

การออกแบบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาด 20 กิโลวัตต์

Designing of 20 kW Wind Turbine System

สว่าง ชาติทอง¹, วิรัชย์ โรยนรินทร์^{*1}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

* ติดต่อ: E-mail: sawang@swu.ac.th, (E-mail: wirachairoynarin@yahoo.com), โทรศัพท์: (02) 549 3497, โทรสาร: (02) 549 3432

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์การออกแบบระบบทางกลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ โดยใช้ผลจากการวิเคราะห์ระบบทางกล มาผนวกเข้าด้วยกันกับ ผลการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยใช้ผลการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์การไหล ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CF-Design V 8.0 ในการออกแบบระบบทางกลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสม กับความเร็วลมเริ่มต้นที่ 2.5 เมตรต่อวินาที กำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด 20 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที โดยการออกแบบใบกังหันลมที่มีมุมบิดที่โคนใบ 8 องศา และที่ปลายใบบิด 2 องศา ในการออกแบบรูปทรงใบกังหันลมแบบนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพแรงบิดให้สูงขึ้น เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบทางกลที่ออกแบบให้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ 2 ตัว ต่อขนานกัน ผ่านชุดเกียร์ ด้วยอัตราทด 1 ต่อ 7 ความเร็วรอบเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 175-210 รอบต่อนาที ผลจากการวิเคราะห์การออกแบบระบบทางกลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าดังกล่าว กังหันลมเริ่มต้นผลิตไฟฟ้าได้ที่มีความเร็วลมต่ำได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานในพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยช่วง 4-5 เมตรต่อวินาที

คำหลัก: พลังงานลม, กังหันลมผลิตไฟฟ้า, ระบบทางกลของกังหันลม

Abstract

The objective of this research is to analyze the mechanical design process with relative results to Computational Fluid Dynamics (CFD) for blade design of 20 kW wind machine. The CFD commercial program of CF-Design V 8.0 was used for the blade analysis. The mechanical design system was investigate previously to use the wind machine cut in at 2.5 m/s wind velocity and generates the maximum power output at 9 m/s wind speed. The CFD results shown that the wind machine blade at the root of 8 degree prolong to the blade tip of 2 degree perform higher torque compares to others configuration. The rotation speed of desired generator was 175-210 rpm is requiring the stepping up gear ratio of 1:7 to optimum tip speed design. For the conclusion that the result of this research shows the significant configuration of using dual generator of 10 KW 2 units with blade tip design at 2 degree. Additionally the designed parameters would be applied to make the prototype of the wind machine at wind speed average of 4-5 m/s of low wind speed zones.

Keywords: Wind Energy, Wind turbine generator, Mechanical design systems.

1. บทนำ

ลมเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่สามารถใช้ได้โดยไม่มีความหมดสิ้นตราบเท่าที่ดวงอาทิตย์ยังคงอยู่ ในปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ทดแทนการผลิตด้วยพลังงานจากซากพืชและสัตว์ดึกดำบรรพ์ ประเทศในแถบทวีปยุโรปได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีขนาดใหญ่และประสิทธิภาพสูงขึ้นสำหรับประเทศไทยการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านกังหันลมยังมีค่อนข้างน้อยมาก อาจจะเป็นเพราะว่าศักยภาพพลังงานลมในประเทศของเราไม่สูงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ หากเรามีพื้นฐานความรู้ก็จะสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีกังหันลมร่วมกับแหล่งพลังงานอื่นๆ เพื่อความมั่นคงทางด้านพลังงานไฟฟ้าและลดการนำเข้าแหล่งพลังงานจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

2. ทฤษฎีในการออกแบบ

2.1 ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory)

พลังงานจากลมนั้นเป็นพลังงานจลน์ ในการวิเคราะห์ให้ใช้หลักการที่เรียกว่า ทฤษฎีโมเมนตัมตามรูปที่ 1

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 C_p \quad (1)$$

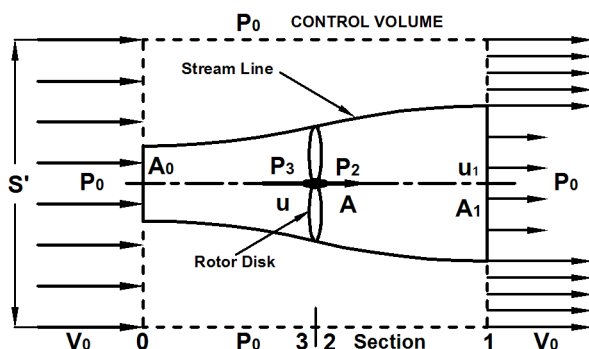
เมื่อ P_w = พลังงานไฟฟ้า (kW)

ρ_{air} = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่กวาดของใบพัด (m^2)

V_0 = ความเร็วลมทางด้านเข้าและด้านออก (m/s)

C_p = ประสิทธิภาพของกังหันลม



รูปที่ 1 หลักการของทฤษฎีโมเมนตัม [1]

2.2 แรงผลัก (Thrust force)

แรงขับ(Thrust force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์ของกังหันลมจากทฤษฎีโมเมนตัม ตามรูปที่ 1 จะได้ดังนี้

$$F_{Thrust} = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - U_1^2) \quad (2)$$

เมื่อ F_{Thrust} = แรงขับของโรเตอร์ (N)

ρ_{air} = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่กวาดของใบพัด (m^2)

V_0 = ความเร็วลมด้านเข้าและออก (m/s)

U_1 = ความเร็วลมหลังออกจากโรเตอร์ (m/s)

จากประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม $C_{Pmax} = 16/27$ ดังนั้น U_1 จะได้

$$U_1 = \frac{1}{3} V_0 \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) U_1 เป็นค่าที่ C_{Pmax} แต่การออกแบบครั้งนี้กังหันลมมีประสิทธิภาพ $C_p = 0.32$ [1] ดังนั้นจะได้ U_1 ดังนี้

$$U_1 = 0.32 \times \frac{1}{3} \times \frac{27}{16} \times V_0$$

$$U_1 = 0.18 V_0 \quad (4)$$

แทนค่า U_1 จากสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (2) จะได้แรงขับ (Thrust) [3]

$$F_{Thrust} = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - 0.18 V_0^2) \quad (5)$$

2.3 การเกิดขึ้นของแรงยกและแรงผลัก

แรงกระทำต่อแพนอากาศ (Airfoil) และแรงดังกล่าวที่อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลจะถูกเรียกว่า “แรงยก” (Lift force) แทนด้วยสัญลักษณ์ L แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิว และแรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหลจะถูกเรียกว่า “แรงผลัก” (Drag force) แทนด้วยสัญลักษณ์ D ดังแสดงที่รูปที่ 2

ค่าแรงยกและแรงผลัก จะได้จากการทดสอบแพนอากาศดังกล่าวในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยก

และแรงผลักร อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก C_L และสัมประสิทธิ์แรงหน่วง C_D โดยที่นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะเขียนได้เป็น

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (7)$$

เมื่อ C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก

C_D = สัมประสิทธิ์แรงผลักร

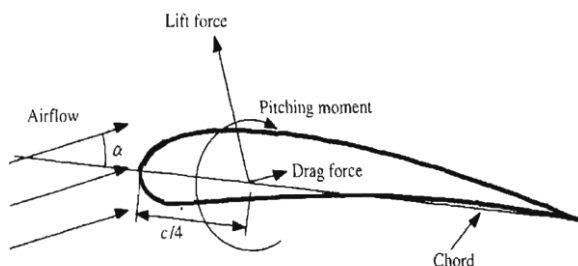
L = แรงยก (Lift force, N)

D = แรงผลักร (Drag force, N)

ρ_{air} = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ (m^2)

V = ความเร็วลม (m/s)



รูปที่ 2 การเกิดแรงยก และแรงผลักรบนแพนอากาศ [7]

2.4 การออกแบบระบบส่งกำลัง

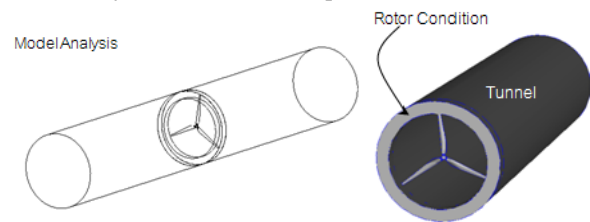
การส่งกำลังด้วยเฟืองของระบบพลศาสตร์ของระบบส่งกำลังของเพลาลูกเบี้ยวและเฟือง สมมุติฐานของระบบคือ ระบบไม่มีการสูญเสียจากความฝืด (Frictionless) และไม่มีการสูญเสียพลังงาน

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบใบกังหันลม

โดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาในด้านวิศวกรรมการไหล ในรูปแบบและหลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจำลองสถานะของการทำงานในรูปแบบของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม CF-Design V8.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหล เข้ามาช่วยในการประมวลผล เพื่อหาคำตอบที่ซับซ้อนที่ไม่สามารถคำนวณด้วยมือได้ จะอาศัยต้นแบบที่ได้ออกแบบด้วย

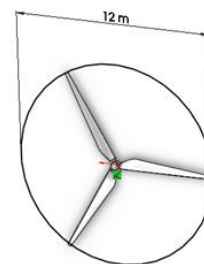
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งรูปทรงของใบกังหันลมตลอดจนอุณหภูมิจำลอง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการ

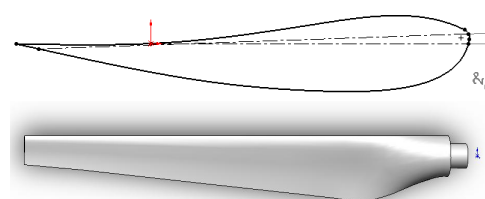
วิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล [4]

ลักษณะของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ถูกจำลองขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบทั้งสองนั้น จะมีลักษณะของรูปแบบใบกังหันที่แตกต่างกันเฉพาะส่วนที่เป็นมุมบิดของใบพัด แต่เงื่อนไของค์ประกอบในการจำลองทางผลคณิตศาสตร์อื่นๆ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางใบ ความยาวใบ ความเร็วลมเท่ากันเป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4



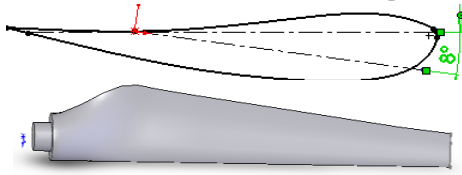
รูปที่ 4 ลักษณะของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้า [4]

การออกแบบและสภาวะการใช้งานจริงนั้นมีความแตกต่างกันมา ในเรื่องของมุมและการเคลื่อนของอากาศผ่านแพนอากาศ (Airfoil) ซึ่งยากต่อการสรุปและวิเคราะห์ผล ว่าจุดที่ดีที่สุดของการออกแบบใบอยู่ที่ใด จึงทำการศึกษาและออกแบบเพิ่มเติมในส่วน of Profile ของใบกังหัน โดยทำการบิดองศาในการขึ้นรูปออกเป็น 4 มุมบิดคือ 2,4,6,8 โดยกำหนดให้ที่โคนใบบิด 8 องศา ปลายใบบิด 2 องศา ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงรูปทรงใบกังหันลมต้นแบบที่โคนใบบิด 8 องศาและปลายใบบิด 2 องศา [4]

และรูปทรงใบกังหันลมต้นแบบที่โคนใบและปลายใบ
บิต 8 องศาเท่ากันตลอดความยาวใบ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงรูปทรงใบกังหันลมต้นแบบที่โคนใบบิต
8 องศาตลอดจนปลายใบ [4]

3.2 การออกแบบระบบทางกล

ทำการเปรียบเทียบการสูญเสียแรงบิดเริ่มต้น
(Starting Torque) ในการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำ
ระหว่างการออกแบบระบบทางกลแบบใช้เครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ 2 ตัว (Dual Generator
system) ตามรูปที่ 6 [3] กับการออกแบบระบบทางกล
แบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ 1 ตัว
(Single Generator system) ตามรูปที่ 7 [3] ด้วย
ความเร็วรอบเพลาชับของใบกังหันลม 25-30 รอบต่อ
นาที ผ่านชุดเกียร์ด้วยอัตราทด 1 ต่อ 7 ความเร็ว
เพลาลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 175-210 รอบต่อนาที

แรงบิด(Torque) ที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ของกังหันลม
สามารถหาได้จาก แรงผลักดันด้วยรัศมี (R) ของใบ
กังหันซึ่งหาจาก $1/3R$ [1] จะได้ดังนี้

$$T_{Rotor} = F_{Thrust} \cdot R_{CG} \quad (8)$$

เมื่อ

$$T_{Rotor} = \text{แรงบิดของโรเตอร์ (Nm)}$$

$$F_{Thrust} = \text{แรงขับ (Thrust force, N)}$$

$$R_{CG} = \text{รัศมีที่จุดศูนย์กลางถ่วงของมวล (m)}$$

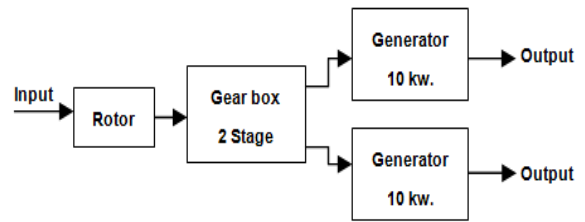
ดังนั้นภาระ(Load) ที่โรเตอร์ต้องสร้างแรงบิดเริ่มต้นใน
การหมุนเพลากังหันลม คือมวลทั้งหมดของระบบทาง
กลแบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ 2 ตัว
ดังรูปที่ 7 สามารถคำนวณได้จาก

$$T_{Dual} = T_{Shaft-1} + 2T_{Shaft-2} + 2T_{Shaft-3} \quad (9)$$

เมื่อ

$$T_{Dual} = \text{แรงบิดเริ่มต้นทั้งหมดของระบบ Dual (Nm)}$$

$$T_{Shaft-1, 2, 3} = \text{แรงบิดทั้งหมดของแต่ละเพลาลง (Nm)}$$



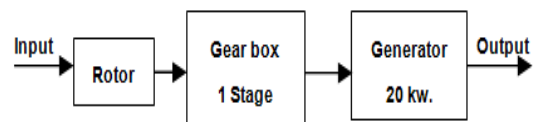
รูปที่ 7 ระบบทางกลแบบ Generator 10 kW 2 ตัว [3]
และ ภาระ(Load) ที่โรเตอร์ต้องสร้างแรงบิดเริ่มต้นใน
การหมุนเพลากังหันลม คือมวลทั้งหมดของระบบทาง
กลแบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ 1 ตัว
ดังรูปที่ 8 สามารถคำนวณได้จาก

$$T_{Single} = T_{Shaft-1} + T_{Shaft-2} \quad (10)$$

เมื่อ

$$T_{Single} = \text{แรงบิดเริ่มต้นทั้งหมดของระบบSingle (Nm)}$$

$$T_{Shaft-1, 2} = \text{แรงบิดทั้งหมดของแต่ละเพลาลง (Nm)}$$



รูปที่ 8 ระบบทางกลแบบ Generator 20 kW 1 ตัว [3]

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลของการออกแบบใบกังหันลมด้วย CFD

จากผลการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลทั้ง
สองรูปแบบ เพื่อคำนวณหาความเร็วรอบการหมุนของ
กังหันลมในโหมดของ(Free Spinning) ดังรูปที่ 9
พบว่าใบกังหันลมต้นแบบที่มุมบิตที่โคนใบ 8 องศา
และที่ปลายใบบิต 2 องศา กับใบกังหันลมที่โคนและ
ปลายใบบิต 8 องศาตลอดความยาวใบที่ความเร็วลม
5 เมตรต่อวินาที ดังตารางที่ 1

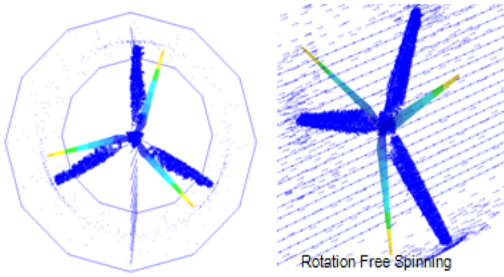
ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบ (CFD) [4]

Model	RPM	Torque	Lift Force	Drag Force	Result force	C _d	C _L	Ratio L/D
8°-8°	95	598	0.06	0.04	0.072	0.46	0.30	1.5
8°-2°	98	615	0.09	0.03	0.094	0.23	0.69	3

หมายเหตุ :

8°-8° คือ มุมบิตที่โคนใบและปลายใบ 8 องศา

8°-2° คือ มุมบิตที่โคนใบ 8 องศา และบิตที่
ปลายใบ 2 องศา



รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมCFD [4]

4.2 ผลของการออกแบบระบบทางกล

จากผลการวิเคราะห์เบื้องต้นจะได้ว่าระบบทางกลแบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ 2 ตัว (Dual Generator system) จะเริ่มต้นสร้างแรงบิดเพื่อเอาชนะภาระคงที่ (Static load) ได้ที่ความเร็วลม 2.8 m/s [3] ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ทำให้เพลลาของกังหันลมหมุน ส่วนระบบทางกลแบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ 1 ตัว (Single Generator system) จะเริ่มต้นสร้างแรงบิด เพื่อเอาชนะภาระคงที่ (Static load) ได้ที่ความเร็วลม 5.5 m/s ในตารางบันทึกผลการทดลองจะเห็นได้ว่า [3] ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 2 ตารางที่ 2 บันทึกผลการทดลอง [3]

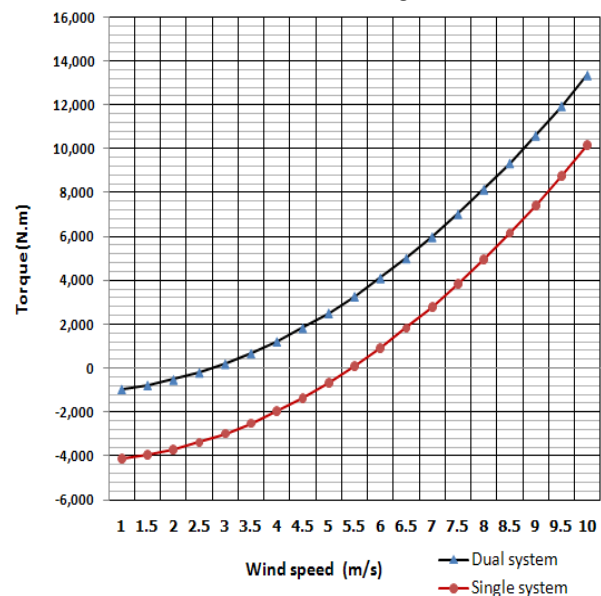
Wind speed	Thrust Force	Torque	Dual system	Single system
V_0 (m/s)	F_{Thrust} (N)	T_{Rotor} (N.m)	T_{Dual} (N.m)	T_{Single} (N.m)
1	71	145	-953	-4,144
1.5	159	325	-773	-3,964
2	282	578	-520	-3,710
2.5	441	904	-194	-3,385
3	635	1,301	203	-2,988
3.5	864	1,771	673	-2,518
4	1,128	2,313	1,215	-1,976
4.5	1,428	2,928	1,830	-1,361
5	1,763	3,614	2,517	-674
5.5	2,133	4,373	3,276	85
6	2,539	5,205	4,107	916
6.5	2,980	6,108	5,011	1,820
7	3,456	7,084	5,986	2,796
7.5	3,967	8,133	7,035	3,844
8	4,514	9,253	8,155	4,964
8.5	5,095	10,446	9,348	6,157
9	5,713	11,711	10,613	7,422
9.5	6,365	13,048	11,950	8,759
10	7,053	14,458	13,360	10,169

หมายเหตุ: แรงบิด (Torque) มีค่าเป็นลบ (-) หมายถึงระบบยังไม่เริ่มต้นหมุนสร้างแรงบิดและระบบยังต้องการแรงบิดเพิ่มจากโรเตอร์เท่ากับจำนวนที่มีค่าเป็นลบ

5. สรุปและวิเคราะห์ผล

5.1 สรุปผลการออกแบบ

พบว่ากังหันลมต้นแบบที่มุมบิดที่โคนใบ 8 องศาที่ปลายใบบิด 2 องศา ให้ความเร็วรอบการหมุนอยู่ที่ 95 รอบต่อนาที และแรงบิดใช้งานอยู่ที่ 615 N-m ซึ่งให้ผลดีกว่าใบกังหันลมที่โคน และปลายใบบิด 8 องศา ให้ความเร็วรอบการหมุนอยู่ที่ 95 รอบต่อนาที และแรงบิดใช้งานอยู่ที่ 598 N-m โดยประมาณที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีเท่ากัน ตามตารางที่ 1 สรุปผลการทดลองด้วยโปรแกรม CF-Design V8.0 [4]



รูปที่ 10 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างความเร็วลมกับแรงบิด [3]

จากรูปที่ 10 แสดงผลเปรียบเทียบให้เห็นถึงจุดเริ่มต้นสร้างแรงบิด (Starting torque) ของทั้งสองระบบจะเห็นได้ว่าระบบทางกลแบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ 2 ตัว (Dual Generator system) สามารถเริ่มต้นหมุนส่งกำลัง ให้กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลม ต่ำกว่า ระบบทางกลแบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ 1 ตัว (Single Generator system) โดยประมาณ 2 เท่า ดังนั้นในการออกแบบระบบทางกลให้ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงแต่กำลังผลิตไฟฟ้ายังคงเท่าเดิม ทำให้การสร้างแรงบิดเริ่มต้นดีขึ้นมากที่ความเร็วลมต่ำ ซึ่งเหมาะสมกับความเร็วลมการใช้งานในประเทศไทยที่มีความเร็วลมเฉลี่ยช่วง 4-5 เมตรต่อวินาที [3]

5.2 วิเคราะห์ผลการออกแบบ

ในการออกแบบกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำนั้น เมื่อนำเอาการออกแบบรูปทรงใบกังหันกังหันลมต้นแบบที่มุมบิดที่โคนใบ 8 องศา ที่ปลายใบบิด 2 องศา ที่ให้แรงบิดที่สูงขึ้น มารวมเข้ากับการออกแบบระบบทางกลแบบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ 2 ตัว (Dual Generator system) ที่ใช้แรงบิดเริ่มต้นต่ำทำให้มีความเหมาะสมกับความเร็วลมเฉลี่ยช่วง 4-5 เมตรต่อวินาที

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบพระคุณ บุคลากรเจ้าหน้าที่ อาคารวิจัยประยุกต์ พลังงานลม น้ำ และแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานในครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการดำเนินการวิจัย และจัดทำเอกสารเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] วิรัชย์ โยชนรินทร์, (2551). รายงานการศึกษาวิจัยพัฒนาสาริตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ, ม. เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [2] วิรัชย์ โยชนรินทร์, (2552). รายงานโครงการวิจัยเพื่อพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 กิโลวัตต์, ม. เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [3] สว่าง ซาติทอง, วิรัชย์ โยชนรินทร์, (2553). การออกแบบระบบทางกลสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, จังหวัดเพชรบุรี
- [4] วิรัชย์ โยชนรินทร์, สว่าง ซาติทอง, (2553). การออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, จังหวัดเพชรบุรี

[5] Martin O.L. Hansen, (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd ed, Earthscan in the UK and USA.

[6] Blazek J., (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, Elsevier, Netherlands.

[7] Manwell J.F., McGowan J.G. and Rogers A.L., (2002) *Wind Energy Explained*, John Wiley & Son,