรงขับเคลื่อนได้มากที่สุด และสร้างแรงยกเฉลี่ยได้มากที่สุดสำหรับมุมปะทะที่ 0 องศา

**คำสำคัญ :** ไมโครยูเอวี การกระพือปีก การบินแบบตบปีกเข้าหากัน กลไกการบินแบบแมลง

**Abstract :** Micro Aerial Vehicle (MAV) Technology is becoming very popular because it can be widely applied in novel battle tactics as well as operations in the environments that are danger to humans, such as searching and rescuing life in an explosion or fire events. The researcher therefore is interested in designing a flight mechanism of a MAV for an efficiently hovering flight. For this project, two flight mechanisms are designed and fabricated. The first mechanism is a mimic of an insect flight characteristics, in which two flapping wings are clapped together at the end of the upstroke and then separated, hence, a clap-and-fling mechanism. The second mechanism is a conventional method of flapping up and down. The lift and the thrust forces are measured in real-time using two load cells in x and y axes. The data is then processed by an arduino board. The experimental results illustrate that the second designed mechanism produce the highest average thrust at the angle of attack at 60 degree and the highest average lift at the angle of attack at 0 degrees.

**Keywords :** Micro UAV, Flapping wings, Clap and fling, Insect flight mechanisms

## 1. บทนำ

การพัฒนาของกองทัพอากาศต้องคำนึงถึงความสอดคล้องกับธรรมชาติ คุณลักษณะและข้อจำกัดของกำลังทางอากาศ รวมทั้งทรัพยากรที่มีครอบครอง เทคโนโลยีที่ใช้งาน ซึ่งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีสมัยใหม่มีผลในการพัฒนาประเทศทั้งในด้านความมั่นคง ความผาสุก ของคนในประเทศ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้เพื่อการช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน เมื่อยามเกิดเหตุการณ์ไม่คาดฝัน เทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์บินขนาดเล็ก หรือ Micro Aerial Vehicles (MAV) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการทหาร อาทิเหตุการณ์ความไม่สงบในจังหวัดสามชายแดนภาคใต้หรือกรณีข้อพิพาทระหว่างไทยและประเทศเพื่อนบ้าน อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กสำหรับยุทธวิธีสามารถถูกนำไปใช้เพื่อหาข้อมูลในระยะใกล้เพราะมีความคล่องตัวในการหาข่าวและหากเกิดการเสียหายก็สามารถยอมรับความสูญเสียได้เพราะใช้งบประมาณไม่มาก

ถึงแม้ว่าโดยส่วนใหญ่งานวิจัยในเรื่องนี้จะมุ่งเน้นไปที่อากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึง (Fixed Wings) หรือแบบปีกหมุน (Rotary Wings) แต่หุ่นยนต์บินแบบปีกกระพือ (Flapping Wings) สามารถเคลื่อนที่ได้คล่องแคล่วกว่า อีกทั้งการบินแบบปีกกระพือนั้นมีข้อดีที่เห็นชัดที่สุดคือท่าทางการบินที่เป็นแบบอิสระ สามารถเปลี่ยนทิศทางการบินได้เกือบทันทีทันใด ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ด้านการหลบหลีกสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ในที่แคบ ดังแสดงให้เห็นในสัตว์จำพวกแมลง อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีหุ่นยนต์บินแบบปีกกระพือยังคงมีการศึกษาค้นคว้าที่ค่อนข้างน้อย

Liu และคณะ [8] ออกแบบหุ่นยนต์ต้นแบบแบบปีกกระพือที่มีทั้งหมดสี่ปีกทำมุมเป็นรูปตัวอักษรตัวเอ็กซ์ มีความยาวปีกเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งคาร์บอนที่นำมาทำเป็นก้านปีกว่าต้องมีขนาดเท่าไรจึงทำให้ได้แรงขับที่ดีที่สุด วัดโดยเครื่องวัดแรง ทำการเปลี่ยนขนาดของ

แท่งคาร์บอนเป็น 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตร ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อแท่งคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 มิลลิเมตรเกิดการบิดงอสูงทำให้แรงขับที่สร้างได้นั้นน้อยกว่าแท่งคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่กว่าและยังความถี่ในการกระพือปีกสูงขึ้นแท่งคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 มิลลิเมตรทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) ส่งผลค่าแรงขับลดลง

Wong และ Sawatdipon [9] ศึกษาผลของการงอปีกในหุ่นยนต์ปีกกระพือ โดยมุ่งเน้นที่ความสามารถในการงอปีกแบบนกโดยเฉพาะจังหวะที่ทำการกระพือปีกขึ้นเพื่อลดแรงต้านอากาศที่จะเกิดขึ้น วัตถุประสงค์ของวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของการงออย่างอิสระในปีกที่มีมุมระหว่างปีกในกับปีกนอกเท่ากับ  $0^\circ$  (ไม่งอ)  $15^\circ$   $25^\circ$  และ  $35^\circ$  และเปรียบเทียบว่า มุมใดให้ประสิทธิภาพในการสร้างแรงยกได้ดีที่สุด โดยใช้แทนปรับมุมปะทะ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ปีกกระพือเพื่อทดสอบ โดยการกำหนดความยาวปีกที่ 40 เซนติเมตรทดลองในอุโมงค์ลมทั้งที่มีความเร็วลมและไม่มีความเร็วลมที่มุมปะทะต่างๆ พบว่าการที่ปีกสามารถงอได้อย่างอิสระทำให้เพิ่มประสิทธิภาพทางการบินได้และที่มีมุมระหว่างปีกในกับปีกนอกเป็น  $15^\circ$  ให้ผลทางอากาศพลศาสตร์โดยเฉลี่ยดีที่สุด

เมชันซ์ และ วิธวินท์ [10] พบว่าแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดจากปีกแบบกระพือขึ้นอยู่กับปัจจัยทางฟิสิกส์หลายประการ เช่น รูปทรงและการเคลื่อนไหวของปีก วัสดุที่ใช้ทำปีกและสภาพอากาศของการบิน พื้นผิวของปีกที่มีความยืดหยุ่นจะปรับรูปทรงในการตอบสนองการไหลของอากาศผ่านปีก จึงส่งผลต่อแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากการกระพือปีกซึ่งมีการปรับเปลี่ยนรูปทรงตามรูปแบบการกระพือของปีกทำให้มีการหมุนหรือบิดงอของปีก การจัดโครงสร้างของปีก เช่น การจัดแกนหลักของปีกและจำนวนแกนหลักของปีก ซึ่งส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนรูปทรงของปีกขณะบิน ปีกที่มีการจัดโครงสร้างปีกที่ต่างกัน มีผลของแรงทางอากาศพลศาสตร์ต่างกัน

## 2. วัตถุประสงค์

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างกลไกการบินแบบแมลงสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่แตกต่างกัน จำนวน 2 กลไก และพัฒนาระบบการทดสอบและการวัดแรงทางอากาศพลศาสตร์ (แรงยกและแรงขับ) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกลไกการบินแบบลอยตัว ซึ่งผลลัพธ์ใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยอื่นดังต่อไปนี้

1. ได้กลไกการบินแบบกระพือปีกต้นแบบสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กแบบปีกกระพือที่มีความยาวปีกขนาด 15 ซม.
2. ได้ระบบการทดสอบและการวัดแรงทางอากาศพลศาสตร์แบบเรียลไทม์สำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กแบบปีกกระพือ
3. ได้ศึกษาผลของมุมปะทะปีกที่มีผลต่อแรงทางอากาศพลศาสตร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอากาศยานไร้คนขับแบบปีกกระพือในอนาคต
4. ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและแรงขับกับเวลาและความถี่ในการกระพือปีก

## 3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แมลงจะต้องสร้างแรงยกที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของตัวเองเพื่อที่จะสามารถทำการบินได้ แมลงกระพือปีกเพื่อที่จะผลิตความเร็วเมื่อเทียบกับอากาศ (Relative velocity to the air) รวมไปถึงแรงทางอากาศพลศาสตร์ ถึงแม้ว่าแมลงจะมีอัตราการกระพือปีกที่สูง ความเร็วที่ได้มีน้อยเนื่องด้วยแมลงมีความยาวของปีกที่สั้น ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยกสูง นั่นคือมีลำดับขนาดเท่ากับ 2 ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากแมลงมีขนาดเล็กและมีความเร็วที่น้อย ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ของปีกแมลงส่วนใหญ่จึงมีค่าน้อย นั่นคือน้อยกว่า 4,000 โดยปกติสำหรับการทำงานของปีกในสภาวะสมดุล ถ้าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อย จะทำให้ความสามารถในการผลิตแรงยกน้อยลงไปด้วย ตัวอย่างเช่น ที่  $Re = 104$  ค่า

สัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดของแพนอากาศแบบบางมีค่าประมาณ 0.8 และที่  $Re = 100$  ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดของโมเดลปีกของแมลงวันผลไม้ (Fruit-Fly) จะมีค่าประมาณ 0.6 ดังนั้นการที่แมลงสามารถสร้างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกได้มากในขณะที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำนั้น น่าจะเป็นผลที่เกิดจากการไหลของอากาศที่ไม่คงที่

จากการศึกษาในเรื่องของกระบวนการเกิดแรงยกที่มีค่าสูงที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำแบบไม่คงที่ของปีกแมลงพบว่า เป็นผลมาจากกระบวนการที่เรียกว่า Delayed stall ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการเกิดได้ดังนี้ [1-4] ในช่วงเวลาของการกระพือปีกนั้น ปีกของแมลงจะเคลื่อนที่ด้วยมุมปะทะที่สูง (High Angle of Attack) ประมาณ  $35^{\circ}$  สำหรับปีกของเครื่องบินที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ถ้าถูกเพิ่มมุมปะทะให้มีขนาดมาก กระแสอากาศที่ไหลผ่านพื้นผิวด้านบนของปีกจะแยกออก ทำให้เกิดกระแสวนหรือ Vortex ใกล้กับขอบหน้าของปีก ซึ่งสามารถผลิตแรงยกขนาดใหญ่ได้ในชั่วขณะและจะแยกตัวออกจากปีกทำให้สูญเสียแรงยกในที่สุด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการสูญเสียแรงยกของปีก (Stall) สำหรับปีกของแมลง สามารถทำให้เกิดกระแสวนที่บริเวณขอบหน้าของปีก (Leading-Edge Vortex , LEV) ได้เช่นกัน แต่แมลงนั้นสามารถรักษาให้กระแสวนอยู่ได้ตลอดเวลา เนื่องจากการสูญเสียแรงยกนั้นถูกชดเชยไปอย่างถาวรจึงเรียกกระบวนการนี้ว่า Delayed Stall

โดยทั่วไป ปีกของแมลงมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3-4 มิลลิเมตร [5] แต่การศึกษาในเรื่องนี้ส่วนใหญ่จะศึกษาแมลงที่มีขนาดใหญ่ เช่น ตั๊กแตน ผีเสื้อกลางคืน แมลงปอ ผี และแมลงวัน สำหรับแมลงขนาดเล็กนั้น Weis-Fogh [6] ได้ศึกษาแมลงจำพวกตัวต่อสายพันธ์ Encarsia Formosa พบว่าในขณะที่มันกำลังจะหมุนปีกเพื่อที่จะเปลี่ยนจังหวะการขึ้นลงของปีกนั้น ปีกของมันมีการเคลื่อนไหวแบบพิเศษ ที่เรียกว่า Clap and Fling นั่นคือในตอนท้ายของจังหวะการกระพือปีกขึ้น ปีกทั้งสองข้างเคลื่อนเข้าหากันและเมื่อสันหน้าของปีกทั้งสองเข้าใกล้

กัน ปีกทั้งสองก็จะหมุนรอบตามสันหน้าของแต่ละปีก (Clap) จากนั้น ในการเริ่มต้นของจังหวะของการกระพือปีกลง ปีกทั้งสองจะถูกเปิดออกโดยการหมุนรอบตามสันหลังของแต่ละปีก (Fling) นอกจากนี้ ยังมีผีเสื้อบางชนิดใช้กระบวนการนี้ในการบินขึ้นจากพื้น กระแสอากาศและแรงอากาศพลศาสตร์ที่ถูกสร้างโดยกระบวนการ Clap and Fling

จากการศึกษา [7] พบว่า แมลงส่วนใหญ่มีความถี่ในการกระพือปีก ( $n$ ) สูงและมีระยะของการกระพือปีก  $\Phi$  ที่กว้าง ตัวอย่างเช่น fruit-fly,  $n \approx 265$  Hz and  $\Phi \approx 180^\circ$  และ virilis,  $n \approx 160$  Hz and  $\Phi \approx 160^\circ$  [7] ความเร็วเทียบของปีกแมลงแปรผันตรงกับระยะของการกระพือปีก (Stroke Amplitude)  $\Phi$  ความถี่ในการกระพือปีก (Wingbeat Frequency)  $n$  และความยาวของปีก (Wing Length)  $R$  ตัวเลขเรย์โนลด์แปรผันตรงกับความเร็วเทียบและความยาวคอर्डของปีก ส่วนแรงทางอากาศพลศาสตร์ของปีกแปรผันตรงกับกำลังสองของความเร็วและพื้นที่ของปีก ให้  $r_2$  เป็นรัศมีการหมุนของปีก (Radius of Gyration)  $U$  เป็นความเร็วเฉลี่ยที่รัศมีการหมุนของปีก  $Re$  เป็นเลขเรย์โนลด์ของปีก และ  $F$  เป็นแรงทางอากาศพลศาสตร์บนปีก จะได้ว่า [7]

$$U = 2\Phi n R r_2 \quad (1)$$

$$Re = Uc/v = 2(\Phi n R) R r_2 / v AR \quad (2)$$

$$F \propto U^2 S = (2\Phi n R)^2 R^2 / AR \quad (3)$$

โดยที่  $r_2 = r_2/R$ ,  $c$  คือความยาวเฉลี่ยของคอर्ड (Mean Cord Length),  $S$  เป็นพื้นที่ของปีก ( $S = Rc$ ),  $AR$  คืออัตราส่วนลักษณะ (Aspect Ratio) ของปีก และ  $v$  คือค่ากลศาสตร์ความหนืดของอากาศ

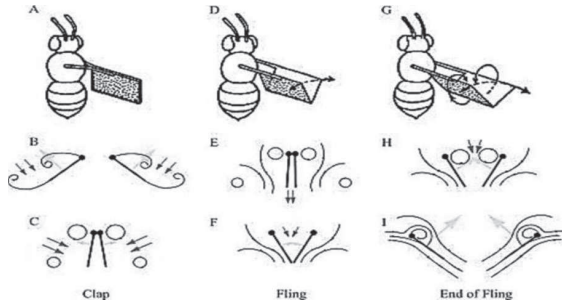
จากสมการจะเห็นได้ว่า  $r_2$  และ  $AR$  ไม่แตกต่างกันมากในแมลงแต่ละชนิด โดยทั่วไป  $r_2 = 0.6$  และ  $AR \approx 3$  สำหรับแมลงที่มีความยาวปีก  $R$  ที่เล็ก จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ระยะของการกระพือปีก  $\Phi$  และความถี่ในการกระพือ

ที่มาก เพื่อที่จะสามารถรักษาความเร็วไม่ให้ต่ำเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้เลขเรย์โนลด์และแรงทางอากาศพลศาสตร์น้อยเกินไป สำหรับ Fruit-flies *D. Virilis* มีค่า  $R \approx 2.9$  มิลลิเมตร  $n \approx 160$  Hz และ  $\Phi \approx 160^\circ$  มี  $U$  ประมาณ  $1.53 \text{ ms}^{-1}$ ,  $Re$  มีค่าประมาณ 100 และสามารถสร้างแรงยกได้เท่าเท่ากับน้ำหนักตัว [7] สำหรับ Vegetable Leafminers (1.4 มิลลิเมตร) มีขนาดเล็กกว่า Fruit-Flies ประมาณสองเท่า ( $r_2$  และ  $AR$  มีขนาดใกล้เคียงกับ Fruit-Flies) ถ้าใช้  $n$  และ  $\Phi$  เท่ากันกับของ Fruit-Flies จะได้  $U$  เท่ากับ  $0.74 \text{ ms}^{-1}$ ,  $Re = 21$  และได้แรงยกที่มีขนาดไม่เพียงพอเนื่องจากแรงยกแปรผันตรงกับกำลังสองของ  $U$  แต่ถ้าใช้ค่า  $n$  และ  $\Phi$  ตามความเป็นจริงแล้ว จะได้  $U = 1.49 \text{ ms}^{-1}$  และ  $Re = 40$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้  $n$  และ  $\Phi$  ที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ Vegetable Leaf Miners สามารถสร้างแรงยกได้พอๆ กับ Fruit-Fly ที่มีขนาดใหญ่กว่าถึงสองเท่า นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าเลขเรย์โนลด์จะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นก็ยังไม่มากเกินไปเมื่อเทียบกับแมลงชนิดอื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่า

นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่าเพื่อที่จะได้ค่า  $\Phi$  ที่มีค่ามากนั้น แมลงจะต้องกระพือปีกด้วยมุมที่ต่ำสุดมีค่าใกล้เคียง  $-90^\circ$  และมุมที่สูงสุดมากกว่า  $95^\circ$  ซึ่งเมื่อกระพือปีกด้วยมุมสูงสุดเกินกว่า  $90^\circ$  นั้น ส่วนนอกของปีกจะมีลักษณะเหมือนตบเข้าหากันหรือที่เรียกว่า Clap and Fling นั้นเอง ลักษณะการ Clap และ Fling ถูกแสดงในภาพที่ 1

โดยสรุป ในการบินแบบกระพือปีกนั้น ปัจจัยที่จะช่วยเสริมแรงลอยตัวมีด้วยกัน 5 ปัจจัยหลัก ได้แก่ [7]

1. Delayed Stall เป็นการชะลอเวลาในการร่วงหล่น (Stall) ของหุ่นยนต์กระพือปีก ในจังหวะที่จะเกิดการร่วงหล่น ถ้าสามารถทำให้ชะลอเวลาในการร่วงได้ หุ่นยนต์จะสามารถลอยตัวค้างอยู่กลางอากาศได้ในสภาวะจะเกิดลมหมุนวนบริเวณด้านหน้าปีก (Leading Edge Vortex)
2. Rapid Pitch-Up ถ้าสังเกตการบินแบบลอยอยู่นิ่งกับที่ทั้งนกฮัมมิงเบิร์ดและแมลง ปีกจะกระพือไปข้าง



ภาพที่ 1 กลไกการกระพือปีกคู่แบบ clap and fling [7]

หน้าและหลังจากที่ปีกตีจะกระพือขึ้นและลง นอกจากนี้จะต้องมีการหมุนปีกไปด้วย อัตราเร็วของการหมุนปีกต้องสัมพันธ์กับการกระพือปีก

3. Wake Capture ตามปกติแล้วในการบินของเครื่องบินหรือการเคลื่อนที่ของรถยนต์ พื้นที่ Wake หรือพื้นที่เก็บอากาศเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดแรงฉุด (Drag Force) แก่เครื่องบินและรถยนต์ ทำให้แรงขับเคลื่อนลดลง แต่สำหรับการบินแบบเฮลิคอปเตอร์ นก และแมลง พื้นที่เก็บอากาศเป็นสิ่งที่จำเป็น การเก็บอากาศจะช่วยทำให้มีแรงกดของอากาศที่สามารถสร้างแรงลอยตัวให้แก่กหรือแมลง ยิ่งสามารถกักเก็บอากาศได้มาก แรงลอยตัวจะมีค่ามากขึ้น

4. Clap-and-fling เป็นกลไกการกระพือปีกคู่แบบหนึ่งคิดค้นโดย Weis-Fogh เป็นกลไกที่ปีกแต่ละข้างมาตบเข้าหากันแล้วแยกออก การตบเข้าหากันเพื่อที่จะสร้างแรงขับเคลื่อนให้มากขึ้นและในจังหวะที่แยกออกจะช่วยเสริมการกักเก็บอากาศให้มากขึ้นเพื่อใช้อากาศนั้นการสร้างการแรงขับในจังหวะที่ตบปีกเข้าหากัน

5. Wing Structural Flexibility ความยืดหยุ่นของปีกมีส่วนที่ส่งผลต่อการสร้างแรงยกตัว ยิ่งปีกมีความยืดหยุ่นสูง แรงลอยตัวก็มีค่าที่สูงขึ้น

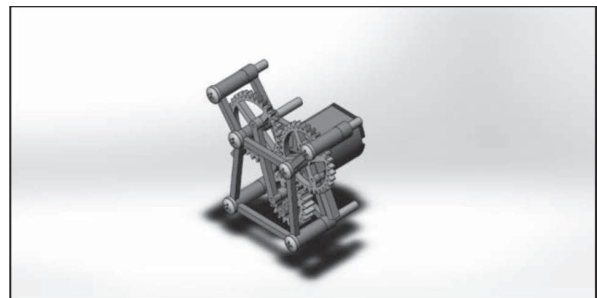
## 4. วิธีดำเนินการศึกษา

### 4.1 ออกแบบและสร้างกลไกการกระพือปีก

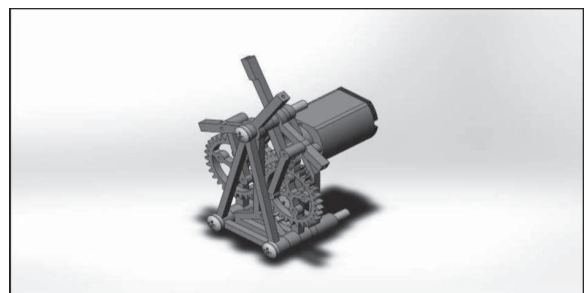
ผู้วิจัยได้ออกแบบกลไกการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กจำนวน 2 รูปแบบ ด้วยโปรแกรม Solid-works และสร้างแบบจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3d printer) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1.1 กลไกการกระพือปีกคู่แบบ Clap and Fling

ภาพที่ 2 แสดงกลไกการกระพือปีกคู่แบบ Clap and Fling โดยเฟืองส่งกำลังมีระยะการส่งกำลังขนาด 4 มม. ไปยังปีกกระพือที่มีระยะการรับขนาด 8.5 มม. ด้วยแกนส่งกำลังขนาด 17.5 มม. โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านขนาด 10 วัตต์



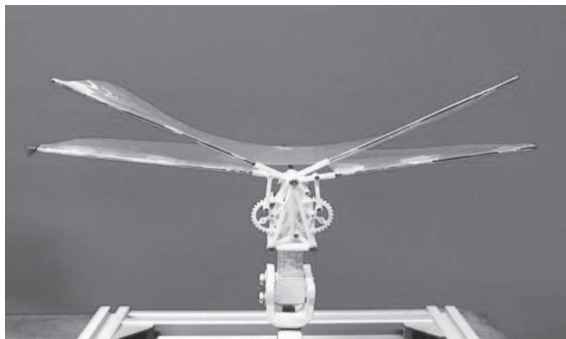
ก) แบบจำลองจากโปรแกรม Solidworks



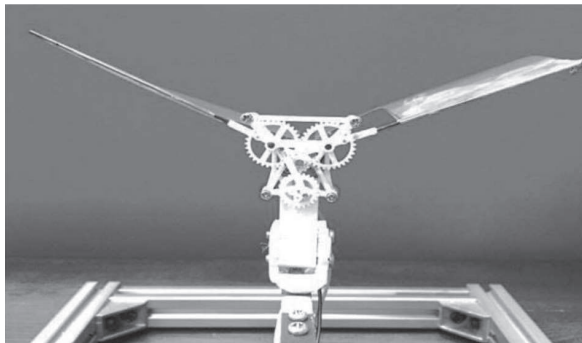
ข) แบบจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

ภาพที่ 2 กลไกการกระพือปีกคู่แบบ Clap and Fling

4.1.2 กลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง  
ภาพที่ 3 แสดงกลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบ  
ขึ้น-ลง โดยเฟืองส่งกำลังมีระยะการส่งกำลังขนาด 4  
มม. ไปยังเฟืองที่ติดกับปีกกระพือที่มีระยะการรับขนาด  
3 มม. ด้วยแกนส่งกำลังขนาด 17.5 มม. โดยใช้มอเตอร์  
ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านขนาด 10 วัตต์



ก) แบบจำลองจากโปรแกรม Solidworks



ข) แบบจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

ภาพที่ 3 กลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง

#### 4.2 การวัดค่าแรงทางอากาศพลศาสตร์

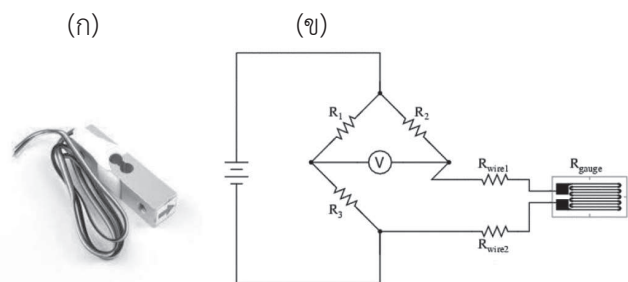
ผู้วิจัยทำการวัดค่าแรงทางอากาศพลศาสตร์ด้วย  
วิธีการนำเสนอในงานวิจัย [10] โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า

###### 4.2.1.1 โหลดเซลล์ (Load Cell) [11]

เป็นระบบเซนเซอร์ที่แปลงค่าน้ำหนักทางกลของสิ่งของ  
ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยสเตรนเกจ  
(Strain Gauge) เป็นส่วนตรวจจับ ซึ่งจะค่อยๆ เปลี่ยน

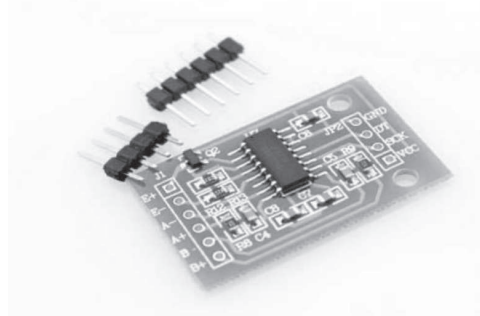
ค่าความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุเป็น  
ค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยการนำค่าความต้านทานที่ได้  
จากสเตรนเกจมาต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ และเมื่อต่อเข้ากับ  
แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงก็จะสามารถหาค่าเอาต์พุต  
ของน้ำหนักวัตถุที่เปลี่ยนแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าได้  
ดังแสดงในภาพที่ 4ข) สำหรับโหลดเซลล์ที่ใช้ในการ  
ทดลองเป็นโหลดเซลล์ขนาด 100 กรัม มีความไวเท่ากับ  
 $0.7 A \pm 0.1 mV/V$



ก) โหลดเซลล์ ข) วงจรโหลดเซลล์

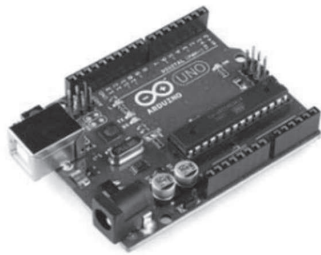
ภาพที่ 4 โหลดเซลล์ ก) โหลดเซลล์ ข) วงจรโหลดเซลล์ [11]

4.2.1.2 HX711 Weight Sensor Amplifier แสดงในภาพที่ 5 เป็นโมดูลขยายสัญญาณใน  
รูปแบบของสัญญาณดิจิทัล 24 บิต โดยใช้ไฟเลี้ยง 2.6 -  
5.5 โวลต์ ทำงานปกติด้วยกระแสไฟ  $< 1.5 mA$  และ  
ทำงานที่ช่วงอุณหภูมิ  $-20^{\circ}C$  ถึง  $+85^{\circ}C$



ภาพที่ 5 โมดูล HX711 [12]

4.2.1.3 บอร์ด Arduino (ภาพที่ 6) เป็นบอร์ด ไมโคร คอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ สามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกโดยเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ดหรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริมประเภทต่างๆ



Microcontroller : ATmega328P  
 Operating Voltage : 5V  
 Input Voltage (recommended): 7-12V  
 Input Voltage (limit): 6-20V  
 Digital I/O Pins : 14 (of which 6 provide PWM output)  
 PWM Digital I/O Pins : 6  
 Analog Input Pins : 6  
 DC Current per I/O Pin : 20 mA  
 DC Current for 3.3V Pin : 50 mA  
 Flash Memory :32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader  
 SRAM : 2 KB (ATmega328P)  
 EEPROM : 1 KB (ATmega328P)  
 Clock Speed : 16 MHz

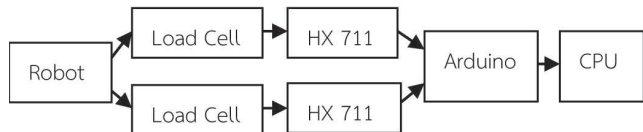
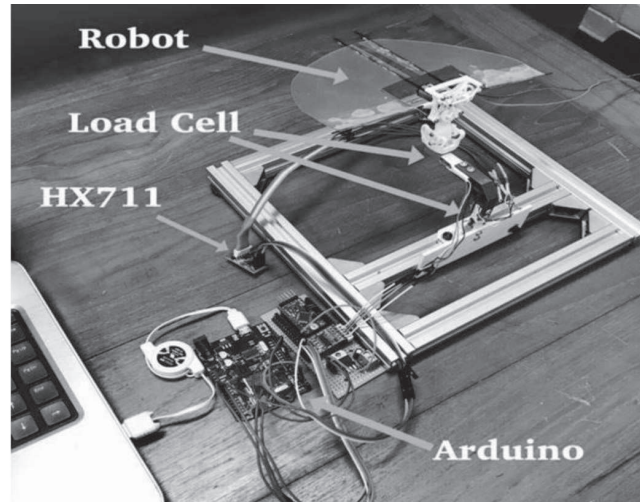
ภาพที่ 6 บอร์ด Arduino UNO [13]

#### 4.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์

การติดตั้งเครื่องวัดแรงยกและแรงขับ

โดยการนำโหลดเซลล์ 2 ตัวมาติดตั้งตามแนวแกน X และ Y หลังจากนั้นก็เชื่อมต่อโหลดเซลล์กับโมดูล HX711 เพื่อขยายสัญญาณอนาล็อกที่ได้จากโหลดเซลล์และแปลงรูปของสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งต่อสัญญาณดิจิทัลไปยังบอร์ด Arduino เพื่อทำการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นแรงทางกลโดยใช้โปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นบนบอร์ด Arduino จากนั้นต่อสัญญาณเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย Serial Port เพื่อบันทึก

และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Matlab ต่อไป ภาพที่ 7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการและแผนภาพไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์



ภาพที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและแผนภาพไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์

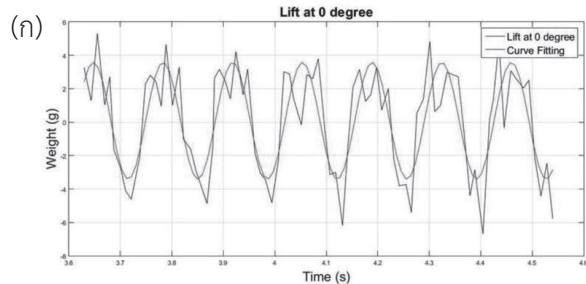
## 5. ผลการทดลอง

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยการวัดค่าแรงยกและค่าแรงขับของกลไกการบินที่ออกแบบทั้ง 2 กลไก ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้ปีกที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน (แผ่นพลาสติกใส) และเก็บค่าแรงยกและแรงขับจากปีกที่มีความยาวปีก (Wing Span) ขนาด 15 ซม. ที่มีมุมปะทะแตกต่างกัน 4 มุม ได้แก่ มุม 0° 45° 60° และ 90° ผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของค่าเฉลี่ยของแรง กล่าวคือ ถ้าแรงยกเฉลี่ยมีค่าเป็นบวกหมายความว่ากลไกการบินที่สร้างขึ้นสามารถรักษากำหนดอยู่ในอากาศได้ นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์ที่ไดนามิกของการกระพือปีกด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ทั่วไป

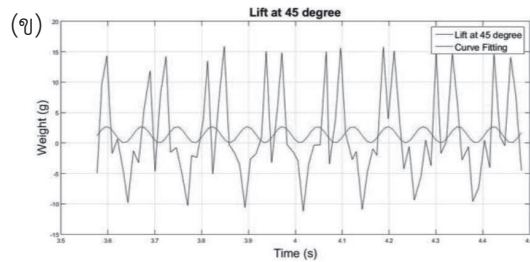
$$F(t) = A \cdot \sin(2\pi f t + \Theta) + C \quad (4)$$

โดยที่ A คือ ความสูงของกราฟ f คือ ความถี่ของกราฟ (Hz)  $\Theta$  คือ Phase shift ( $^{\circ}$ ) C คือ Vertical Shift และ t คือ เวลา (s)

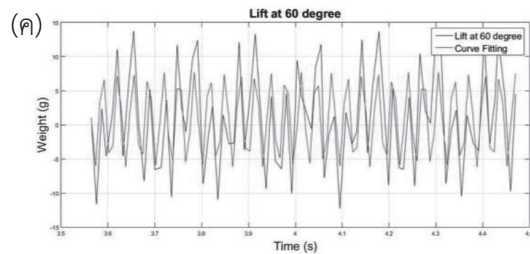
#### 4.1 กลไกการกระพือปีกคู่แบบ Clap and Fling



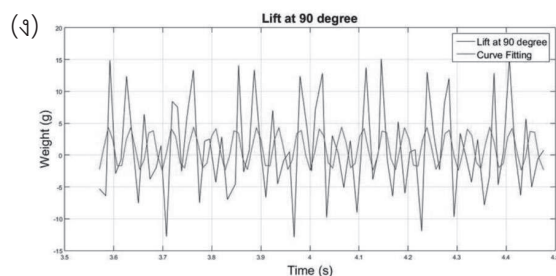
มุมปะทะ  $0^{\circ}$   $L(t) = 3.50\sin(2\pi 7.39t + 8.15) + 0.085$



มุมปะทะ  $45^{\circ}$   $L(t) = 1.39\sin(2\pi 13.32t + 8.39) + 1.37$

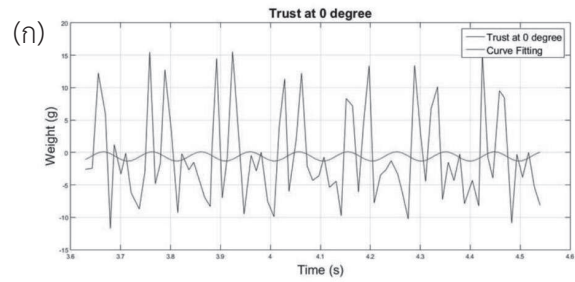


มุมปะทะ  $60^{\circ}$   $L(t) = 6.96\sin(2\pi 25.69t + 32.13) + 0.77$

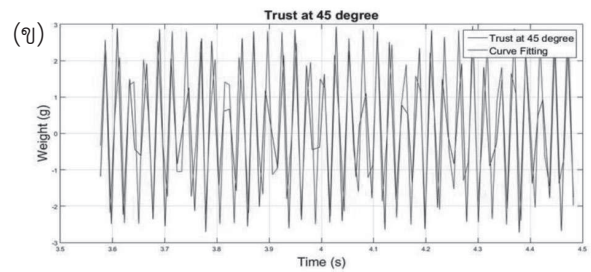


มุมปะทะ  $90^{\circ}$   $L(t) = 3.39\sin(2\pi 23.17t + 25.56) + 0.98$

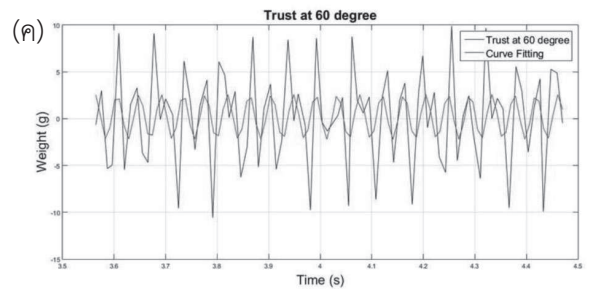
ภาพที่ 8 กราฟแรงยกกลไกการกระพือปีกแบบ Clap and Fling



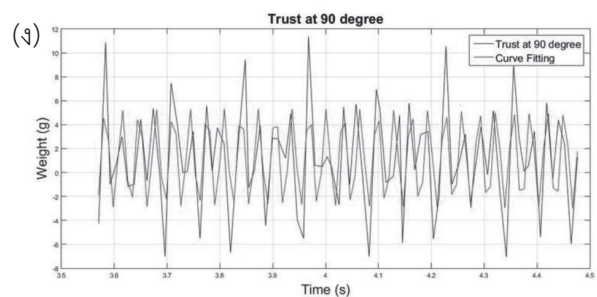
มุมปะทะ  $0^{\circ}$   $T(t) = 0.72\sin(2\pi 10.21t + 49.09) + 0.61$



มุมปะทะ  $45^{\circ}$   $T(t) = 2.67\sin(2\pi 38.29t + 37.57) + 0.16$



มุมปะทะ  $60^{\circ}$   $T(t) = 2.39\sin(2\pi 23.37t + 18.61) + 0.18$

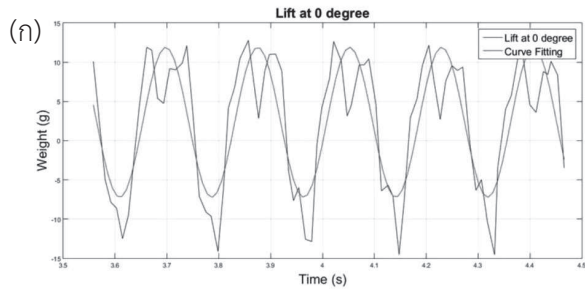


มุมปะทะ  $90^{\circ}$   $T(t) = 4.15\sin(2\pi 31.08t + 30.69) + 1.17$

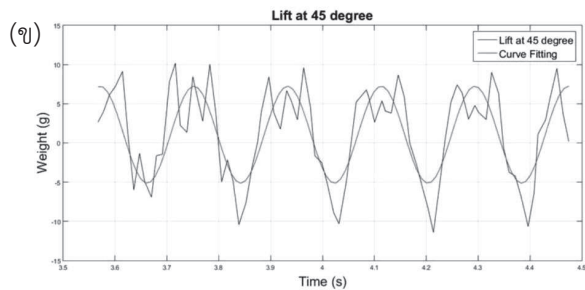
ภาพที่ 9 กราฟแรงขับเคลื่อนกลไกการกระพือปีกแบบ Clap and Fling



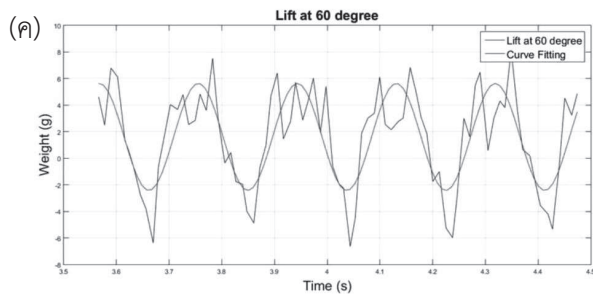
#### 4.2 กลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง



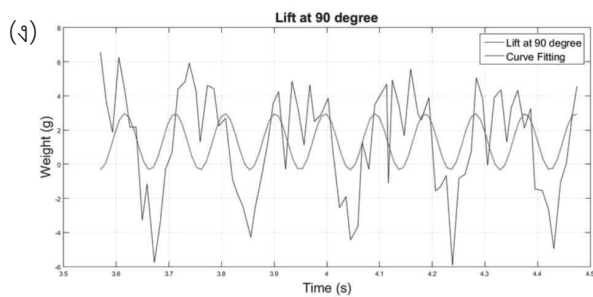
มุมปะทะ 0°  $L(t) = 9.57\sin(2\pi 5.64t + 8.77) + 2.34$



มุมปะทะ 45°  $L(t) = 6.19\sin(2\pi 5.54t + 9.25) + 1.05$

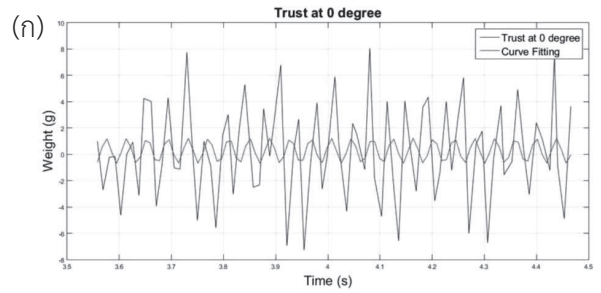


มุมปะทะ 60°  $L(t) = 4.03\sin(2\pi 5.32t + 14.14) + 1.60$

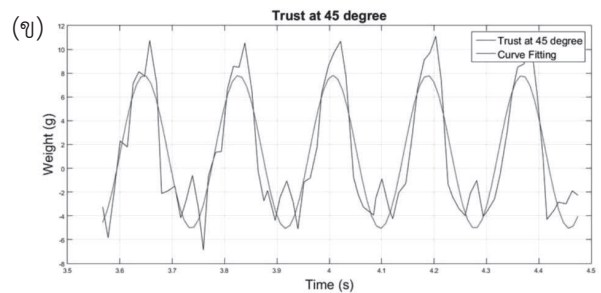


มุมปะทะ 90°  $L(t) = 1.65\sin(2\pi 10.52t + 7.46) + 1.31$

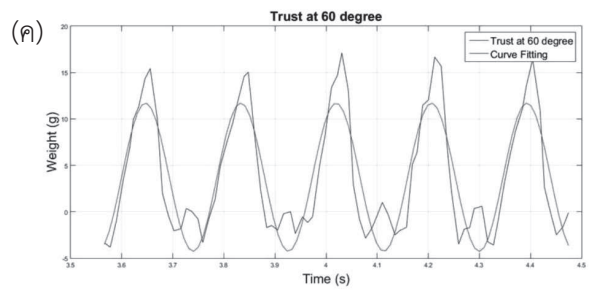
ภาพที่ 10 กราฟแรงยกกลไกกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง



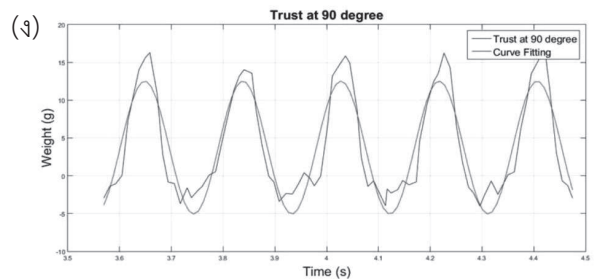
มุมปะทะ 0°  $T(t) = -0.95\sin(2\pi 25.48t + 60.66) + 0.26$



มุมปะทะ 45°  $T(t) = -6.43\sin(2\pi 5.54t + 28.59) + 1.38$



มุมปะทะ 60°  $T(t) = 7.99\sin(2\pi 5.36t + 10.73) + 3.72$



มุมปะทะ 90°  $T(t) = 8.80\sin(2\pi 5.28t + 6.26) + 3.73$

ภาพที่ 11 กราฟแรงขับเคลื่อนกลไกกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง

ผลการทดลองในภาพที่ 8 - 11 แสดงให้เห็นว่า แรงยกและแรงขับที่เกิดจากการกลไกการกระพือปีกมีลักษณะเป็นกราฟรูปไซน์ซึ่งสอดคล้องกับวงรอบของการกระพือปีก นอกจากนี้ยังจะสังเกตได้ว่ามุมปะทะมีผลต่อความถี่ในการกระพือปีก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงทางอากาศพลศาสตร์ดังสมการที่ (3) กล่าวคือเมื่อความถี่ในการกระพือปีกเพิ่มขึ้น แรงทางอากาศพลศาสตร์ก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถสรุปจากผลการทดลองได้ว่ามุมปะทะใดเป็นมุมปะทะที่ทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์ได้ดีที่สุด เนื่องจากแรงทางอากาศพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายอย่างประกอบเข้าด้วยกัน อาทิ รูปร่างของปีก วัสดุที่ใช้ทำปีก รวมไปถึงกลไกในการกระพือปีก ซึ่งจะต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ไปพร้อม ๆ กัน แต่จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ทำให้ทราบว่ามุมปะทะที่ดีอยู่ในช่วงระหว่าง  $45^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ต่อยอดในการออกแบบหุ่นยนต์บินได้ในอนาคตได้ กล่าวคือจะต้องออกแบบให้ลำตัวของหุ่นยนต์บินทำมุมระหว่าง  $45^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  กับระนาบการกระพือปีกจึงจะทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการบินแบบลอยตัว

## 6. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนา หุ่นยนต์บินขนาดเล็กแบบปีกกระพือ โดยมุ่งเน้นที่การออกแบบกลไกการบิน โดยผู้วิจัยได้เลือกท่าทางการบินที่เลียนแบบการบินของแมลงและออกแบบกลไกการบินขึ้นมา 2 กลไก ทดลองวัดค่าแรงยกและแรงขับของแบบจำลองที่มีขนาดความยาวปีกเท่ากับ 15 ซม. โดยการปรับมุมปะทะทั้งหมด 4 มุม ได้แก่  $0^{\circ}$   $45^{\circ}$   $60^{\circ}$  และ  $90^{\circ}$  ผล

การทดลองสรุปได้ว่ากลไกการบินแบบที่ 2 มุมปะทะที่  $0^{\circ}$  สามารถสร้างแรงยกเฉลี่ยได้มากที่สุด เท่ากับ 2.34 กรัม และกลไกการบินแบบที่ 2 มุมปะทะที่  $60^{\circ}$  สามารถสร้างแรงขับเฉลี่ยได้มากที่สุด เท่ากับ 3.72 กรัม โดยค่าแรงยกเฉลี่ยและแรงขับเฉลี่ยที่ได้มีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่ากลไกการบินที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นสามารถรักษาการบินอยู่ในอากาศและสามารถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าได้ จากสมการแรงยกจะเห็นได้ว่ากลไกการบินแบบที่ 1 มุมปะทะที่  $60^{\circ}$  มีความถี่มากที่สุดเท่ากับ 25.69 เฮิรตซ์ และจากสมการแรงขับ กลไกการบินแบบที่ 1 มุมปะทะที่  $45^{\circ}$  มีค่าความถี่มากที่สุด เท่ากับ 38.29 เฮิรตซ์ สำหรับงานวิจัยต่อยอดควรมีการศึกษาเรื่องของวัสดุที่ใช้ในการทำปีก เพื่อที่จะได้สามารถทำปีกที่มีประสิทธิภาพในการสร้างแรงยกและแรงขับที่มากยิ่งขึ้น โดยปีกที่สร้างไม่ควรมีน้ำหนักมากหรือแข็งจนเกินไป เพราะจะส่งผลกระทบต่อกลไกการบินขนาดเล็กที่สร้างขึ้นและอาจจะทำให้เกิดการชำรุดหรือเสียหายได้ สุดท้ายนี้ เนื่องจากทางผู้วิจัยไม่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมทิศทางการบินของหุ่นยนต์บิน ถ้าหากจะนำหุ่นยนต์บินไปใช้งานจริงจะต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในเรื่องของระบบการสั่งการและการควบคุมทิศทางเพื่อให้หุ่นยนต์บินสามารถเลี้ยวและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้แบบอัตโนมัติ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมการพัฒนางานศึกษา-วิจัย โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

## 8. บรรณานุกรม

- (1) G.K. Taylor, 2003. Mechanics and aerodynamics of insect flight *Acta Mech. Sin.* Vol. 19, p. 458-469.
- (2) S.P. Sane, 2003. The aerodynamics of insect flight *J. Exp. Biol.*, Vol. 206, p. 4191-4208 (2003).
- (3) Z. J. Wang, 2005. Dissecting Insect Flight *Annu. Rev. Fluid. Vol.* 37, p. 183-210.
- (4) W. Shyy, W. et. al., 2010. Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity. *Prog. Aerospace Sci.* Vol. 46, p. 284-327.
- (5) R. Dudley, 2000. In *The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution.* 1st edn, (Princeton University Press, 2000).
- (6) T. Weis-Fogh, 1973. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production, *J. Exp. Biol.* Vol. 59, p. 169-230.
- (7) X. Cheng, M. Sun, 2016. Wing-kinematics measurement and aerodynamics in a small insect in hovering flight, *Scientific Reports, Nature.*
- (8) H. Liu, X. Wang, T. Nakata, 2012. Aerodynamics and flight stability of a prototype flapping micro air vehicle, *Proc. of International Conference on Complex Medical Engineering, Japan.*
- (9) U. Wong, L. Sawatdipon, 2014. Study the effects of bending in flapping wings, Bangkok, Thailand.
- (10) L. Zhao, Q. Huang, X. Deng, 2009. Aerodynamic effects of flexibility in flapping wings" Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, USA.
- (10) เมษันท์ ธรรมวิชัย และ วิธวินท์ ศรีเพียรพล 2018 Wing Designs for a small flying robot in hovering, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, Vol. 14, No. 1, p. 110-117.
- (11) วิธีการใช้งาน Load Cell กับ HX711 Amplifier Module (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก <http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/how-to-use-load-cell-and-hx711-amplifier-module.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2560).
- (12) HX711 (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก <https://www.arduitronics.com/product/694/weight-sensor-amplifier-module-hx711.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม 2560)
- (13) Arduino (ออนไลน์) เข้าถึงได้ <https://www.arduino.cc> (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม 2560).