

**การศึกษาประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดกังหันลมที่มีชาย  
หลังแบบลู่ออกด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**  
**Numerical Investigations of Aerodynamic Performance of Wind Turbine Airfoil with  
a Divergent Trailing Edge using CFD**

พีระ ภาคอุทัย\* และ ชรินทร์ ตรงจิตภักดี

ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

กรุงเทพฯ 10900

\* ติดต่อ: โทรศัพท์: 086 238 9400

E-mail: p.pakuthai@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดกังหันลมแบบ 2 มิติ ด้วยการดัดแปลงรูปร่างชายหลังให้มีลักษณะแบบลู่ออก (Divergent Trailing Edge) ทั้งนี้การศึกษาคูณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศนี้กระทำโดยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งการไหลจะถูกจำลองและวิเคราะห์ด้วยสมการ RANS แบบ 2 มิติรวมถึงชุดสมการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน SST  $k-\omega$  ที่สภาวะเลขเรย์โนลด์เท่ากับ  $1 \times 10^5$  โดยชายหลังของแพนอากาศจะถูกปรับเปลี่ยนรูปร่างตามตัวแปรต่างๆ อาทิเช่น ความยาว และความโค้ง เป็นต้น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศ รวมทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบขนาดและรูปร่างของชายหลังที่มีลักษณะแบบลู่ออกให้เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับชุดใบพัดกังหันลมจริงต่อไป ทั้งนี้การทดสอบยืนยันผลการจำลองเชิงตัวเลขนั้นกระทำโดยการเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง ด้วยกรณีของแพนอากาศต้นแบบซึ่งยังไม่ดัดแปลงชายหลังของแพนอากาศ

จากการศึกษาพบว่า การดัดแปลงรูปร่างชายหลังให้มีลักษณะแบบลู่ออก มีขนาดที่เหมาะสมคือ ความกว้าง 10% เทียบกับความยาวคอร์ด โดยอัตราส่วนสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มุมปะทะ 0-10 องศา เพิ่มขึ้นเฉลี่ยจากแพนอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์ Gurney Flap 3% และแพนอากาศอากาศปกติ 90% ด้วยเหตุนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้แพนอากาศลักษณะนี้กับชุดใบพัดกังหันลมเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

**คำหลัก:** ชายหลังแบบลู่ออก, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, อากาศพลศาสตร์, กังหันลม

**Abstract**

This work is to study the aerodynamics performance of a 2-D wind turbine airfoil with divergent trailing edge modification. Studies of airfoil aerodynamic characteristic are done using computational fluid dynamics technique. Flow fields are simulated and analyzed with two-dimensional RANS simulations at

Reynolds number of  $1 \times 10^5$ . To simulate the effect of turbulence, the SST  $k - \omega$  turbulent model is used. The airfoil trailing edge is modified by parameters such as length and curvature, to study effect of trailing-edge shape. Additionally the present work aims to provide a conceptual idea of applying the divergent trailing edge for further suitable application of wind turbine. Validation is done by comparing the computed results with the experimental data.

The results show that the length of divergent trailing edge is of 10% chord. For angle of attack ranged from 0 to 10 degrees, the lift-to-drag ratio is approximately increased by 3% when compared to that of the airfoil with Gurney Flap, and by 90% when compared to that of the clean airfoil. This leads to an increment in aerodynamics performance of the airfoil and it could be possible to apply the modified airfoil for 3-D wind turbine blades to enhance power generation which will be studied in future works.

**Keywords:** Divergent Trailing Edge, CFD simulation, Aerodynamics, Wind turbine

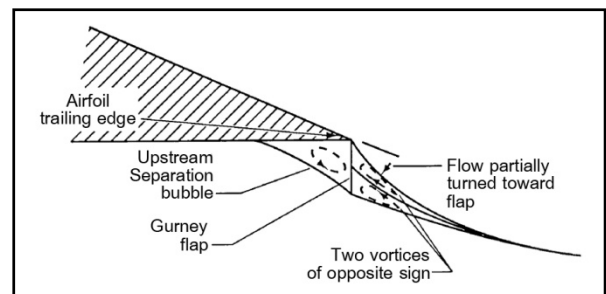
## 1. บทนำ

เนื่องด้วยในปัญหาด้านพลังงานมีความสำคัญเป็นอย่างมาก นักวิจัยทั่วโลกจึงแสวงหาพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ ที่สามารถใช้ทดแทนได้ต่อไปอย่างไม่มีความขาด หายหนึ่งนั้นคือพลังงานลม แต่เนื่องด้วยปัญหาของกังหันลมแบบใช้แรงยกตัวนั้นคือ รูปแบบของใบพัดที่ไม่สามารถแปลงพลังงานลมมาเป็นพลังงานกลได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพกำลังงานสูงสุดสามารถสร้างได้ถึง 0.59% ตามค่าจำกัดของเบตซ์ (Betz limit) [1]

โครงการวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมโดยพัฒนารูปร่างของกังหันลมในรูปแบบใหม่คือ แพนอากาศชายหลังแบบลู่ออกซึ่งได้ถูกปรับปรุงรูปร่างด้วยวิธีการสร้างพื้นที่ปิดบริเวณที่เกิดฟองแยกไหล (Separation bubble) ดังรูปที่ 1 บนแพนอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์ Gurney flap ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ผลต่างความดันเพิ่มขึ้นบริเวณชายหลัง (Trailing edge) ทำให้เกิดคุณสมบัติต่างๆดังนี้ คือ เพิ่มอัตราส่วนแรงยกสูงสุด ช่วยลดมุมปะทะของแพนอากาศที่ศูนย์องศา และเพิ่มโมเมนต์ยกของแพนอากาศ แต่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบด้วยแพนอากาศแบบ Supercritical airfoil ที่มีการดัดแปลงให้เป็นแพนอากาศชายหลังแบบลู่ออก และ Gurney flap [3]

พบว่าเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ Gurney flap จะทำให้สัมประสิทธิ์แรงยกเพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เมื่อใช้แพนอากาศที่ติดตั้งชายหลังแบบลู่ออกสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าต่ำกว่าของแพนอากาศแบบติดตั้งอุปกรณ์ Gurney flap และสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

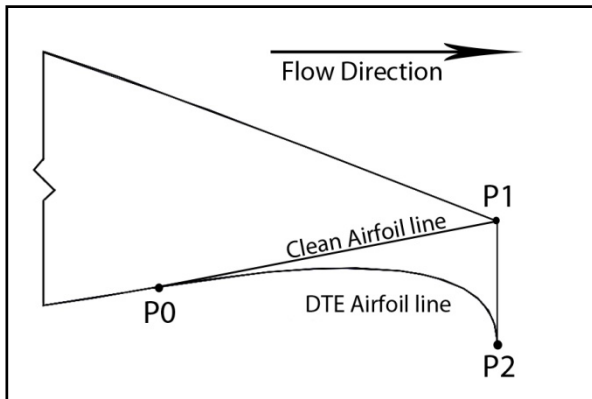


รูปที่ 1 การไหลของกระแสอากาศบริเวณชายหลังของแพนอากาศที่ติดตั้ง Gurney flap [2]

งานวิจัยนี้จึงพัฒนารูปร่างชายหลังของแพนอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยการติดตั้งชายหลังแบบลู่ออก ซึ่งจะช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้านแต่ยังคงคุณสมบัติเด่นของแพนอากาศแบบ Gurney flap เอาไว้ ซึ่งชายหลังแบบลู่ออกนั้นเป็นวิธีการดัดแปลงรูปร่างทางกายภาพบริเวณชายหลัง ซึ่งต้องการรูปร่างโค้งที่เป็นพื้นที่ปิดพอดีกับบริเวณที่เกิดฟองแยกไหลจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมรูปร่างและจุดต่างๆให้เหมาะสมโดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การใช้

สมการ Bezier curve แบบ Quadratic ดังสมการที่ (1) โดยที่  $t \in [0, 1]$  และ  $P_0, P_1, P_2$  เป็นตำแหน่งที่ต้องการปรับเปลี่ยนดังรูปที่ 2

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2(1-t)tP_1 + t^2 P_2 \quad (1)$$



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งที่ต้องการวาดเส้นโค้งด้วยสมการ Bezier curve แบบ Quadratic [4]

## 2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกังหันลมขนาด 500 วัตต์ โดยทำการศึกษาในระนาบ 2 มิติ ซึ่งใช้พื้นที่หน้าตัดที่ระยะห่างประมาณ 75% ของความยาวใบพัดจากแกนหมุนซึ่งได้ความยาวคอรัตเท่ากับ 108.807 มิลลิเมตรซึ่งมีรายละเอียดแสดงในรูปที่ 3

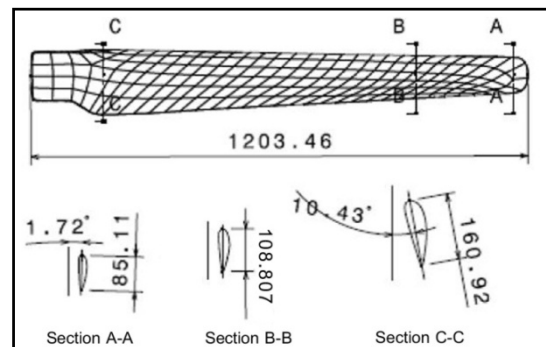
กำหนดขอบเขตการทำแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้มีลักษณะขอบเขตดังรูปที่ 4 ทั้งนี้กำหนดความยาวขอบเขตจากชายหลังของแพนอากาศประมาณ 20 เท่าของคอรัตคือ AB, CD, EF และความสูงขอบเขตจากแพนอากาศประมาณ 13 เท่าของคอรัตคือ CA, DB, CE และ DF โดยมีลักษณะโค้งด้านหน้าคือ AGE ทั้งนี้ขอบเขต AB, EF, AGE กำหนดให้เป็น Velocity Inlet และขอบเขต BD, DF กำหนดเป็น Pressure Outlet และมีแพนอากาศที่ทำการทดสอบกำหนดขอบเขตเป็น Wall

บริเวณผิวของแพนอากาศกำหนดให้กริดชั้นแรกมีระยะห่างจากผิวแพนอากาศ  $y^+ \approx 1-5$  โดยกำหนดให้ขอบเขตให้ใช้กริดแบบผสม ซึ่งมีบริเวณผิวแพน

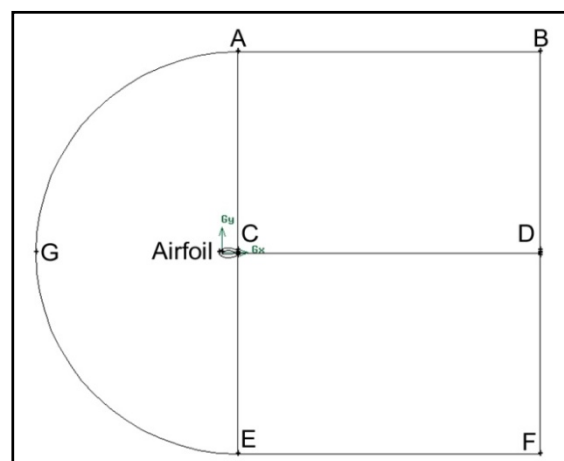
อากาศใช้กริดรูปทรงสามเหลี่ยม และภายนอกใช้กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 5 ซึ่งจำนวนกริดทั้งหมดประมาณ 180,000 กริดในการทำแบบจำลองครั้งนี้

โดยการศึกษาคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศนี้กระทำโดยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งการไหลจะถูกจำลองและวิเคราะห์ด้วยสมการ RANS แบบ 2 มิติรวมถึงชุดสมการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน SST  $k-\omega$  ที่สภาวะเลขเรย์โนลด์เท่ากับ  $1 \times 10^5$  โดยแพนอากาศจะถูกปรับเปลี่ยนรูปร่างตามตัวแปรต่างๆคือความยาวและความสูงโดยใช้สมการ Bezier curve เป็นสมการกำหนดความโค้ง

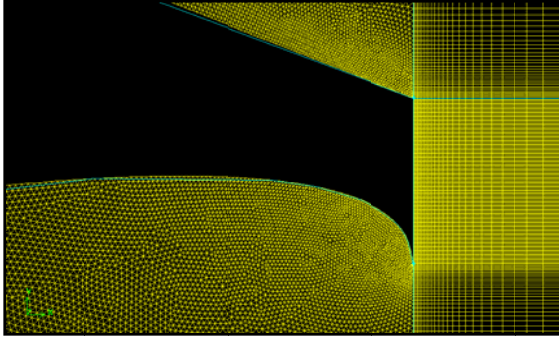
จากการศึกษา Gurney flap ที่ช่วยให้ประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุดที่ความสูง 3% เทียบกับความยาวคอรัต [5] งานวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษารูปร่างของชายหลังแบบลู่ออกที่ความสูง 3% ของความยาวคอรัต และค่าความยาวที่ 5%, 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% ของความยาวคอรัตดังรูปที่ 6



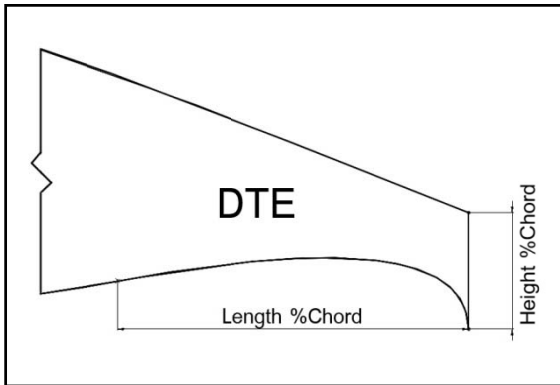
รูปที่ 3 แพนอากาศใบพัดกังหันลม



รูปที่ 4 ลักษณะขอบเขตการทำแบบจำลอง



รูปที่ 5 แสดงรูปร่างของกริดบริเวณชายหลัง



รูปที่ 6 การปรับเปลี่ยนรูปร่างชายหลังแบบลู่ออก

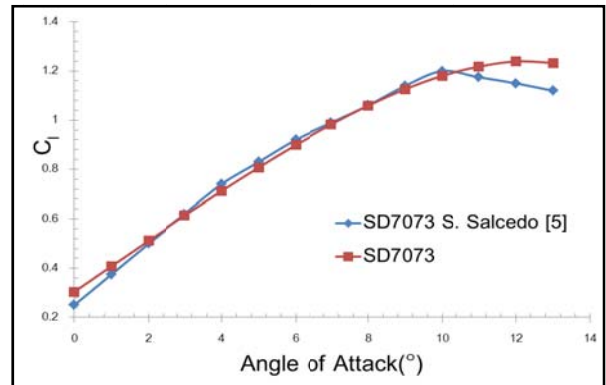
การตรวจสอบความถูกต้องทำโดยใช้แผนอากาศชนิด SD7073 มาทำการเปรียบเทียบผลความถูกต้องที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ  $1 \times 10^5$  [5] จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะดังรูปที่ 7 และเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงยกกับสัมประสิทธิ์แรงต้านดังรูปที่ 8

### 3. ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

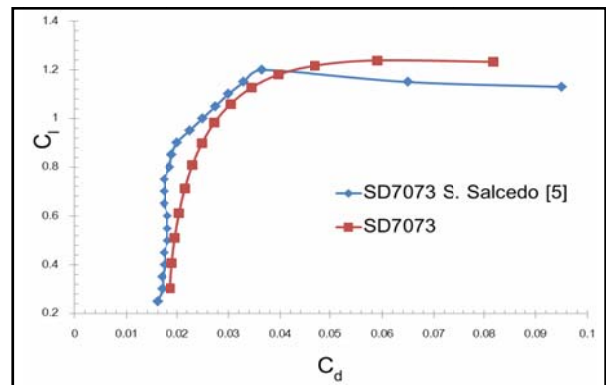
จากการศึกษาประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของแผนอากาศใบพัดกังหันลมที่มีชายหลังแบบลู่ออกเมื่อเปรียบเทียบ Velocity Contours ระหว่างอุปกรณ์ Gurney Flap และ ชายหลังแบบลู่ออกดังรูปที่ 9 จะสังเกตได้ว่าชายหลังแบบลู่ออกนั้นสามารถสร้างพื้นที่ปิดได้สมบูรณ์

เมื่อทำการเปรียบเทียบแผนอากาศชายหลังแบบลู่ออก และ แผนอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์ Gurney Flap ด้วยสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะรูปที่ 10 ทำให้ทราบว่าแผนอากาศชายหลังแบบ

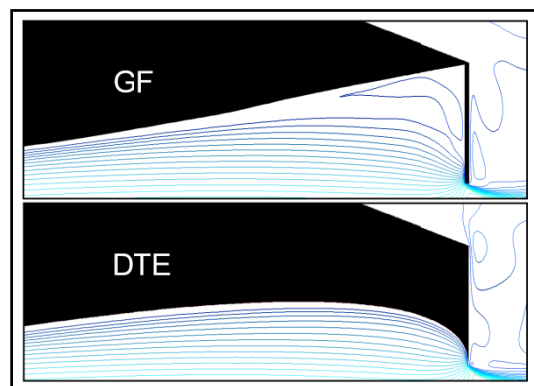
ลู่ออกมีสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงกว่าแผนอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์ Gurney Flap ในช่วงมุมปะทะที่ 0-4 องศา โดยความยาว 10% คอร์ดนั้น มีสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดที่ 1.0412 มุมปะทะที่ 14 องศา ดังรูปที่ 11



รูปที่ 7 แผนภาพตรวจสอบความถูกต้องระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะ



รูปที่ 8 แผนภาพตรวจสอบความถูกต้องระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน



รูปที่ 9 รูปเปรียบเทียบ Velocity Contours ระหว่าง Gurney Flap และชายหลังแบบลู่ออก

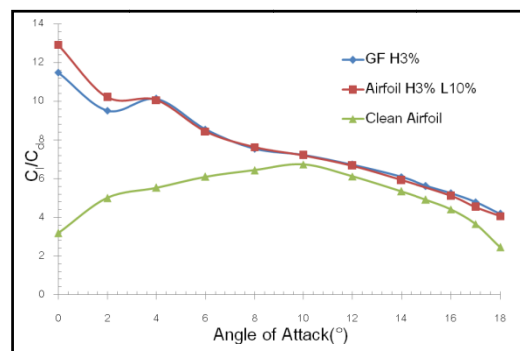
โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ทำให้ทราบว่าแพนอากาศชายหลังแบบลู่ออกมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานใกล้เคียงกับแพนอากาศปกติที่มุมปะทะ 0 องศา ดังรูปที่ 12 ทั้งนี้เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะ ดังรูปที่ 13 ซึ่งอธิบายได้ว่าที่มุมปะทะใกล้ 0 องศาของแพนอากาศชายหลังแบบลู่ออกนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่สูงขึ้นแต่สัมประสิทธิ์แรงต้านใกล้เคียงกับแพนอากาศปกติจึงทำให้สัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นสัมประสิทธิ์แรงต้านได้เพิ่มขึ้นตามมุมปะทะทำให้สัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าลู่เข้าสู่แพนอากาศแบบปกติ

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่มุมปะทะ 0, 6, 14 องศา ดังรูปที่ 14, 15, 16 ตามลำดับ มีการกระจายความดันที่จุดต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันจึงสรุปได้ว่า ความยาวของแพนอากาศชายหลังแบบลู่ออกไม่มีผลกระทบต่อการกระจายความดันทั้งแพนอากาศ แต่อาจมีผลต่อโมเมนต์มุมพิทช์ ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของชายหลังแบบลู่ออกไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงยก ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 11 และรูปที่ 12 แสดงสัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงต้านต่างกันเพียงเล็กน้อย

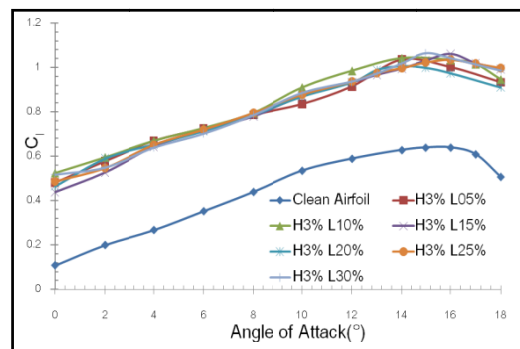
#### 4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดกังหันลมที่มีชายหลังแบบลู่ออกด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทำให้ทราบว่าการไหลที่ถูกจำลองและวิเคราะห์ด้วยสมการ RANS แบบ 2 มิติรวมถึงชุดสมการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน SST  $k-\omega$  ที่สภาวะเลขเรย์โนลด์เท่ากับ  $1 \times 10^5$  โดยกำหนดขอบเขตที่ใช้ กริดแบบผสมระหว่างกริดสามเหลี่ยม และกริดสี่เหลี่ยม สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนแพนอากาศชายหลังแบบลู่ออกได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์นั้น ความยาวชายหลัง 10% คอร์ด นั้นมีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยอัตราส่วนสัมประสิทธิ์แรงยกต่อ

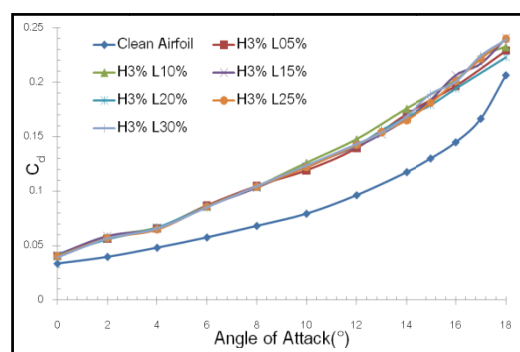
สัมประสิทธิ์แรงต้านที่มุมปะทะ 0-10 องศาเพิ่มขึ้นเฉลี่ยจากแพนอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์ Gurney Flap 3% และแพนอากาศอากาศปกติ 90% ทั้งนี้ยังช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงยกที่มุมปะทะ 0 องศาแต่สัมประสิทธิ์แรงต้านที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าแพนอากาศชายหลังแบบลู่ออกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ให้สูงขึ้นได้ จึงเป็นแนวทางในการพัฒนาสู่การวิเคราะห์แบบ 3 มิติต่อไปในอนาคต



รูปที่ 10 แผนภาพสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะด้วยแพนอากาศ 3 ชนิด

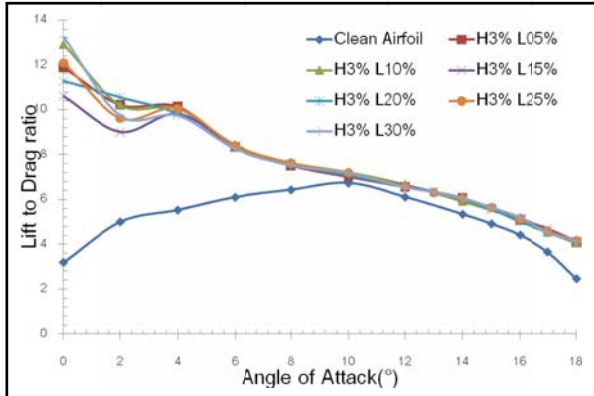


รูปที่ 11 แผนภาพสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะ

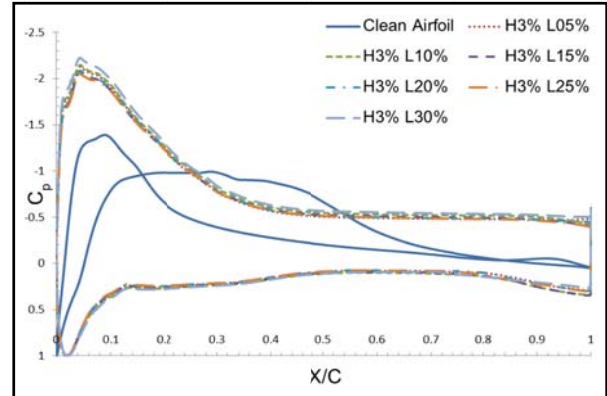


รูปที่ 12 แผนภาพสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะ

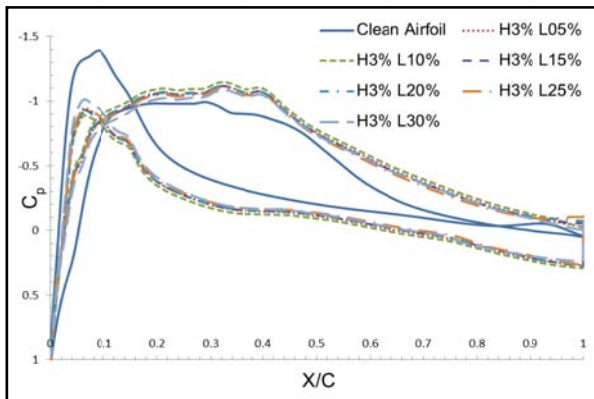




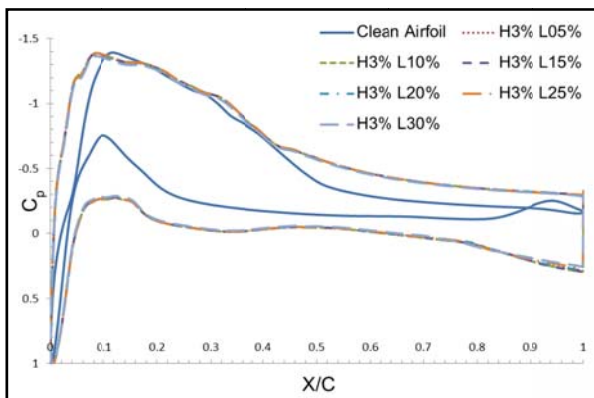
รูปที่ 13 แผนภาพสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะ



รูปที่ 16 แผนภาพสัมประสิทธิ์ความดันกับตำแหน่งตามอัตราส่วนความยาวคอร์ดที่มีมุมปะทะ 14 องศา



รูปที่ 14 แผนภาพสัมประสิทธิ์ความดันกับตำแหน่งตามอัตราส่วนความยาวคอร์ดที่มีมุมปะทะ 0 องศา



รูปที่ 15 แผนภาพสัมประสิทธิ์ความดันกับตำแหน่งตามอัตราส่วนความยาวคอร์ดที่มีมุมปะทะ 6 องศา

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ และภาควิชาวิศวกรรมการบินอวกาศที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชรินทร์ ตรงจิตภักดี (2550). *กังหันลมเพื่อพลังงานทดแทน*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [2] Neuhart H. and Pendergraft OC. (1988). A water tunnel study of gurney flaps, *NASA Technical Memorandum 4071*.
- [3] Y.C. Li, J.J. Wang and J. Hua (2006). Experimental investigations on the effects of divergent trailing edge and Gurney flaps on a supercritical airfoil, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 11(2-3), March-April 2007, pp. 91-99.
- [4] Phil Tregoning (2007). Bézier curve, URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Bezier\\_curve](http://en.wikipedia.org/wiki/Bezier_curve), access on 25/06/2011.
- [5] J.J. Wang, Y.C. Li, K. S. Choi (2007). Gurney flap-Lift enhancement, mechanisms and application, *Aerospace Sciences*, Vol. 44(1) January 2008, pp. 22-47.