การศึกษาใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล

Studying of Blade Effect of 1.5 MW Wind Turbine Using CFD Technique

พินิจ สังข์ทอง[1], วิรชัย โรยนรินทร์[2]*

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail: wirachairoynarin@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ นำเสนอการวิเคราะห์ผลจากความยาวใบกังหันลมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยมีความยาวใบ 3.9, 4.1 และ 6.8 เมตร ตัวแปรที่ใช้คือ ความเร็วลมเฉลี่ย 5 เมตร/วินาที มุมองศาการบิดของใบ 3 องศา และมีรูปร่างเป็นชนิดเดียวกันทั้งสามขนาด โดยการใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) CFD ช่วยในการวิเคราะห์ คือโปรแกรม CF-Design V.8 ศึกษาสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงผลักของใบ ผลที่ได้นำมาคำนวณค่ากำลังงานของใบแต่ละขนาด โดยนำมาประยุกต์เข้ากับการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การยกตัวที่ดีที่สุดคือที่ความยาวใบ 6.8 เมตร มีค่า 1.907 สัมประสิทธิ์การผลักตัว 0.091 ทั้งนี้เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบมีขนาดเพิ่มขึ้น 5 เมตร กำลังงานที่ได้จากใบกังหันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 20% และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูล Power curve กับบริษัทผู้ผลิตแล้วพบว่ามีค่าแตกต่างกัน 9% ดังนั้นโปรแกรม CFD สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลม

คำหลัก: สัมประสิทธิ์แรงยก, สัมประสิทธิ์แรงผลัก, CFD

Abstract

This research presents the study of blade length of the wind machine which effect to the Power. The blade length of 3.9, 4.1 and 6.8 m. which incoming wind speed of 5 m/s, pitch angle 3 degree on the same blade profile phenomena were used for the study. The investigation uses commercial Computation Fluid Dynamics (CFD) named CF Design V.8. The lift and drag coefficient (Cl, Cd) also studied and investigated. The results were used to compute the power of wind machine at varies parameters above. Additionally, the results also applied to scaling up wind machine of 1.5 MW for the comparison purpose. Results from the study shown that extending blade diameter of 5 m. increasing 20 % of power which high lift and drag coefficient of 1.90 and 0.091, respectively. The power shown the reasonable results compare to power curve shown by company which errors of 9 %. The CFD technique was shown the promising results for the performance investigation of the wind machine.

Keywords: Lift coefficient, Drag coefficient, CFD, Turbine Design

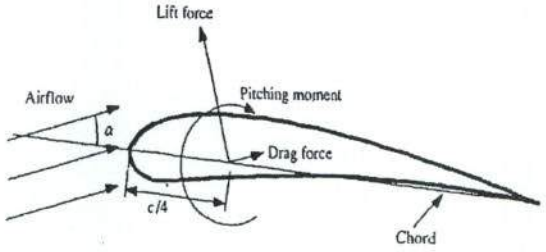
1. บทนำ

เนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ที่มีศักยภาพของประเทศไทย มีค่าเฉลี่ยประมาณ 5 m/s ดังนั้นการที่จะทำให้ประสิทธิภาพของกังหันลมผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ คือการขยายช่วงความยาวใบของกังหันลม ให้เหมาะสมกับพลังงานของลมที่เข้ามา การวิเคราะห์ข้อมูลของแรงยกตัวและแรงผลักตัวจากความยาวใบ นั่นคือการหาประสิทธิภาพการยกตัวและประสิทธิภาพการผลักตัวของใบกังหันลม ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ให้คำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล (Computation Fluid Dynamics) หรือ CFD ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในด้านกลศาสตร์ของของไหล ที่ไหลผ่านรูปทรงที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้ ซึ่งการทดสอบในอุโมงค์ลมจริงๆ อาจต้องใช้ระยะเวลา และค่าใช้จ่ายที่สูงมาก CFD จึงกลายเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมและการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของของไหล งานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของของไหลมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมที่มีขนาดความยาวใบที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นประโยชน์และแนวทางในการพิจารณาเลือกขนาดใบให้เหมาะสม สำหรับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ในประเทศไทยต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดของแรงยก และแรงผลัก (Lift force and Drag force)

แรงกระทำต่อแพนอากาศ(Airfoil) และแรงดังกล่าวที่อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลจะถูกเรียกว่า "แรงยก" (Lift force) แทนด้วยสัญลักษณ์ "L" แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศ ซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิว และแรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหลจะถูกเรียกว่า "แรงผลัก" (Drag force) แทนด้วยสัญลักษณ์ "D" ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเกิดแรงยกและ แรงผลักบน Air foil

ค่าแรงยกและแรงผลัก จะได้จากการทดสอบแพนอากาศดังกล่าวในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยกและแรงหน่วงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก C_L และสัมประสิทธิ์แรงผลัก C_D โดยที่นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะเขียนได้เป็น

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho A U_{rel}^2} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho A U_{rel}^2} \quad (2)$$

เมื่อ C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D = สัมประสิทธิ์แรงผลัก
L = แรงยก (Lift force, N)
D = แรงผลัก (Drag force, N)
ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
A = พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ (m^2)
U_{rel} = ความเร็วลมสัมพัทธ์ (m/s)

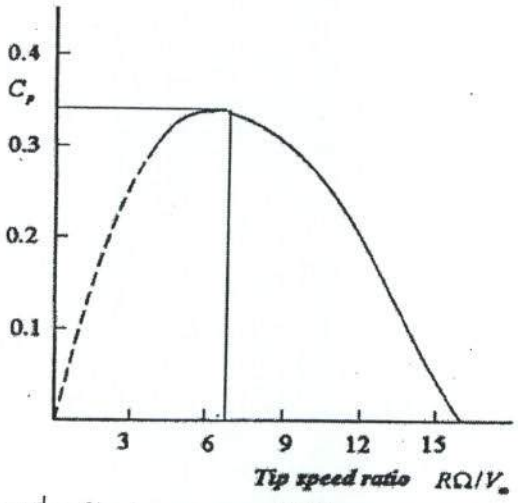
2.2 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio)

สมรรถนะของกังหันลมที่ต้องพิจารณา คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังงาน C_P กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio) จะแสดงตามรูปที่ 2 สำหรับเลือกอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio) ให้ได้ค่า C_P สูงสุด ซึ่งเป็นการหาว่าใบกังหัน

หมุนทำงานได้ประสิทธิภาพดีสุดที่ TSR เท่าใด อัตราส่วนความเร็วปลายใบเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วปลายใบกังหันลมกับความเร็วลม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{v}{U_0} = \frac{r\Omega}{U_0} \qquad (3)$$

เมื่อ λ = อัตราส่วนความเร็วปลายใบ
Ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
r = รัศมีใบกังหันลม (m)
U_0 = ความเร็วลม (m/s)

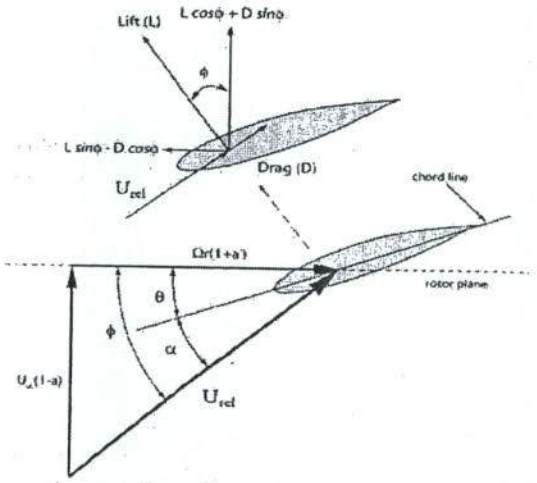


รูปที่ 2 ตัวอย่างสมรรถนะกังหันลมแกนนอน [1]

2.3 ทฤษฎี Blade Element Theory

เป็นการพิจารณาแรงที่กระทำบนใบกังหันในลักษณะสองมิติ แล้วคำนวณค่าคุณลักษณะต่างๆที่มีผลกับใบกังหันลม เช่น แรงยก แรงผลัก ที่เป็นผลมาจากมุมปะทะ และความเร็วลม

เมื่อพิจารณาที่ใบกังหันลมในแต่ละส่วน (Blade Element) ความเร็วที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้เป็นความเร็วในแนวแกน และความเร็วในแนวแกนหมุน



รูปที่ 3 แรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดรูป airfoil ของใบกังหันลม [1]

พิจารณาแรงจากเวกเตอร์ตามรูปที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์

$$F_y = L\sin\phi - D\cos\phi \qquad (4)$$

$$F_z = L\cos\phi + D\sin\phi \qquad (5)$$

$$\tan\phi = \frac{(1-a)}{\lambda(1+a')} = \frac{U_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} \qquad (6)$$

เมื่อ a = แฟคเตอร์ความสูญเสียในแนวแกน
a' = แฟคเตอร์ความสูญเสียในแนวรัศมี

จากทฤษฎีของ Betz กังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ a มีค่าเท่ากับ 1/3 สำหรับ a' จะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากไม่คิดการเกิดการควงของอากาศ (Wake Rotation) ดังนั้นเมื่อพิจารณากังหันลมทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุด จะได้สมการเป็น [1-3]

$$\phi = \tan^{-1}\frac{2U_0}{3r\Omega} \qquad (7)$$

$$U_{rel} = \sqrt{(\frac{2U_0}{3})^2 + (r\omega)^2} \qquad (8)$$

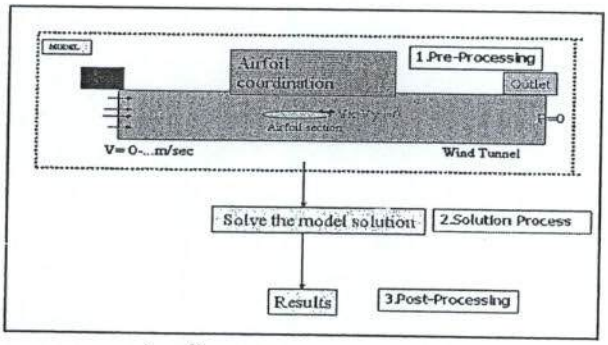
กำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมคำนวณจากสมการ

$$P=\frac{1}{2}\rho A U_0^3(\cot\phi)(1+\cot^2\phi)(C_L\sin\phi-C_D\cos\phi)B \quad (9)$$

เมื่อ P = กำลังงานจากใบกังหันลม (Watts)
C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D = สัมประสิทธิ์แรงผลัก
ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
A = พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ (m^2)
U_0 = ความเร็วลม (m/s)
B = จำนวนใบกังหันลม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนี้ จะใช้กระบวนการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamics) หรือ CFD มาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำการทดสอบกับใบของกังหันลม 3 ขนาด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใบที่แตกต่างกัน คือ 72, 77 และ 82 เมตร โดยทำการย่อส่วนใบกังหันลมผลิตไฟฟ้ากำลังผลิตขนาด 1.5 MW ลงมาด้วยมาตราส่วน 1 ต่อ 9.15 จากขนาดรัศมีใบเดิมที่ 37.5 เมตร มาเป็นขนาดรัศมีใบ 4.1 เมตร ย่อส่วนใบลงมาด้วยมาตราส่วน 5.88 จากขนาดรัศมีใบที่เพิ่มขึ้น จากขนาด 40 เมตร มาเป็นขนาดรัศมี 6.8 เมตร และย่อส่วนใบลงมาด้วยมาตราส่วน 8.97 จากขนาดรัศมีใบที่ลดลง จากขนาด 35 เมตร มาเป็นขนาดรัศมี 3.9 เมตร และทำการหากำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมแต่ละขนาด



รูปที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณ [4]

3.1 การประมวลผลของโปรแกรม

ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรม ซึ่งมี 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 4 คือ

- Pre-processing เป็นขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ เช่น การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) แรงกระทำ (Load) การกำหนดค่าความดัน และอุณหภูมิ เป็นต้น

- Solution การคำนวณหาผลเฉลย หรือหาคำตอบจากการใช้สมการทางคณิตศาสตร์โดยแก้ปัญหาว่าเป็นโมเดลคณิตศาสตร์แบบใด

- Post-processing การแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงานหรือกราฟหรือหาค่าแรงและโมเมนต์ต่างๆ

3.2 การสร้างรูปแบบการวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลจะแยกตามวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ดังนี้

- Building the Mathematical Model (สร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์)

- Building the Computational Fluid Dynamics Model (สร้างรูปแบบชิ้นส่วนย่อย)

- Solving the Computational Fluid Dynamics Model (สร้างรูปแบบการแก้สมการ)

- Analysis the Results (การวิเคราะห์ผลเฉลย)

3.3 การกำหนดข้อมูลและตัวแปรต่าง ๆ

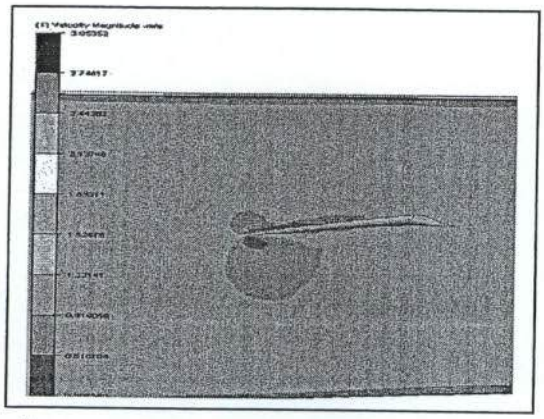
1. กำหนดความเร็วลมทางด้านขาเข้าเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที

2.กำหนดให้อุโมงค์ลมมีความยาว 30 เมตร

3.กำหนดความดันขาออกจากอุโมงค์ลมเท่ากับศูนย์ความดันเกจน์

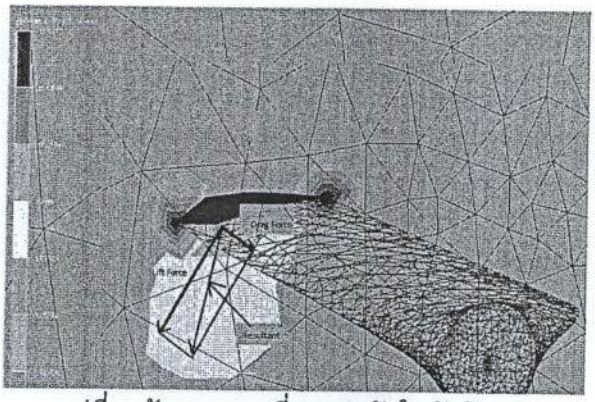
4.กำหนดผิวของใบกังหันมีความเร็วเริ่มต้นทุกทิศทาง X Y Z เท่ากับศูนย์

5.กำหนดให้อากาศเป็นชนิดของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid)



รูปที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ใบกังหันภายในอุโมงค์ลม

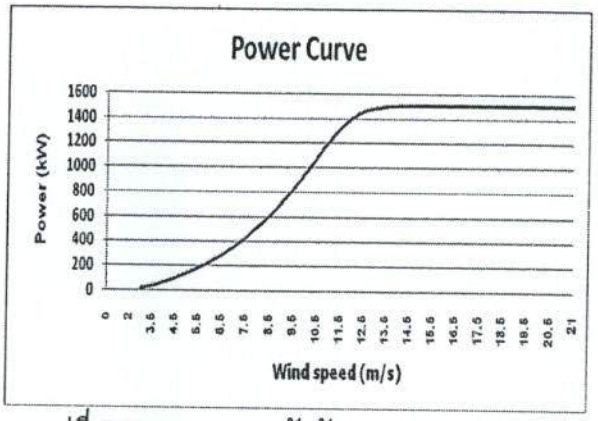
รูปที่ 5 เป็นการแสดงให้เห็นการวิเคราะห์ใบกังหันภายในอุโมงค์ลม ด้วยโปรแกรม CFD ตามค่าต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น สำหรับรูปที่ 6 จะเป็นตัวอย่างลักษณะของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากแรงยก และแรงผลักที่เป็นผลมาจากมุมปะทะ และความเร็วลมที่เข้ามา



รูปที่ 6 ลักษณะแรงที่กระทำกับใบกังหันลม

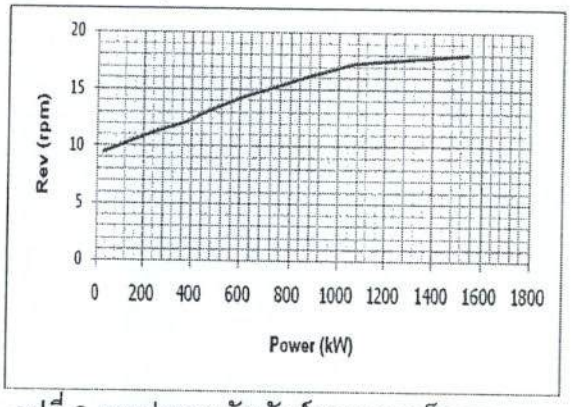
3.4 การคำนวณหากำลังที่ได้จากใบกังหันลม

การคำนวณหากำลังที่เกิดขึ้นจากใบกังหันลม สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 9 ทั้งนี้ต้องทราบมุมความเร็วลมสัมพัทธ์ เพื่อนำมาแทนค่าในสมการ ซึ่งสามารถหาได้จากการนำ Power Curve ของกังหันลมขนาด 1.5MW มาวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต (ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต)



รูปที่ 7 Power curve กังหันลมขนาด 1.5 MW

สำหรับความเร็วลมที่พิจารณาคือที่ 5 m/s จาก Power curve ของกังหันลม ตามรูปที่ 7 จะได้กำลังผลิต 140 kW และจากกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต ตามรูปที่ 8 โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 10 rpm



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต

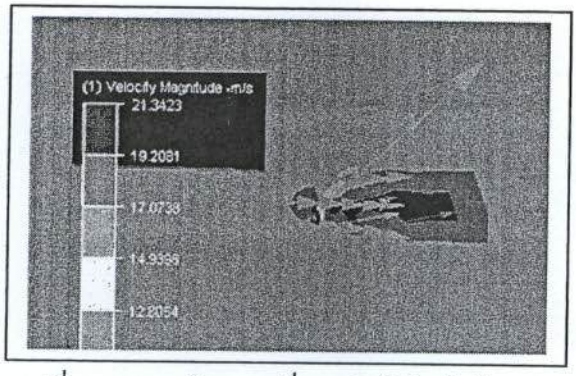
เมื่อแทนค่ารอบการหมุนของโรเตอร์ ที่ความเร็วลม 5 m/s สามารถคำนวณหามุมความเร็วลมสัมพัทธ์ของใบกังหันได้ตามสมการที่ 7 โดยค่า CL และ CD ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งค่าแรงยก (L) และแรงผลัก (D) จะได้มาจากผลของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD ตามขนาดของใบกังหันลมแต่ละขนาด

4. ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันลมแต่ละขนาดด้วยโปรแกรม CFD จะได้ผลของการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับรูปที่ 9 จะแสดงเวคเตอร์ของแรงที่กระทำกับใบกังหันลม

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก CFD

ขนาดใบ	3.9 m	4.1 m	6.8 m
Fy(N)	0.83	1.14	4.23
Fz (N)	22.16	28.58	88.06
Centroid (m)	1.55	1.64	2.67



รูปที่ 9 เวคเตอร์ของแรงที่กระทำกับใบกังหันลม

ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์

ขนาดใบ	3.9 (35m)	4.1 (37.5m)	6.8 (40m)
L (N)	22.18	28.60	88.16
D (N)	0.83	1.14	4.23
C_L	1.820	1.866	1.907
C_D	0.068	0.074	0.091
P(kW)	12.97	16.64	31.24
Scaling	8.97	9.15	5.88
P(kW)	116.34	152.26	183.69
%	-23.59%	-	+20.64%

5. สรุปผล

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD พบว่าขนาดของใบกังหันที่เปลี่ยนแปลงไป มีผลต่อกำลังงานที่ได้จากใบกังหันลม แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วลม 5 m/s แล้วเพิ่มขนาดใบกังหันลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบเพิ่มขึ้น 5 เมตร จากขนาด 77 เมตร เป็น ขนาด 82 เมตร กำลังงานทางกลที่ได้จากใบกังหันลมจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 20% หรือหากลดขนาดใบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบเล็กลง 5 เมตร กำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมก็จะลดลงประมาณ 20% เช่นกัน ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความเร็วลมเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าให้กับกังหันลมได้มากขึ้น ในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่จึงควรพิจารณาขนาดความยาวใบกังหัน เพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบพระคุณ บุคลากรเจ้าหน้าที่ อาคารวิจัยประยุกต์ พลังงานลม น้ำ และแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย และจัดทำเอกสารเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] J.F. Manwell, J.G. Mcgowan and A.L. Rogers, (2009) Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, UK.

[2] S.N. Bhadra, D. Kastha and S.Banerjee (2005) Wind Electrical Systems, Oxford University Press

[3] Francis M. Vanek, Louis D. Albright (2008) Energy Systems Engineering Evaluation and Implementation, Mc Graw Hill.

[4] สว่าง ชาติทอง, วิรชัย โรยนรินทร์ (2553).การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรอบการทำงานสูงสุดของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่7 จังหวัดเพชรบุรี