การศึกษาการหาขนาดของฟันเลื่อยที่เหมาะสมสำหรับการลดเสียงรบกวนของใบพัดในอากาศยานไร้คนขับ

The study of suitable size of saw tooth in fan blades for decreasing noise in Unmanned Aerial Vehicle

กฤษณ์ ปาจุวัง[1], ธนวิชญ์ ตั้งจาตุรนต์รัศมี[1] , ชินภัทร ทิพโยภาส[2]* และชนินทร์ ตรงจิตภักดี[2]

[1] นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ, [2] อาจารย์
ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
*ติดต่อ: fengcpt@ku.ac.th, โทรศัพท์ +66 82 490 2449, โทรสาร +66 25 79 5870

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงลักษณะการไหลของอากาศบริเวณชายหลังใบพัด โดยทำการศึกษาเชิงทดลองกับใบพัดขนาด 15x5 นิ้ว ที่ดัดแปลงชายหลังใบพัดให้มีรูปทรงคล้ายฟันเลื่อย แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 จะทำการปรับขนาดของมุมฟันเลื่อยเป็น 4 ขนาด คือ 30 45 60 และ 75 องศาโดยมีขนาดของฐานฟันเลื่อยคงที่ 0.5 เซนติเมตร ช่วงที่ 2 จะทำการเลือกมุมของฟันเลื่อยที่ดีที่สุดจากช่วงที่หนึ่ง มาทำการปรับขนาดของฐานฟันเลื่อยเป็น 5 ขนาด คือ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 และช่วงที่ 3 จะแบ่งชายหลังของใบพัดเป็น 2 ส่วนและกำหนดขนาดฐานฟันของ 2 ส่วนนี้ให้ไม่เท่ากันโดยมีมุมของฟันเลื่อยเท่าเดิม ในการทดลองทั้ง 3 ช่วงนี้ จะทดลองในสภาวะสถิต อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน และนำผลการทดลองที่วัดได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของเสียง แรงขับ และแรงบิด ของใบพัดแต่ละใบที่ได้ถูกออกแบบขึ้น โดยพบว่ามุมของฟันเลื่อยที่สามารถลดเสียงได้ดีที่สุดและสามารถสร้างแรงยกได้ตามที่ต้องการคือ มุม 30 องศา และขนาดของฐานฟันที่ลดเสียงได้ดีที่สุดและสามารถสร้างแรงขับได้ตามที่ต้องการคือ 0.4 เซนติเมตร

คำหลัก: ใบพัด ; ลดเสียงรบกวน ; ฟันเลื่อย ; อากาศยานไร้คนขับ

Abstract

In an experimental study with 15x5-inch impeller trailing adapted to a sawtooth shape. They were divided into 3 phases: Phase 1 will adjust the angle of the teeth in 4 sizes: 30, 45, 60 and 75 degrees with the base of the teeth fixed at 0.5 cm. Phase 2 select the best angle in the session one to adjust the size of the teeth in 5 sizes: 0.3 0.4 0.5 0.6 and 0.7 centimeters. And the third is dividing the blade into 2 parts and vary the teeth size from the best size in second part with constant teeth angle. Do the experiments in static conditions. Under the same environment. The results of the experimental measurements are compared to demonstrate the behavior of the thrust and torque of each blade has been designed. It was found that the angle of the sawtooth that can be reduce noise and create a desired thrust is 30 degrees and the size of the sawtooth that can best reduce noise and create the desired thrust is 0.4 centimeters.

Keywords: Propeller ; Noise Reduction ; Sawtooth ; Unmanned Aerial Vehicle

1. บทนำ

ในปัจจุบันอากาศยานขนาดเล็กหลายใบพัด (Multirotor) ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากประโยชน์ที่หลากหลาย เช่น ใช้ถ่ายรูปทางอากาศ บินสำรวจพื้นที่ต่างๆ รวมถึงภารกิจทางการทหาร แต่อากาศยานประเภทนี้มักจะมีเสียงรบกวนที่ค่อนข้างดัง เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ

จากงานวิจัยของ M.S.Howe (1991) พบว่าการสร้างฟันเลื่อยบริเวณชายหลังปีกใบพัด จะช่วยลดเสียงรบกวนลงได้จริง จึงได้จัดทำงานวิจัยนี้เพื่อทำการศึกษาและพัฒนาการมุม ขนาดและจำนวนของฟันเลื่อยที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงแรงขับที่ได้ แรงบิดที่ใช้ ความดันเสียง ความแข็งแรงและความสวยงามควบคู่กัน โดยทำการทดสอบใบพัดที่ความเร็วรอบ 6,500 – 8,500 รอบต่อนาที

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.การเกิดเสียงของใบพัด [1]

เมื่อใบพัดมีการหมุนในอัตราเร็วคงที่ จะให้กำเนิดเสียงที่มีความถี่ของเสียงคงที่ และเกิดขึ้นเป็นจังหวะซ้ำๆ เรียกว่า แหล่งกำเนิดเสียงแบบคงที่ (Steady Sources) แบ่งชนิดเสียงที่เกิดขึ้นได้ 3 ประเภท คือ

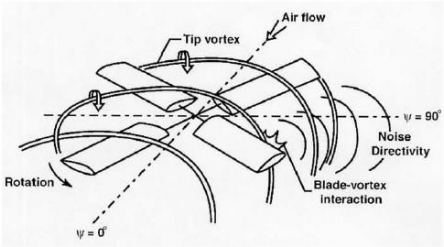
1.เสียงที่เกิดขึ้นจากความหนาคงที่ (Linear Thickness) เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศผ่านใบพัด

2.เสียงที่เกิดขึ้นจากการได้รับโหลดคงที่ (Linear Loading) เกิดจากแรงขับและแรงบิดที่ใบพัดได้รับ เป็นผลมาจากสนามความดันรอบๆการเคลื่อนที่ของใบพัด

3.เสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่ไม่คงที่ (Unsteady Source) คือเสียง ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่ขึ้นกับเวลาในการหมุนของใบพัด ที่รวมเสียงที่เกิดขึ้นเป็นจังหวะคงที่และเกิดแบบสุ่มเข้าด้วยกัน

2.2. Blade Vortex Interaction Noise [2]

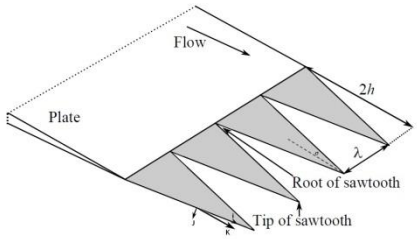
Blade Vortex Interaction Noise (BVI Noise) โดยส่วนมากจะเกิดขึ้นบนอากาศยานที่บินความเร็วต่ำ โดยใบพัด จะเคลื่อนที่ปะทะเข้ากับอากาศหมุนวน (Vortex) ที่เกิดจากส่วนปลายของใบพัดก่อนหน้า ซึ่งความเร็วเหนี่ยวนำ (Induced Velocity) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะของชายหน้าใบพัด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของความดันบนพื้นที่ผิวใบพัด ซึ่งก่อให้เกิดเสียง และแผ่ขยายออกมาในรูปของเสียงรบกวน เป็นจังหวะ (Impulse Noise)



รูปที่ 1 ใบพัดแบบ 4 ใบที่เผชิญกับ BVI

2.3. การดัดแปลงชายหลังปีกแบบฟันเลื่อย [3]

จากทฤษฎีของ M.S.Howe (1991) ได้ทำการวิเคราะห์เสียงรบกวนบนชายหลังปีกใบพัดแบบฟันเลื่อยที่เกิดขึ้น (Saw tooth Serrations) โดยเสียงที่เกิดขึ้น เกิดจากอากาศที่ไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดจากการปะทะของกระแสอากาศที่ไหลผ่านด้านบนและด้านล่างใบพัดและออกมาทางชายปีกหลัง หรือเรียกว่า Vortex เมื่อทำให้ชายหลังของปีกเป็นฟันเลื่อย ช่วยให้กระแสอากาศกระจายเข้าตามแนวตั้งฉากกับชายหลังปีก และตามแนวขนานขอบฟันเลื่อย โดยกำหนดให้ σ แทนมุมของฟันเลื่อย เมื่อกำหนดให้ σ มีขนาดเล็กจะทำให้อากาศที่ไหลตามแนวตั้งฉากกับชายปีกหลังมีค่าน้อย ทำให้เสียงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง ซึ่งการลดเสียงด้วยวิธีนี้จะเห็นผลชัดเจนเมื่อมุมติดตั้งฟันเลื่อย (σ) มีค่าน้อยกว่า 45 องศา



รูปที่ 2 ชายหลังปีกแบบฟันเลื่อย

2.4. Figure of Merit (FM)

ในการวัดประสิทธิภาพของใบพัดมีตัวแปรหลายตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยในครั้งนี้ เลือกใช้การวัดประสิทธิภาพโดยดูจากแรงขับและกำลังขับ หรือเรียกว่า Figure of Merit จากสมการที่ (1) – (2)

$$FM = \frac{Idealpowerrequired}{Actualpowerrequired} < 1 \qquad (1)$$

$$FM = \frac{C_{T_{Meas}}^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}C_{P_{Meas}}} \qquad (2)$$

โดย C_T คือสัมประสิทธิ์แรงขับ จากสมการที่ (3)

C_p คือสัมประสิทธิ์กำลังขับ จากสมการที่ (4)

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A(\omega r_t)^2} \quad (3)$$

$$C_P = \frac{Q\omega}{\frac{1}{2}\rho A(\omega r_t)^3} \quad (4)$$

โดย T คือ แรงขับ, N

Q คือ แรงบิด, Nm

r_t คือ รัศมีที่ปลายใบพัด, m

ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ, kg/m^3

A คือ พื้นที่การหมุน (Rotor Area), m^2

3. อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

3.1. อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1. ใบพัดต้นแบบ ใช้ใบพัดที่ทำจากไม้ เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 นิ้ว และใบพัดที่ทำการปรับปรุงแล้ว โดยมีฟันเลื่อยขนาดต่างๆที่ปลายใบพัด

รูปที่ 3 ใบพัดไม้ ต้นแบบ

3.1.2. ชุดไมโครโฟนสำหรับวัดเสียง และเครื่อง Calibrate ไมโครโฟน

3.1.3. โครงชุดทดสอบใบพัด (Force Balance), เครื่องวัดความเร็วรอบใบพัด และ Power Supply 2400W

3.1.4. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แก่ SolidWorks 2013, NI MAX, dBFA32 และ LabView

3.2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1. ทำการสร้างใบพัดครั้งที่ 1 ทำการปรับปรุงแบบใบพัด โดยกำหนดให้ ความกว้างฐานของฟันเลื่อยของใบพัดมีขนาดคงที่ และมุมของฟันเลื่อยแตกต่างกัน โดยทำการปรับปรุงใบพัดใหม่ 4 แบบ และแบบเดิม 1 แบบ รวมเป็น 5 แบบ คือ ใบพัดเดิม, ใบพัดซึ่งมีขนาดฟันที่มีฐานกว้าง 0.5 เซนติเมตร และมีขนาดมุมฟัน 30, 45, 60 และ 75 องศา ตามลำดับ

รูปที่ 4 CAD ของใบพัด ฐานกว้าง 0.5 ซม. ขนาดมุมฟัน 30 องศา

3.2.2. ทำการ Calibrate อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองต่างๆ จากนั้นนำไปทดสอบในห้องเก็บเสียง ทำการวัดความดังของเสียง แรงยกและแรงบิดที่เกิดขึ้น ณ ความเร็วรอบ 6,500 – 8,000 รอบต่อนาที

รูปที่ 5 การ Calibrate load cell

รูปที่ 6 การติดตั้งใบพัดและมอเตอร์ เข้ากับ Force balance เพื่อทำการทดสอบ

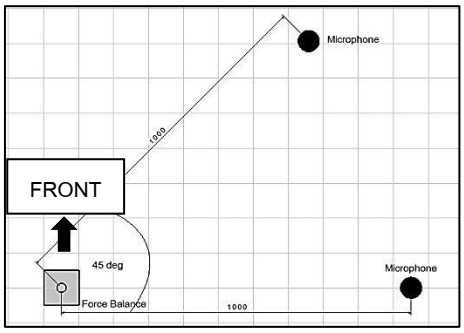
3.2.3. วิเคราะห์ผลการทดสอบครั้งที่ 1 และทำการออกแบบใบพัดใหม่ครั้งที่ 2 โดยทำการเปลี่ยนขนาดและจำนวนของฟันเลื่อยให้แตกต่างกัน 4 แบบคือ ใบพัดซึ่งมีมุมของฟันเลื่อยที่เหมาะสม และความกว้างฐานฟัน 0.3, 0.4, 0.6 และ 0.7 เซนติเมตร ตามลำดับ และนำไปทดสอบอีกครั้ง

3.2.4. วิเคราะห์ผลการทดสอบครั้งที่ 2 และ.ทำการออกแบบใบพัดและทดสอบครั้งที่ 3 โดยแบ่งชายปีกออกเป็น 2 ส่วน โดยแบ่งใบพัดจากตรงกลางของใบ และเปลี่ยนขนาดของฟันเลื่อยให้ไม่เท่ากัน โดยมีทั้งหมด 4 แบบ คือ ใบพัดที่มีมุมของฟันเลื่อยที่เหมาะสม ความกว้างฐานฟันบริเวณโคนใบพัดคงที่ ความกว้างฐานฟันบริเวณปลายใบพัดเพิ่มขึ้น – ลดลง 0.2 เซนติเมตร และ ใบพัดที่มีมุมของฟันเลื่อยที่เหมาะสม ความกว้างฐานฟันบริเวณโคนใบพัดเพิ่มขึ้น – ลดลง 0.2 เซนติเมตร ความกว้างฐานฟันบริเวณปลายใบพัดคงที่

3.3.การวัดเสียง

เนื่องด้วยเสียงคือตัวแปรหลักของงานวิจัยนี้ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีความละเอียดในการวัดสูง จึงเลือกสถานที่ในการทดสอบคือห้องเก็บเสียงที่ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดการวางตำแหน่งไมโครโฟน ให้ระยะห่างไมโครโฟนกับใบพัดมีระยะห่างรัศมี 1 เมตร โดยให้ไมโครโฟนทำมุม 90 องศา และ 45 องศากับใบพัด โดยวัดจากแผ่นวัดองศา ดังรูปที่ 8

รูปที่ 7 แผ่นวัดองศา



รูปที่ 8 แบบแปลนการวางตำแหน่งในห้องทดสอบ

4. ผลการทดลอง

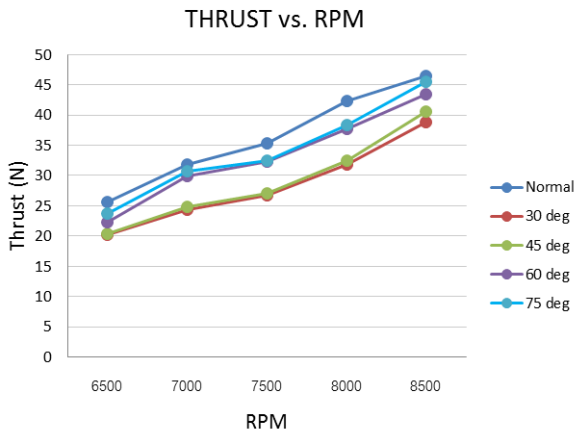
4.1 ผลการทดสอบครั้งที่ 1

4.1.1. แรงขับและแรงบิด

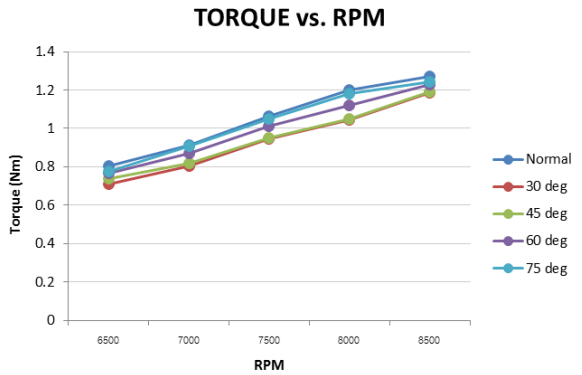
จากการทดลองพบว่า แรงขับจะแปรผันตรงกับความเร็วรอบ และใบพัดชนิดปกติ(Normal) สามารถสร้างแรงขับได้มากที่สุด เนื่องจากมีการดัดแปลงใบพัด โดยการสร้างฟันเลื่อย ทำให้มีการลดลงของพื้นที่ส่วนหนึ่งบนใบพัดดังตารางที่ 1 ส่งผลให้แรงขับของใบพัดลดลง ดังรูปที่ 9 และจากรูปที่ 10 แสดงถึงแรงบิดที่ใช้ของใบพัดที่มุมต่างๆ โดยใบพัดชนิด Normal หรือใบพัดที่ไม่มีฟันเลื่อยจะใช้แรงบิดมากที่สุดที่ทุกๆความเร็วรอบ ทั้งนี้เกิดจากพื้นที่ของใบพัด และน้ำหนักของใบพัดแต่ละใบ โดยใบพัดที่มีพื้นที่มาก จะมีน้ำหนักของใบมาก

ตารางที่ 1 พื้นที่ของใบพัดแต่ละชนิด

Type	Platform Area (cm^2)
Normal	87.47
30 deg	83.29
45 deg	84.70
60 deg	85.45
75 deg	85.77



รูปที่ 9 แรงขับของใบพัดเทียบกับความเร็วรอบใบพัด



รูปที่ 10 แรงบิดของใบพัดเทียบกับความเร็วรอบใบพัด

4.1.2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัด โดยใช้ Figure of Merit (FM)

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดทั้ง 5 ใบ โดยใช้ Figure of Merit ในการเปรียบเทียบ ได้ผลดังตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าใบพัดชนิด Normal มีค่า FM สูงที่สุด ซึ่งหมายถึง สามารถผลิตแรงขับได้สูงที่สุด ที่กำลังขับเท่ากันทุกใบ หรือใช้กำลังขับน้อยที่สุด ที่แรงขับเท่ากันทุกใบ

ตารางที่ 2 ค่า Figure of Merit ของใบพัด

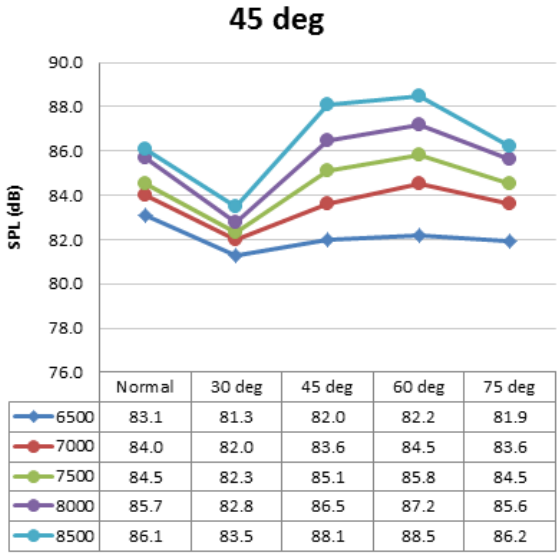
RPM	FM				
	Normal	30 deg	45 deg	60 deg	75 deg
6500	0.65	0.51	0.50	0.55	0.60
7000	0.73	0.56	0.56	0.70	0.70
7500	0.68	0.51	0.51	0.63	0.61
8000	0.75	0.56	0.57	0.67	0.65
8500	0.76	0.63	0.66	0.72	0.75

4.1.3. ผลการวัดความดันเสียง

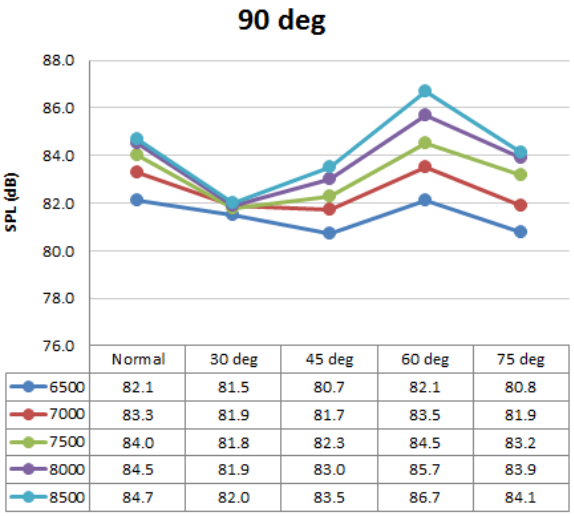
จากการทดสอบความดันเสียงที่มุมของไมโครโฟน 45 องศา ดังรูปที่ 11 ใบพัดชนิด Normal มีความดันเสียงมากที่สุด ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที และเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น สำหรับใบพัดที่มีฟันเลื่อยมุม 30 องศา มีความดันเสียงต่ำที่สุดในทุกๆความเร็วรอบ และใบพัดที่มีฟันเลื่อยมุม 75 องศามีความดันเสียงใกล้เคียงกับใบพัดชนิด Normal ส่วนใบพัดที่มีมุมของฟันเลื่อย 45 และ 60 องศานั้นที่ความเร็วรอบสูงกว่า 7,000-7,500 รอบต่อนาที มีความดันเสียงสูงกว่าใบพัดชนิด Normal อย่างเห็นได้ชัด

จากการทดสอบความดันเสียงที่มุมของไมโครโฟน 90 องศา ดังรูปที่ 12 ใบพัดชนิด Normal มีลักษณะความดันเสียงเช่นเดียวกับการทดสอบที่มุมของไมโครโฟน 45 องศา สำหรับใบพัดที่มีฟันเลื่อยมุม 30 องศานั้น มีความดันเสียงต่ำที่สุด ในทุกๆความเร็วรอบ โดยที่ความเร็วรอบ 7,500-8,500 รอบต่อนาที ความดันเสียงที่วัดได้ เพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับใบพัดใบอื่น ในส่วนของใบพัดที่มีฟันเลื่อยมุม 45 องศา และ 75 องศา มีความดันเสียงและแนวโน้มการเพิ่มความดันเสียงใกล้เคียงกับใบพัดชนิด Normal และสำหรับใบพัดที่มีมุมของฟันเลื่อย 60 องศา ที่ความเร็วรอบสูงกว่า 7,500 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่ามีความดันเสียงสูงที่สุด เมื่อเทียบกับใบพัดอื่น

จากการเปรียบเทียบความดันเสียง ทั้ง 2 ด้านของไมโครโฟนที่ตั้ง พบว่า ใบพัดที่มีมุมฟัน 30 และ 75 องศานั้น สามารถลดเสียงรบกวนได้ดีที่สุด โดยความดันเสียงของใบพัดที่มีมุมฟัน 30 องศา จะต่ำกว่าความดันเสียงของใบพัดที่มีมุมฟัน 75 องศา ประมาณ 1 dB



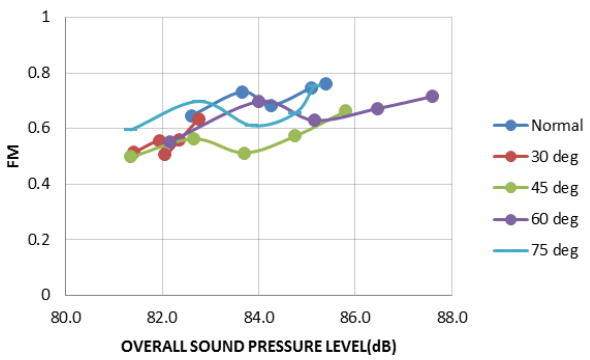
รูปที่ 11 ความดันเสียงที่ตำแหน่งไมโครโฟน 45 องศา



รูปที่ 12 ความดันเสียงที่ตำแหน่งไมโครโฟน 90 องศา

4.1.4. การเปรียบเทียบ Figure of Merit กับ Overall Sound Pressure Level

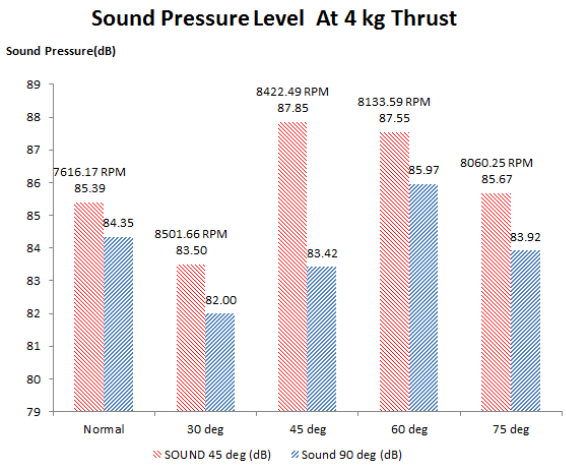
จากรูปที่ 13 กราฟแต่ละเส้นแทนใบพัดในแต่ละใบ และแต่ละจุดบนเส้นแทนความเร็วรอบ 6,500 7,000 7,500 8,000 และ 8,500 รอบต่อนาทีตามลำดับ พิจารณาจากกราฟ ถ้าค่า FM มาก หมายถึงใบพัดมีประสิทธิภาพดี และถ้าค่าความดันเสียงที่น้อย คือใบพัดที่ให้เสียงน้อยที่สุด โดยเห็นได้ว่า ใบพัดที่มีมุมของฟันเลื่อย 30 องศา และ 75 องศา มีค่า FM และ ความดันเสียง ที่น้อยกว่าใบพัดชนิด Normal ที่ทุกๆความเร็วรอบ และน้อยกว่าใบพัดชนิดอื่นๆ ที่ความเร็วรอบเกิน 7500 รอบต่อนาที



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง FM และ Overall Sound Pressure Level

4.1.5. การเปรียบเทียบ Overall Sound Pressure Level ของใบพัดทั้ง 5 ใบ ที่แรงขับ 4 กิโลกรัมเท่ากัน

เนื่องจากใบพัดชนิด Normal สามารถสร้างแรงขับได้ที่ 4 กิโลกรัม ในช่วงความเร็วรอบ 7,500 – 8,000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงความเร็วรอบปกติที่ใช้ในการขับ MAV เราจึงเลือกแรงขับที่ 4 กิโลกรัม มาใช้พิจารณาเปรียบเทียบใบพัดแต่ละใบ ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความดันเสียงของแต่ละใบพัด ที่แรงขับ 4 กิโลกรัม

ทำการเลือกใบพัดขึ้นมา 1 ใบ เพื่อเป็นใบพัดต้นแบบของการทดลองครั้งที่ 2 โดยพิจารณาจากค่าความดันเสียง ควบคู่กันไปกับแรงขับ โดยใบพัดที่เลือกคือใบพัดที่มีมุมของฟันเลื่อย 30 องศา เนื่องจากมีความดันเสียงน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแรงขับที่สร้างได้และแรงบิดที่ใช้ รวมถึงสามารถผลิตแรงขับได้ 4 กิโลกรัม ตามที่ต้องการ

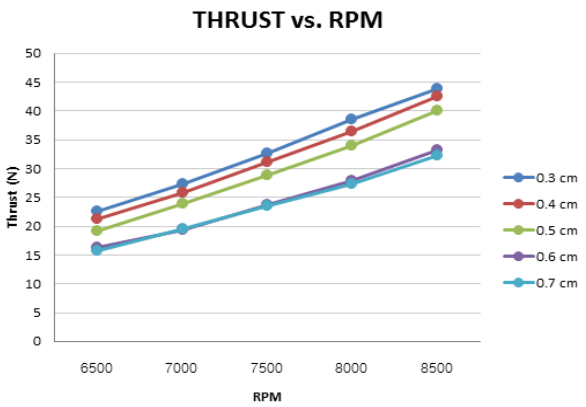
4.2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2

4.2.1. แรงขับและแรงบิด

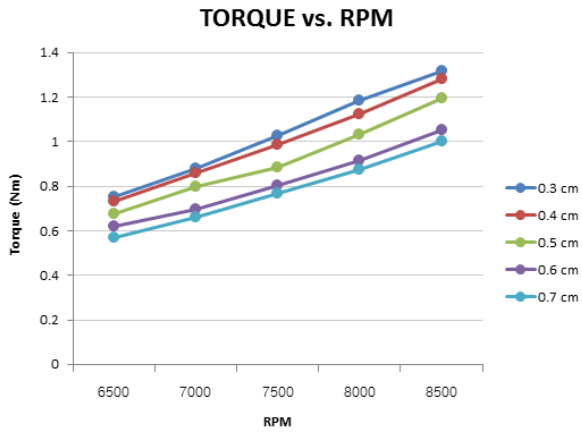
จากรูปที่ 15 ใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.3 เซนติเมตร สามารถสร้างแรงขับได้มากที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่มากที่สุด ดังตารางที่ 3 และจากรูปที่ 16 แสดงถึงแรงบิดที่ใช้ โดยใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.3 เซนติเมตร

ตารางที่ 3 พื้นที่ของใบพัดแต่ละชนิด

Type	Platform Area (mm^2)
0.3 cm	85.44
0.4 cm	84.47
0.5 cm	83.29
0.6 cm	82.18
0.7 cm	82.03



รูปที่ 15 แรงขับของใบพัดเทียบกับความเร็วรอบใบพัด



รูปที่ แรงบิดของใบพัด 16เทียบกับความเร็วรอบใบพัด

4.2.2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัด โดยใช้ Figure of Merit (FM)

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดทั้ง 5 ใบ โดยใช้ Figure of Merit ในการเปรียบเทียบ ได้ผลดัง

ตารางที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.3 เซนติเมตร มีค่า FM สูงที่สุด

ตารางที่ 4 ค่า Figure of Merit ของใบพัด

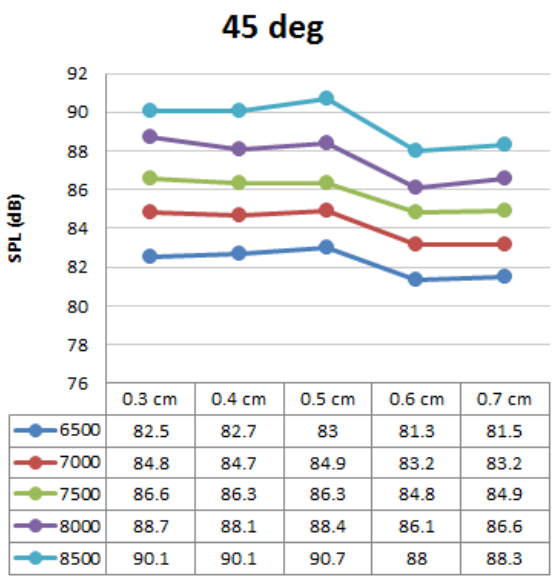
RPM	FM				
	0.3 cm	0.4 cm	0.5 cm	0.6 cm	0.7 cm
6500	0.57	0.54	0.50	0.43	0.44
7000	0.60	0.57	0.54	0.46	0.48
7500	0.63	0.61	0.61	0.50	0.52
8000	0.66	0.64	0.62	0.53	0.53
8500	0.67	0.66	0.65	0.56	0.56

4.2.3. ผลการวัดความดันเสียง

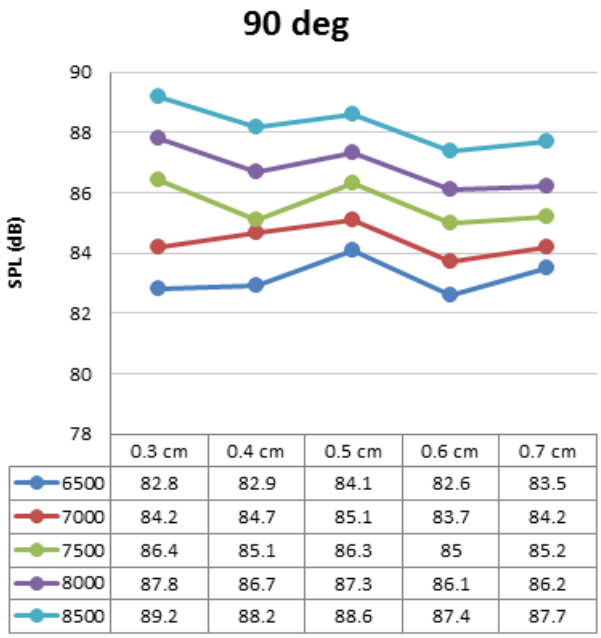
จากการทดสอบความดันเสียงที่มุมของไมโครโฟน 45 องศา ดังรูปที่ 17 ใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.5 เซนติเมตรมีความดันเสียงมากที่สุด ใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.3 เซนติเมตร จะมีความดันเสียงมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที ส่วนใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.4 0.6 และ 0.7 เซนติเมตร มีเสียงที่เบาลง เมื่อเทียบกับใบพัดอื่นๆ

จากการทดสอบความดันเสียงที่มุมของไมโครโฟน 90 องศา ดังรูปที่ 18 ใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.3 เซนติเมตร มีความดันเสียงสูงที่สุด ที่ความเร็วรอบ 7,500-8,500 รอบต่อนาที ใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.5 เซนติเมตร มีความดันเสียงสูงที่สุด ที่ความเร็วรอบ 6,500-7,000 รอบต่อนาที ส่วนใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.4 0.6 และ 0.7 เซนติเมตร มีเสียงที่เบาลง เมื่อเทียบกับใบพัดอื่นๆเช่นกัน

จากการเปรียบเทียบความดันเสียง ทั้ง 2 ด้านของไมโครโฟนที่ตั้ง พบว่า ใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.6 และ 0.7 เซนติเมตร สามารถลดเสียงรบกวนได้ดีที่สุด โดยความดันเสียงของใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.6 เซนติเมตร จะต่ำกว่าความดันเสียงของใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.7 เซนติเมตรประมาณ 0.5 - 1 dB



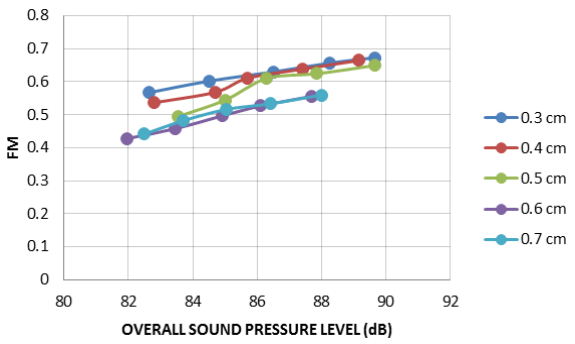
รูปที่ 17 ความดันเสียงที่ตำแหน่งไมโครโฟน 45 องศา



รูปที่ 18 ความดันเสียงที่ตำแหน่งไมโครโฟน 90 องศา

4.2.4. การเปรียบเทียบ Figure of Merit กับ Overall Sound Pressure Level

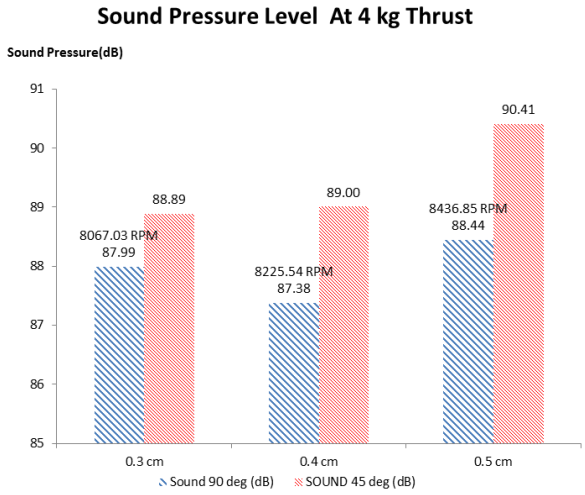
จากรูปที่ 19 เห็นได้ว่า ใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.3 และ 0.4 เซนติเมตร มีค่า FM สูงที่สุด แต่ก็มีค่าความดันเสียงมากด้วยเช่นกัน ส่วนใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.6 และ 0.7 เซนติเมตร FM และความดันเสียง น้อยกว่าใบพัดชนิดอื่นๆ



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง FM และ Overall Sound Pressure Level

4.2.5. การเปรียบเทียบ Overall Sound Pressure Level ของใบพัดทั้ง 5 ใบ ที่แรงขับ 4 กิโลกรัมเท่ากัน

เนื่องจากใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.6 และ 0.7 เซนติเมตรไม่สามารถผลิตแรงขับได้มากถึง 4 กิโลกรัมตามที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงไม่แสดงความดันเสียง ณ แรงขับ 4 กิโลกรัมของใบพัดทั้ง 2 ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ความดันเสียงของแต่ละใบพัด ที่แรงขับ 4 กิโลกรัม

ทำการเลือกใบพัดขึ้นมา 1 ใบ เพื่อเป็นใบพัดต้นแบบของการทดลองครั้งที่ 3 โดยพิจารณาจากค่าความดันเสียง ควบคู่กันไปกับแรงขับ โดยใบพัดที่มีฐานของฟันเลื่อยกว้าง 0.4 เซนติเมตร เนื่องจากมีความดันเสียงน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแรงขับที่สร้างได้และแรงบิดที่ใช้ รวมถึงสามารถผลิตแรงขับได้ 4 กิโลกรัม ตามที่ต้องการ

สำหรับการทดลองครั้งที่ 3 ยังไม่เสร็จสมบูรณ์ เนื่องจากเกิดความล่าช้าขึ้น โดยคาดว่าจะสมบูรณ์ภายใน 1-2 อาทิตย์หลังจากนี้ จึงขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วยครับ

5. สรุปผลการทดลอง

การทำชายหลังปีกของใบพัดให้มีลักษณะเป็นรูปฟันเลื่อย สามารถลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นได้จริง โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดเสียงรบกวนมากที่สุดคือขนาดของมุมฟันเลื่อย โดยมุมที่เหมาะสมคือมุม 30 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ให้แรงขับเพียงพอและมีเสียงรบกวนน้อยที่สุด ส่วนค่า FM จะมีค่าน้อยกว่าใบปกติอยู่ประมาณ 0.1 ถึง 0.17 ขนาดของมุมฟันเลื่อยยิ่งเล็ก จะส่งผลให้เสียงรบกวนที่ออกมาน้อยลงตามไปด้วย แต่ไม่ควรมีขนาดเล็กกว่า 30 องศา เนื่องจากฟันเลื่อยจะมีขนาดเล็กเกินไป ทำให้มีความแข็งแรงน้อย

สำหรับขนาดของฐานฟันเลื่อยที่มีมุมฟันเลื่อย 30 องศา ที่เหมาะสมสำหรับใบพัดนี้ จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 เซนติเมตร โดยใบพัดขนาดฐานฟันเลื่อยกว้าง 0.6 เซนติเมตรจะสูญเสียแรงขับไปมากกว่าใบพัดขนาดฐานฟันเลื่อยกว้าง 0.4 เซนติเมตร ดังนั้นใบพัดขนาดฐานฟันเลื่อยกว้าง 0.4 เซนติเมตรจึงมีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า ส่วนค่า FM จะมีค่าน้อยกว่าใบปกติอยู่ประมาณ 0.07 ถึง 0.11

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Hubbard, Harvey H.“Aeroacoustic of Flight Vehicles: Theory and Practice.” 1(1991): NASA Reference Publication 1258, 1-64.

[2] Sudarshan N. Koushik, A New Experimental Approach to Study Helicopter Blade-Vortex Interaction Noise,Ph.D. University of Maryland. 2007.

[3] M.S.Howe, “Noise produced by a sawtooth trailing edge.” Acoustical Society of America 90(1991): 483-487.