

การศึกษาผลของการงอปีกในเครื่องบินปีกกระพือ Study the Effects of Bending in Flapping Wings

นาย อุกฤษฏ์ ห่วง

นาย ลักษมณ์ สวัสดิ์ผล

ดร.ชินภัทร ทพิโยภาส

ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

โครงการนี้ต้องการที่จะพัฒนาเครื่องบินปีกกระพือให้สามารถบินได้คล้ายกับนกมากขึ้น จึงได้ออกแบบเครื่องบินปีกกระพือที่สามารถงอปีกได้ เพื่อลดแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นขณะกระพือ ในปัจจุบันมีการออกแบบกลไกการกระพือปีกที่จะทำให้ปีกสามารถงอได้เวลาทำการกระพือ แต่โครงการนี้มีเป้าหมายที่จะปล่อยให้แขนนอกของปีกทำการกระพืออย่างอิสระแล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้น เนื่องจากการทำโครงสร้างกลไกเข้าไปในปีกทำให้น้ำหนักเพิ่มและเพิ่มความกว้างด้านหน้า ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการนี้ต้องการที่จะศึกษาผลของการงออย่างอิสระในปีกที่มีมุมระหว่างปีกในกับปีกนอกเป็น 0° (ไม่งอ), 15° , 25° และ 35° และทำการเปรียบเทียบกันว่า มุมไหนให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

จากการออกแบบ และสร้างเครื่องบินปีกกระพือเพื่อทดสอบโดยการกำหนดความยาวปีกที่ 40 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองในอุโมงค์ลมทั้งที่มีความเร็วลม และไม่มีความเร็วลมที่มุมปะทะต่างๆ พบว่าการที่ปีกสามารถงอได้อย่างอิสระสามารถที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางการบินได้จริง และที่มุมระหว่างปีกในกับปีกนอกเป็น 15° ให้ผลทางอากาศพลศาสตร์โดยเฉลี่ยดีที่สุด หากต้องการที่จะพัฒนาเครื่องบินปีกกระพือนี้ให้สามารถบินได้จริง ยังต้องทำการพัฒนาแบบโครงสร้าง วัสดุ และหางของเครื่องบินปีกกระพือนี้ก่อน เพื่อที่จะให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดที่จะทำการบินได้จริง

คำสำคัญ : เครื่องบินปีกกระพือ, ออโนคอปเตอร์, งอปีก, นก, อุโมงค์ลม

Abstract

The intention of this project is to design and test an ornithopter with capabilities closer to a real bird. This project is focused on the ability to bend wings of a bird to reduce the aerodynamics forces acting on the wing. Some ornithopters today have mechanisms in their wings that would allow them to bend their wings during flapping but this project is focused on building bending wings without mechanisms, allowing the outer wing to swing freely. Therefore the objectives of this project is to study the effects of bending (freely) in flapping wings with the inner arm and outer arm bending angles of 0° (no bending), 15° , 25° , and 35° then compare the results.

The span of the ornithopter was set at 40 centimeters. After several designs the bendable wing was tested in a wind tunnel with and without incoming free stream at various angles of attack. The results showed that proper bending in wings could improve aerodynamics performances, which in this case flapping wing with the inner arm and outer arm bending angle of 15° proved the best results. In the future, to develop a flying ornithopter based on this study we would recommend developing its design, structure, materials, and a tail.

Keywords: Flapping Wings, Ornithopter, Bending Wings, Bird, Wind Tunnel

AME-10

1. บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาผลของการออกแบบอิสระเปรียบเทียบกับปีกแบบงอไม่ได้ในเครื่องบินปีกกระพือ และหาองศาการงอของปีกแบบอิสระในเครื่องบินปีกกระพือ ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

1.2 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้ศึกษาเฉพาะปีกที่มีความยาวปีกประมาณ 40 เซนติเมตร และตำแหน่งของการงอที่ โดยทำการทดสอบการกระพือที่สภาพแวดล้อมที่มีปัจจัยขึ้นอยู่กับความยาวของปีก

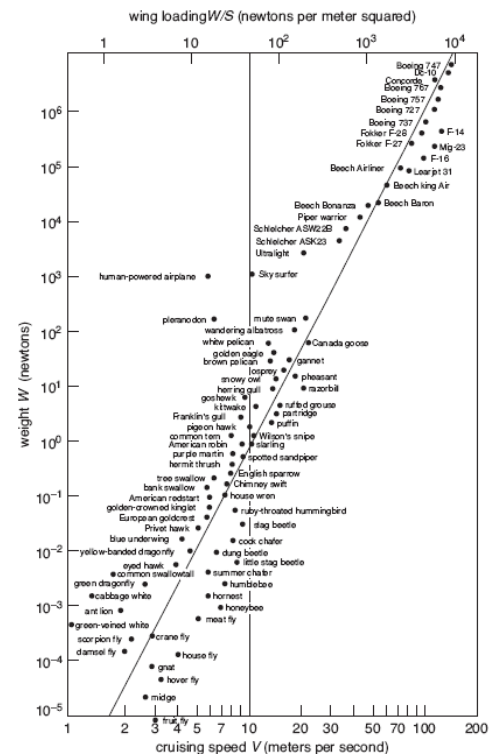
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟิสิกส์ของการบินปีกกระพือ

ในเครื่องบินทั่วไปจะมีปีกสร้างแรงยกและมีเครื่องยนต์ในการสร้างแรงผลักดันไปข้างหน้า แต่ในเครื่องบินปีกกระพือหรือในนกนั้น ปีกจะต้องสร้างทั้งแรงยกและแรงผลักดัน แม้วิธีการจะต่างกันแต่หลักพื้นฐานในการบินนั้นเหมือนกัน นั่นคือเมื่ออากาศไหลผ่านปีกของนกจะถูกเบนลงเล็กน้อยทำให้เกิดความแตกต่างของความดันข้างบนปีกและความดันข้างล่างปีกเป็นผลทำให้เกิดแรงยกขึ้นที่ปีกเช่นเดียวกับเครื่องบินทั่วไป ส่วนเครื่องยนต์ของเครื่องบินสามารถเปลี่ยนความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องยนต์เป็นผลให้โมเมนตัมเปลี่ยนไปและเกิดเป็นแรงผลักดัน ซึ่งปีกของนกหรือเครื่องบินปีกกระพือก็สามารถผลักดันอากาศไปข้างหน้าทำให้โมเมนตัมเปลี่ยนและสร้างแรงผลักดันได้เช่นกัน

2.2 การหาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องของปีกกระพือเบื้องต้น

การศึกษาการบินในธรรมชาติคือ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของปรากฏการณ์ต่างๆในตัวแปลที่แตกต่างกัน Tennekes (1996) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ที่น่าสนใจ เพื่อที่จะสรุปความแตกต่างของขนาดใน นก แมลง และเครื่องบิน โดย Tennekes ได้พิจารณาความสัมพันธ์ของ ความเร็วในการบิน น้ำหนัก และภาระกรรมบนปีก กลายเป็น The Great Flight Diagram แผนภาพจะแสดงอยู่ดังรูป



AME-10

ปัจจัยสำคัญเมื่อต้องการที่จะอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับการกระพือปีก Pennycuik ได้นำเสนอหนึ่งในการศึกษาที่ละเอียดที่สุดเกี่ยวกับความถี่ของการกระพือปีกจากการศึกษานกสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน 47 สายพันธุ์ และสรุปความสัมพันธ์ออกมาเป็นสมการ (ในปี 1996)

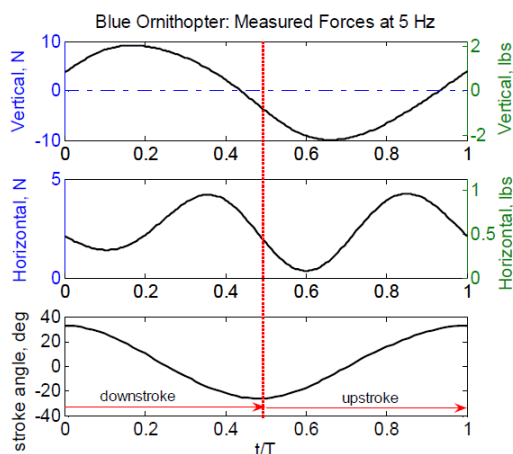
$$f = m^{3/8} g^{1/2} b^{-23/24} S^{-1/3} \rho^{3/8}$$

2.3 งานศึกษาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปีกกระพือ

ในปี 2008 Robyn Lynn Harmon ได้ทำการทดสอบเครื่องบินปีกกระพือ 2 ลำ เพื่อหาผลของรูปร่างที่เปลี่ยนไปของปีกเมื่อทำการบิน (เมื่อกระพือปีก) แต่ในการทดสอบของ Robyn Lynn Harmon ได้ทำการวัดหาแรงที่เกิดขึ้นจากการกระพือปีกด้วย

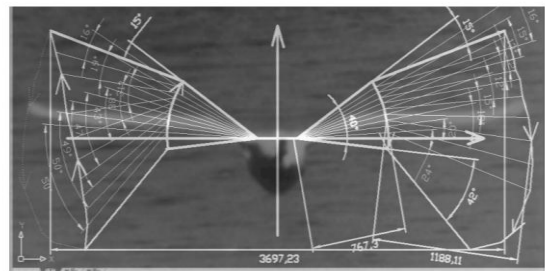


รูปที่ 2 แท่นทดสอบที่ถูกใช้ทดสอบแรงทั้งสองแกนและเครื่องตรวจจับตำแหน่ง



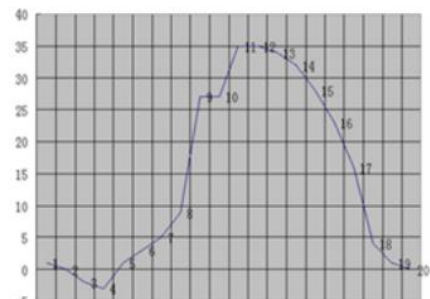
รูปที่ 3 ผลของการทดสอบแรงทั้งสองแกนของเครื่องบินปีกกระพือสีน้ำเงิน

ในปี 2011 ได้มีการศึกษากลไกการกระพือของนกเพื่อที่จะออกแบบกลไกที่สามารถลอกเลียนรูปแบบการกระพือของนกขึ้น ซึ่งในงานศึกษานี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางกระดูกและกล้ามเนื้อของปีกนกเพื่อหารูปแบบของกลไกที่เหมาะสมที่สุดมาออกแบบ ซึ่งในงานของ Bingbing Liang ได้ทำการสำรวจมุมที่เกิดขึ้นระหว่างข้ออปีกในและปีกนอกของนกในหนึ่งจังหวะการกระพือที่เกิดขึ้น พบว่าในหนึ่งจังหวะการกระพือมุมที่เกิดขึ้นระหว่างข้ออปีกในและปีกนอกของนกนั้นมีค่าน้อยสุดประมาณ -5 องศาและมากที่สุดประมาณ 35 องศา ซึ่งมุมที่เกิดขึ้นมากที่สุดนั้นจะอยู่ในช่วงจังหวะการกระพือขึ้น (Upstroke) เพื่อลดแรงต้านที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4 ภาพมุมต่างๆที่เกิดขึ้นขณะนกกระพือปีก

Angle between two wings—Curve of wing's angle during flapping
Wing angle.



Equal points during one cycle of flapping-wing

รูปที่ 5 กราฟระหว่างข้ออปีกในและปีกนอกของนกในหนึ่งรอบจังหวะการกระพือ

3. ขั้นตอนการทดลอง

หลังจากที่เตรียมชุดอุปกรณ์ทดลองพร้อมแล้ว ต่อมาจึงทำการประกอบชุดอุปกรณ์ทดลองเข้ากับอูโมงคัลมเพื่อทำการทดลองโดยอูโมงคัลมที่จะใช้ดำเนินการทดลองนั้นคือ อูโมงคัลมที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 2 x 2 เมตร ซึ่งตั้งอยู่ ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

AME-10



รูปที่ 6 อุโมงค์ลมสำหรับการทดลอง

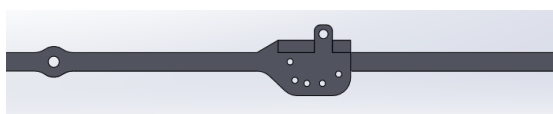
- 1) ปรับตั้งค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดแรง
- 2) ติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลองเข้ากับอุโมงค์ลม



รูปที่ 7 อุปกรณ์สำหรับการทดลองทั้งหมดในอุโมงค์ลม

- 3) ปรับมุมกระพือของปีกขึ้นนอก

จากจุดประสงค์ของการทดลอง มุมกระพือของปีกขึ้นนอกจึงสามารถปรับได้ทั้งหมด 4 มุม ได้แก่ มุม 0° , มุม 15° , มุม 25° และมุม 35°



รูปที่ 8 ข้อปรับมุมกระพือของปีกขึ้นนอก

- 4) ปรับค่าการอ่านผลให้เป็น 0 (Tare)

- 5) ปรับมุมปะทะและเก็บค่าข้อมูล

การเก็บค่าในการทดลอง จะเป็นการเก็บค่าของแรงของตัวทดลองในแต่ละมุมปะทะ โดยจะปรับมุมปะทะเป็นมุม -4° , 0° , 4° , 8° และ 12° ตามลำดับ โดยในแต่ละมุมปะทะนั้น จะมีการเก็บค่านานมุมละ 10 วินาที

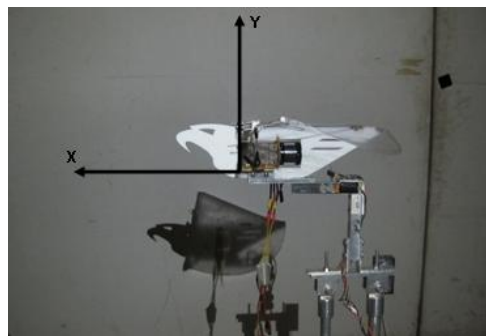


รูปที่ 9 ตัวต้นแบบการทดลองระหว่างปรับมุมปะทะ

จากนั้นจะทำการทดลองซ้ำแต่ทำการปรับมุมระหว่างปีกในและปีกนอกของปีกกระพือ จากมุม 0° เป็น 15° , 25° และ 35° ตามลำดับ โดยการปรับมุมไปที่ตำแหน่งต่างๆ ดังในรูปที่ 3 และต่อมาจึงทำการทดลองซ้ำทั้งหมด โดยปรับความลมปะทะ (Free stream) จาก 0m/s เป็น 4m/s

4. ผลการทดลอง

การเก็บผลการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลของแรงในแกน X และแกน Y ดังรูปด้านล่าง เทียบกับเวลา

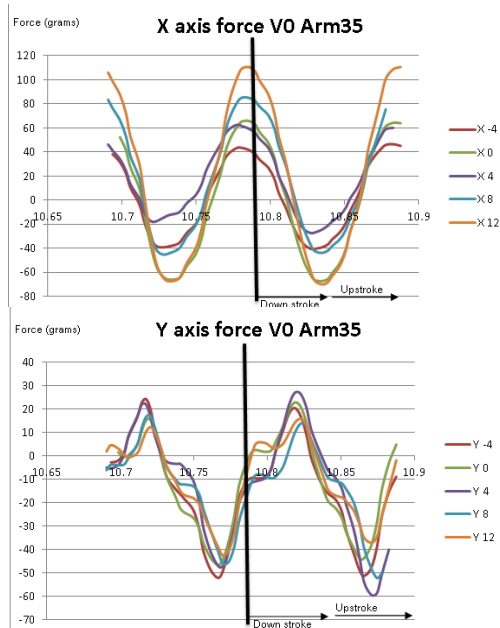


รูปที่ 10 แกนทั้งสองบนนกที่ทำการเก็บค่าในการทดลอง

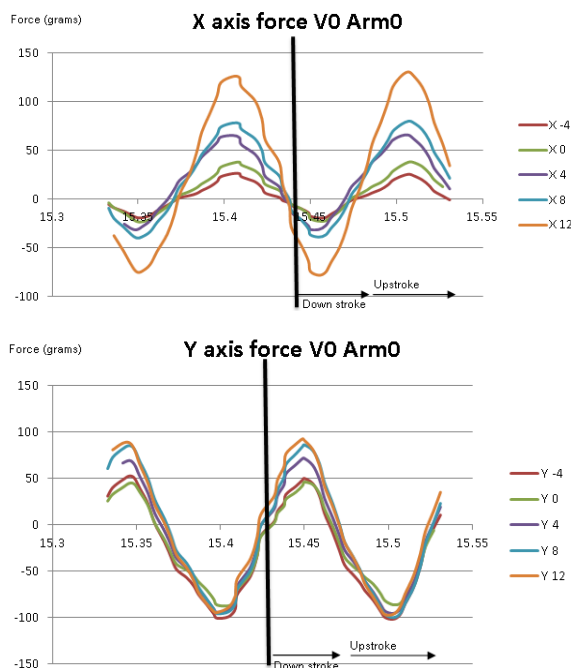
จากการทดลองต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นทำให้มีผลการทดลองในลักษณะของกราฟมากมาย ดังนั้นในที่นี้จึงได้นำมาแสดงไว้เพียงบางส่วน

AME-10

4.1 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ความเร็วลมคงที่



รูปที่ 11 แรงในแกน X และ Y ของการทดลองที่ความเร็วลมเป็น 0m/s และมุมระหว่างปีกในและปีกนอกเป็น 0° ที่มุมปะทะต่างๆ



รูปที่ 12 แรงในแกน X และ Y ของการทดลองที่ความเร็วลมเป็น 0m/s และมุมระหว่างปีกในและปีกนอกเป็น 35° ที่มุมปะทะต่างๆ

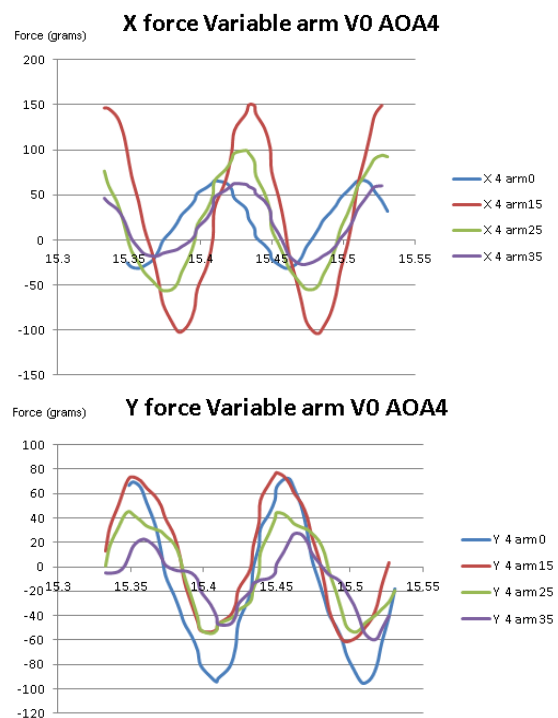
จากกราฟของผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มมุมปะทะของการทดลอง(เพิ่มมุมปะทะของนก) ที่มีรูปแบบติดตั้งปีกเหมือนกันที่ความเร็วเท่ากัน จะ

สังเกตเห็นแอมพลิจูดของกราฟทั้งแกน X ส่วนมากจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงเกิดการสั่นที่รุนแรงขึ้นหรือหมายถึงแรงผลักดันที่ไม่คงที่

จากกราฟของผลการทดลองในส่วนของแกน Y พบว่าเมื่อทำการเพิ่มมุมปะทะของปีกกระพือ ที่มีรูปแบบติดตั้งปีกเหมือนกัน จะสังเกตเห็นกราฟทั้งกราฟของแกน Y ส่วนมากเลื่อนสูงขึ้น หมายถึงเกิดแรงยกมากขึ้น และที่ตำแหน่งสูงสุดของปีกเป็นจุดเริ่มต้นของกราฟที่มีลักษณะของ Sine wave เพราะจากตำแหน่งบนปีกก็จะเริ่มเคลื่อนที่ลงเป็นผลให้อากาศถูกดันลงจึงเกิดแรงยกขึ้นในทางกลับกันพอปีกถึงจุดต่ำสุดและเคลื่อนที่ขึ้นจะทำให้เกิดแรงซึ่งตรงกันข้ามกับแรงยกและผลการทดลองก็ได้แสดงเช่นนั้น

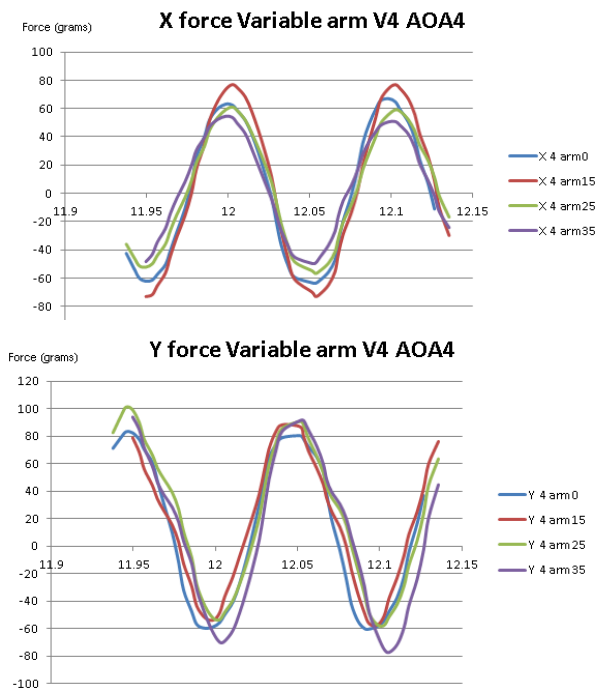
อีกสิ่งหนึ่งที่สามารถสังเกตได้จากกราฟของผลการทดลองคือ เมื่อทำการเพิ่มมุมระหว่างปีกในและปีกนอกทำให้ลักษณะโค้งของ Sine wave ของแรงในแกน Y เสียรูปมากขึ้น ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากแรงที่ปีกนอกเกิดการสับตัดมากระแทกกับปีกใน ณ ตำแหน่งที่กราฟหักผิดรูปไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนที่มุมระหว่างปีกในและปีกนอกเพิ่มขึ้น

4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองที่มุมปะทะคงที่



รูปที่ 13 แรงในแกน X และ Y ของการทดลองที่ความเร็วลมเป็น 0m/s และมุมปะทะเป็น 4° ที่มุมระหว่างปีกในและปีกนอกตำแหน่งต่างๆ

AME-10



รูปที่ 14 แรงในแกน X และ Y ของการทดลองที่ความเร็วลมเป็น 4m/s และมุมปะทะเป็น 4° ที่มุมระหว่างปีกในและปีกนอกตำแหน่งต่างๆ

จากการเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่าเมื่อทดลองโดยมีความเร็วลม Free stream กราฟมีลักษณะหนึ่งขึ้น และใกล้เคียงกันมากขึ้น จากรูปที่ 8 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเทียบเส้นกราฟระหว่างปีกที่สามารถงอได้ กับปีกที่ไม่สามารถงอได้ จุดต่ำสุดของกราฟจะถูกเลื่อนขึ้น ซึ่งหมายความว่า การที่ปีกสามารถงอได้ทำให้ช่วยลดแรงต้านอากาศแกน Y ในจังหวะที่ปีกกำลังเคลื่อนที่ขึ้นได้จริง แต่เมื่อเพิ่มมุมระหว่างปีกในและปีกนอกมากกว่า 15° จะทำให้จุดสูงสุดของกราฟนั้นค่อยๆ ลดลงด้วย ซึ่งหมายถึงการสูญเสียแรงยกเช่นกัน จากการทดลองที่มีความเร็ว Free stream รูปที่ 9 เส้นกราฟที่แสดงจุดต่ำที่สุด หรือเกิดแรงต้านมากที่สุด คือเส้นกราฟของมุมระหว่างปีกในและปีกนอก เท่ากับ 35° แต่เส้นกราฟที่มีจุดสูงต่ำสุดคือ เส้นกราฟของปีกที่ไม่สามารถงอได้ ซึ่งในกรณีนี้หมายความว่า การที่ปีกสามารถงอได้นั้นจะช่วยเพิ่มแรงยกโดยเลื่อนจุดสูงสุดของกราฟขึ้นไปอีก หรือจังหวะกระพือลงเกิดแรงยกได้มากกว่า

ในกรณีของแกน X จะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่า มุมระหว่างปีกในและปีกนอก เท่ากับ 15° มีการแกว่งของแอมพลิจูดสูงสุด หรือเกิดแรงมากที่สุดทั้งด้าน + X และ -X

ซึ่งหากสามารถแก้ไขให้แผ่นมีลักษณะการงอ และสับตัดที่ดีกว่านี้ คาดว่าจะสามารถทำให้เกิดแรงผลึกได้มากขึ้น

4.3 ค่าเฉลี่ยของการทดลองรูปแบบต่างๆ

X AVG	V0 Arm0	V0 Arm15	V0 Arm25	V0 Arm35
AOA-4	2.20442	13.7612	7.57528	2.22868
AOA0	5.87549	18.425	12.4642	1.75111
AOA4	17.4191	21.9661	15.1326	14.3869
AOA8	19.3827	27.6497	22.4773	19.95
AOA12	24.2483	34.7949	30.7452	20.6086

Y AVG	V0 Arm0	V0 Arm15	V0 Arm25	V0 Arm35
AOA-4	-25.1916	-4.00671	-15.2388	-17.0401
AOA0	-22.1394	0.24478	-10.2001	-13.5159
AOA4	-13.755	6.71765	-5.00432	-12.9972
AOA8	-6.4181	9.38859	-1.91705	-11.2919
AOA12	-4.08897	9.81387	6.4054	-8.81028

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของแรงในแกน X และ Y ของการทดลองที่ความเร็วลมเป็น 0m/s ณ มุมปะทะต่างๆ และมุมระหว่างปีกในและปีกนอกตำแหน่งต่างๆ

X AVG	V4 Arm0	V4 Arm15	V4 Arm25	V4 Arm35
AOA-4	-4.75734	-8.09045	-13.5982	-11.7682
AOA0	-4.95836	-5.97859	-4.81039	-3.68576
AOA4	-0.3964	0.24238	2.52646	3.25365
AOA8	0.93484	2.17492	7.68224	4.71557
AOA12	3.19592	4.49237	11.0824	5.31529

Y AVG	V4 Arm0	V4 Arm15	V4 Arm25	V4 Arm35
AOA-4	-18.105	3.9555	-5.05767	-6.74232
AOA0	-20.2788	7.35271	2.8379	-0.49085
AOA4	14.3844	20.9106	17.3892	7.02362
AOA8	21.0818	25.9429	20.4592	17.6321
AOA12	33.1582	36.5735	27.8386	29.5505

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยของแรงในแกน X และ Y ของการทดลองที่ความเร็วลมเป็น 4m/s ณ มุมปะทะต่างๆ และมุมระหว่างปีกในและปีกนอกตำแหน่งต่างๆ

จากค่าเฉลี่ยของการทดลองพบว่า แรงยก(แรงแกน Y) จะมากที่สุดเมื่อปีกมีมุมระหว่างปีกในและปีกนอก เท่ากับ 15° ในทุกกรณี ส่วนปีกที่มีมุมระหว่างปีกในและปีกนอก เท่ากับ 0° (ไม่งอ) และ เท่ากับ 35° มีแนวโน้มที่จะเกิดแรงยกน้อยที่สุด ส่วนในกรณีของการทดลองที่ความเร็ว Free stream เท่ากับ 0 m/s ค่าเฉลี่ยของแรงในแกน X มีค่าสูงสุด ที่มุมระหว่างปีกในและปีกนอก เท่ากับ 15° เช่นเดียวกับในแกน Y แต่ผลการทดลองของแรงในแกน X ที่ความเร็ว Free stream เท่ากับ 4 m/s ไม่ได้แสดงเช่นนั้น แต่ละแบบการติดตั้งให้ผลต่างกันไม่มาก ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ในกรณีนี้

AME-10

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดในที่นี้ สามารถสรุปได้ว่า เครื่องบินปีกกระพือลักษณะ ขนาดเท่าของคณะผู้จัดทำ (ปีกยาว 0.4 เมตร ลำตัวยาว 0.15 เมตร) จะให้ผลทางอากาศพลศาสตร์ดีที่สุดเมื่อปีกมีมุมอระหว่างปีกในและปีกนอกประมาณ 15°

ในท้ายที่สุดนี้ ถ้าต้องการทำกา ารศึกษาหรือพัฒนาโครงการนี้ต่อไป ทางคณะผู้จัดทำอยากจะแนะนำให้ ำการศึกษาในสองส่วน คือ ส่วนของกลไกการกระพือ เนื่องจากกลไกในโครงการนี้เป็นการใช้เกียร์บ็อกซ์ซึ่งมี น้ำหนักที่มาก ดังนั้นการพัฒนาในขั้นต่อไปจึงจำเป็นต้องลดน้ำหนัก เช่นการใช้เฟืองชุดประกอบเองเป็นต้น และ ส่วนที่สองคือส่วนของโครงสร้างปีกที่ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่เป็นไปตามทฤษฎี เพราะฉะนั้นส่วนของ โครงสร้างปีกจึงเป็นส่วนสำคัญอีกหนึ่งส่วนที่จำเป็นจะต้อง ำการศึกษาให้มากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมการบินและอวกาศ ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คณาจารย์ที่มีส่วนให้โครงการฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี อัน ได้แก่ อาจารย์ ดร. ชินภัทร ทิพย์โยภาส ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ ดร. ชรินทร์ ตรงจิตภักดี และ อาจารย์ ดร. วิศว์ ศรีพาวทกุล ที่ช่วยให้คำปรึกษา และมุมมองต่างๆ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ท่าน อื่นๆในภาควิชาการบินและอวกาศที่คอยให้ความ ช่วยเหลือในด้านต่างๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wei Shyy, YongshengLian, Jian Tang, DragosViieru, Hao Liu. Aerodynamics of low Reynolds number flyers. United States of America, New York. Cambridge University Press. 2008.
- [2] Joel E. Guerrero. Chapter 2 Aerodynamics of Flapping Flight. Available Source: <http://www.dicat.unige.it/guerrero/thesischaps/chapter2.pdf>
- [3] Erich von Holst, Karl Herzog. The principle of flight of ornithopters. Available Source: <http://www.ornithopter.de/english/principle.htm>

- [4] J Oliver Linton. The physics of flight: II. Flapping wings. Physics Education. 2007(July): pp. 358-364. Available Source: http://homepage.univie.ac.at/Heinz.Kabelka/SVP/Flug/pe7_4_004.pdf

- [5] Robyn Lynn Harmon. Aerodynamic Modeling of a Flapping Membrane Wing using Motion Tracking Experiments. Masters of Science. Department of Aerospace Engineering. University of Maryland, College Park. 2008. Available Source: http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/8968/1/Harmou_n_umd_0117N_10011.pdf