

การทดลองต้นแบบกังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมได้อย่างต่อเนื่อง
**Experimental Measurements of Prototype
of Vertical Axis Wind Turbine with Continuous Blade Angle Adjustment**

ไมตรี พลสงคราม¹*, อ่ำพล ทันไชย¹ และ ปรีชา ชันติโกมล¹

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนน สุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: polsongkrammm@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 083-297-9197, เบอร์โทรสาร: 044-233-074

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวคิดในการออกแบบกังหันลมแกนตั้งที่มีใบกังหันสามารถปรับมุมได้อย่างต่อเนื่อง โดยใบกังหันแต่ละใบสามารถหมุนได้รอบแกนของตัวเองพร้อมทั้งหมุนรอบแกนโรเตอร์ได้ในเวลาเดียวกัน การหมุนรอบแกนตัวเองของใบกังหันได้ทำให้กังหันลมสามารถอาศัยทั้งแรงยกและแรงจุดในการหมุนโรเตอร์ ขนาดของกังหันลมคือ รัศมีโรเตอร์เท่ากับ 0.4 m ความสูงของโรเตอร์เท่ากับ 0.6 m โดยทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นของแข็งของใบกังหัน ความเร็วลม อัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของกังหันลมเท่ากับ 22% สำหรับค่าความทึบของใบกังหันเท่ากับ 0.64 ที่ความเร็วลมเท่ากับ 3 m/s ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์เท่ากับ 0.5 ซึ่งข้อมูลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า กังหันลมชนิดนี้ให้สัมประสิทธิ์กำลังค่อนข้างสูงและสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองที่ความเร็วลมต่ำ จึงเป็นกังหันลมที่มีความเหมาะสมกับสภาพลมอย่างในประเทศไทยที่ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยตลอดปีต่ำ

คำหลัก: กังหันลม, สัมประสิทธิ์กำลัง, แรงยก, แรงจุด, ความทึบของใบกังหัน

Abstract

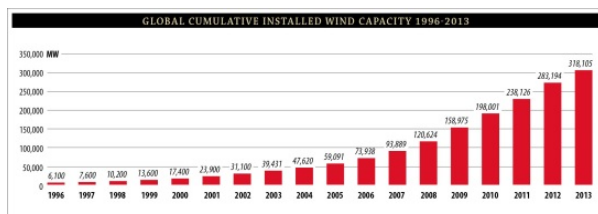
This study presents a new concept of a vertical axis wind turbine with continuous blade angle adjustment. Each blade of the turbine can rotate about its own vertical pivot and rotate about main rotor axis at the same time. The blade is constrained to rotate at the rate of one half of a revolution per full revolution of the main rotor axis. Since rotation about its own vertical pivot of the blade leads to turbine exploitation of lift and drag force for power generation. The turbine has rotor radius about 0.4 m and rotor height about 0.6 m. Influence of solidity, wind speed, rotor tip speed ratio on power coefficient were studied. The maximum power coefficient of the turbine is about 22% with solidity 0.64, wind speed 3 m/s, rotor tip speed ratio 0.5. The results revealed that the turbine gives off high power coefficient, high static torque and capable self-starting although it in low wind speed condition. Thus, this turbine suits to wind condition like in Thailand which has annual low average wind speed.

Keywords: wind turbine, power coefficient, drag-force, lift-force, solidity

ETM-96

1. บทนำ

จากการศึกษาประวัติในการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์พบว่ามนุษย์ได้สร้างและพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมมานานกว่า 3000 ปีแล้ว ย้อนกลับไป 1700 ปี ก่อนคริสตกาลกังหันลมได้ถูกสร้างและนำมาใช้เพื่อการเกษตรในเขตที่ราบเมโสโปเตเมีย[1] จากนั้นเทคโนโลยีกังหันลมจึงแพร่กระจายไปสู่ยุโรปในช่วงศตวรรษที่ 13 รูปแบบและหลักการทำงานของกังหันลมจึงได้ถูกพัฒนาเรื่อยมาจนปัจจุบัน อย่างไรก็ตามบางช่วงเวลาที่ผ่านมาในอดีตกังหันลมไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร แต่พอเกิดวิกฤตราคาน้ำมันโลกเมื่อปี ค.ศ. 1970 การมองหาพลังงานทดแทนจากพลังงานลมจึงได้รับความสนใจมากขึ้นและเทคโนโลยีกังหันลมจึงได้รับการพัฒนาขึ้นมาอีกครั้ง นอกจากนี้แล้วความสนใจในการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมยังได้รับการกระตุ้นจากความกดดันในเรื่องสิ่งแวดล้อมทั้งนี้ถือว่าพลังงานที่ได้จากลมเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิด CO₂ แก่ชั้นบรรยากาศตลอดอายุการใช้งาน [2] ด้วยเหตุผลจากราคาเชื้อเพลิงที่ได้จากฟอสซิลที่สูงขึ้นตลอดเวลาและเหตุผลทางสิ่งแวดล้อม หลายๆประเทศทั่วโลกจึงหันมาให้ความสนใจในการพัฒนาและติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานมากขึ้นและมีการติดตั้งกังหันลมในอัตราที่เพิ่มขึ้นทุกๆปี จากการรายงานของ Global Wind Energy Council (GWEC) [3] โดยจะเห็นได้รูปที่ 1 แสดงการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการผลิตพลังงานจากลมของโลก



รูปที่ 1. ความสามารถในการผลิตพลังงานจากลมสะสมของโลก[3]

จีนเป็นประเทศที่มีการติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตพลังงานมากที่สุดในโลกคิดเป็น 28.7 % ของโลก รองลงมาคือ USA คิดเป็น 19.2 % ตามมาด้วยเยอรมันคิดเป็น 10.8 % . [3]

กังหันลมจำแนกตามลักษณะการวางของแกนโรเตอร์ได้เป็น 2 แบบคือ กังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Wind turbine, HAWT) และกังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) ตามที่แสดงในรูปที่ 2 โดย HAWT เป็นกังหันลมที่มีแกนโรเตอร์ขนานกับทิศทางของลมส่วนและเป็นกังหันลมค่อนข้างได้รับความนิยมมากกว่า VAWT ในส่วน VAWT เป็นกังหันลมที่มีแกนโรเตอร์วางกับทิศทางลมในแนวตั้ง กังหันลมแกนตั้งมีสองชนิดคือ กังหันลมแบบ Savonius เป็นกังหันลมที่อาศัยแรงจุดในการหมุนโรเตอร์ ส่วนกังหันลมแบบ Darrieus เป็นกังหันลมที่อาศัยแรงยกในการหมุนโรเตอร์



รูปที่ 2 แสดงกังหันลมทั้งสองแบบแยกตามลักษณะจัดวางของแกนโรเตอร์ [4]

ข้อดีของกังหันลมแกนตั้งคือเป็นกังหันลมที่มีความเร็วรอบต่ำจึงเกิดการสั่นสะเทือนและเสียงดังรบกวนน้อยกว่าและสามารถติดตั้งเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าได้ใน

ETM-96

ตำแหน่งใกล้ระดับพื้นดินซึ่งจะง่ายต่อการติดตั้งและซ่อมบำรุง นอกจากนี้กังหันลมแกนตั้งยังให้แรงบิดสูงที่ความเร็วลมต่ำซึ่งทำให้มันสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองและไม่เป็นอันตรายต่อนกเนื่องจากความเร็วใบกังหันต่ำ ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของกังหันลมแกนตั้งที่อาศัยแรงจุดในการหมุนโรเตอร์คือใช้งานได้ดีในบริเวณที่มีกระแสลมปั่นป่วน กังหันลมแกนตั้งมีทั้งประเภทอาศัยแรงจุดในการหมุนแกนโรเตอร์คือกังหันลมแบบ Savonius และประเภทอาศัยแรงยกในการหมุนโรเตอร์คือกังหันลมแบบ Darrieus โดยกังหันลมทั้งสองประเภทนี้ก็ได้มีการพัฒนาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตลอดมา ปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายๆคณะพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมแบบแกนตั้งเช่นพัฒนาระบบควบคุมการปรับมุมพิชท์ของใบกังหัน[5] การติดตั้งแผ่นกำบังลมเพื่อบังคับทิศทางลม [6 – 8] รวมถึงการเพิ่มสมรรถนะกังหันลมแบบ Savonius ด้วยการออกแบบให้ใบกังหันบิดเป็นมุมองศาต่างๆ[9]

วัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อนำเสนอ ผลการทดสอบสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งที่ได้รับการออกแบบให้มีกลไกในการควบคุมการปรับมุมพิชท์ของใบกังหันเพื่อให้ใบกังหันสามารถอาศัยแรงจุดและแรงยกในการหมุนโรเตอร์ ซึ่งคาดว่าจะเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันให้สูงขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้กังหันมีความเหมาะสมกับสภาพกระแสความเร็วลมต่ำอย่างในประเทศไทย โดยกังหันมีแรงบิดสูงซึ่งจะทำให้มันสามารถเริ่มหมุนได้เอง กังหันมีหางเสือเป็นเครื่องควบคุมทิศทางและมุมใบให้ตอบสนองต่อทิศทางของกระแสลม ใบกังหันลมเป็นแบบแผ่นเรียบซึ่งจะทำได้ง่ายต่อการสร้าง

2. ทฤษฎีพื้นฐานของกังหันลม

กำลังที่กังหันลมผลิตได้(P_T) และพลังงานจลน์ของกระแสลมต่อหน่วยเวลา(P_w)ได้จากสมการที่(1) และ (2) โดยได้นิยามสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม (Power Coefficient, C_p) เท่ากับอัตราส่วนระหว่าง

กำลังที่กังหันลมผลิตได้ต่อพลังงานจลน์ของกระแสลม ดังสมการที่(3)

$$P_T = T \times \omega \quad (1)$$

$$P_w = 0.5 \times \rho \times A \times U_{\infty}^3 \quad (2)$$

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} \quad (3)$$

โดย C_p จะแสดงในรูปความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์ต่อความเร็วกระแสลมอิสระ (Rotor Tip Speed Ratio, λ) ซึ่งนิยามไว้ในสมการที่ (4) การแสดงสมรรถนะของกังหันลมมักจะแสดงค่าอัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์ต่อความเร็วกระแสลมอิสระที่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด

$$\lambda = \frac{V_{RTSR}}{U_{\infty}} = \frac{r \times \omega}{U_{\infty}} \quad (4)$$

ซึ่ง สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมถูกพิจารณาว่าเป็นประสิทธิภาพในการเปลี่ยนหรือสกัดพลังงานจากกระแสลม

สำหรับพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญคือความทึบของใบกังหัน (Solidity, σ) ซึ่งนิยามไว้ในสมการที่(5) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนของพื้นที่ใบกังหันต่อพื้นที่ที่กระแสลมต้องเคลื่อนผ่าน

$$\sigma = \frac{b \times n}{2 \times \pi \times r} \quad (5)$$

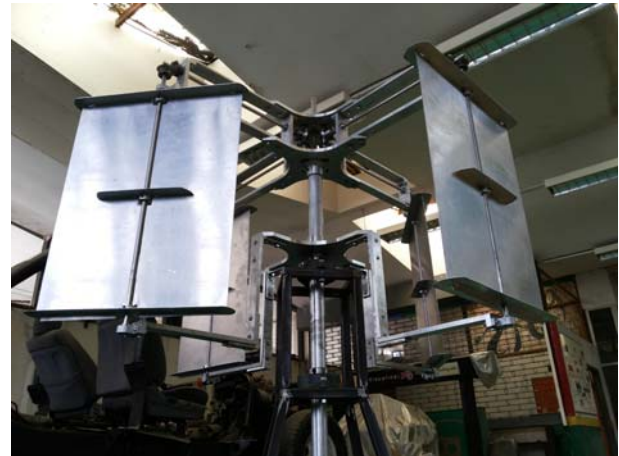
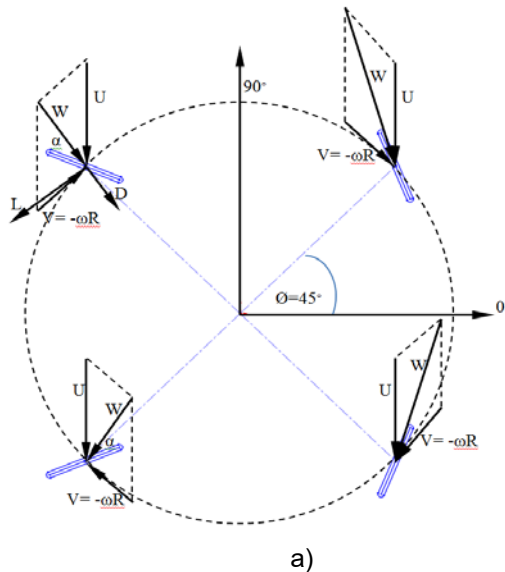
ค่าความเป็นของแข็งใช้เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดพื้นที่หรือจำนวนใบกังหันและความยาวรัศมีของโรเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะของกังหัน

3. แนวคิดและการออกแบบกังหันลมแบบใบปรับมุมได้

แนวคิดในการออกแบบเพื่อให้ใบกังหันลมสามารถอาศัยได้ทั้งแรงจุดและแรงยกในการหมุนแกนโรเตอร์และเพื่อลดแรงบิดต้านที่เกิดจากใบกังหันตัวที่เคลื่อนที่สวนทิศทางลม คือต้องออกแบบให้ใบกังหันหมุนรอบแกนตัวเองได้ในขณะเดียวกันกับที่มันโคจรรอบแกนโรเตอร์(เหมือนกับโลกที่หมุนรอบตัวเองพร้อมทั้งโคจรรอบดวงอาทิตย์ในเวลาเดียวกัน) อีกทั้งมีชุดกลไกที่สามารถควบคุมให้ใบกังหันหมุนเพื่อหันหาทิศทางลมได้ในทุกทิศทางด้วยเมื่อกระแสลมมีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง รูปที่ 3(a) แสดงให้เห็นถึงการปรับมุมของใบกังหันเมื่อตำแหน่งของโรเตอร์หมุนไป อยู่ที่มุมต่างๆ

ETM-96

โดยกำหนดให้อัตราการหมุนของรอบตัวเองของใบกังหันเป็นครึ่งหนึ่งของการหมุนโรเตอร์ นั่นคือโรเตอร์หมุนหนึ่งรอบต่อใบกังหันหมุนครึ่งรอบ รูปที่3(b)



รูปที่ 3. ไดอะแกรมแสดงแนวคิตรงบกลไกในการปรับมุมของใบกังหัน

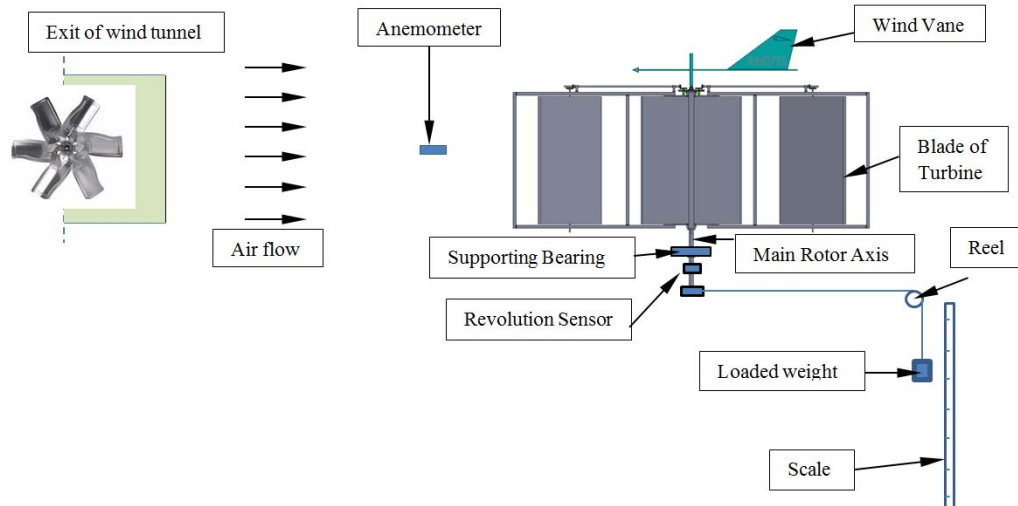
(a) มุมใบกังหันที่ตำแหน่งมุมต่างๆของโรเตอร์ (b) กังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมได้

4. อุปกรณ์ทดลองและวิธีการทดลอง

ในการทดสอบสมรรถนะกังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมได้ โดยใช้อุโมงค์ลมที่ซึ่งมีพัดลมระบายความร้อนทางอุตสาหกรรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 1 m มาเป็นเครื่องขับให้ลมเกิดการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่.4.ทางออกของอุโมงค์ลมมีขนาด 1.2 m x 1.2 m ภายในอุโมงค์ลมได้มีการติดตั้งแดมเปอร์เอาไว้ว 2 ชั้นเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของกระแสลมที่ผ่านใบพัดลมออกมาและมีการติดตั้งรังผึ้งที่มีขนาดเซลล์เท่ากับ 10 cm x 6 cm เอาไว้ ความยาวของอุโมงค์ลม 2.5 m มอเตอร์ที่ซึ่งเป็นต้นกำลังขับพัดลมมีชุดควบคุมความเร็วรอบเพื่อให้สามารถปรับความเร็วของลมได้ ชุดอุโมงค์ลมสามารถสร้างกระแสลมที่มีความเร็วได้ตั้งแต่ 0 – 5.5 m/s เพื่อให้การกระจายของกระแสลมสม่ำเสมอและครอบคลุมโร

เตอร์ กังหันลมที่ใช้ในการทดสอบถูกติดตั้งให้ห่างจากปากทางออกของอุโมงค์ลมเป็นระยะทาง 2 m เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของกระแสลมที่ออกจากอุโมงค์ลม ที่หน้ากังหันลมระยะห่าง 50 cm (ระหว่างกังหันลมและอุโมงค์ลม) ได้มีการวัดความเร็วลม 5 จุดครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมก่อนถึงใบกังหันลม เครื่องวัดความเร็วลมเป็นแบบ Smart sensor electronic anemometer AR816 ที่มีย่านการวัดตั้งแต่ 0.3-45 m/s และให้ค่าความเที่ยงตรง $\pm 3\%$ ของค่าที่อ่านได้ ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบ Digital Photo/Contact tachometer รุ่น DT-250TP สามารถวัดความเร็วรอบโดยใช้แสงและวัดความเร็วรอบแบบสัมผัส มีย่านการวัดตั้งแต่ 10 – 99,999 rpm ความเที่ยงตรง $\pm 0.05\%$

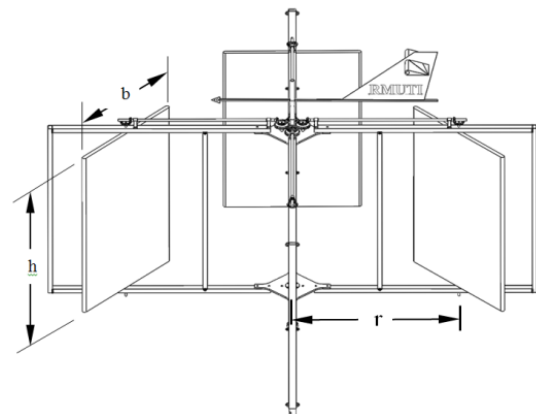
ETM-96



รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

กังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมได้ต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ มีใบกังหันจำนวน 4 ใบเป็นวัสดุแผ่นเรียบทำจากอะลูมิเนียมหนา 1 mm แกนโรเตอร์และแขนของโรเตอร์ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม แกนใบและชุดฟันเฟืองที่เป็นกลไกควบคุมการหมุนของใบกังหันทำจากเหล็ก ขนาดความยาวของแกนโรเตอร์ 40 cm และความสูงของโรเตอร์ 60 cm ทำการทดสอบที่ค่าความเร็วลมต่างๆกันคือ 2,3,4 และ 5 m/s และที่ค่าความทึบของใบกังหัน (Solidity, σ) ของกังหันลมค่าต่างๆกัน 3 ค่าคือ 0.47, 0.55 และ 0.64 การทดสอบจะทำการวัดความเร็วรอบของแกนโรเตอร์ขณะมีโหลดและการวัดกำลังงานที่ผลิตได้จากกังหันจะกระทำโดยให้แกนโรเตอร์ หมุนกว่านเชือกเพื่อยกตุ้มน้ำหนักภาระให้สูงขึ้นในแนวตั้งผ่านระบบรอกแล้วทำการตรวจจับเวลาที่ตุ้มน้ำหนักเคลื่อนที่ขึ้นเป็นระยะทาง 1 m ซึ่งในขณะที่กำลังหมุนกว่านเชือกเพื่อยกน้ำหนักขึ้นนั้นความเร็วรอบของแกนโรเตอร์ต้องคงที่ โดยกำลังที่กังหันลมผลิตได้คำนวณจาก $P_T = m \times g \times v$ โดยที่ v คือความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นของโหลดน้ำหนักในแนวตั้ง ซึ่งผลการคำนวณเทียบเท่าได้กับสมการที่ 1 ในที่นี้การคำนวณกำลังที่ผลิตได้โดยกังหันจะไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากความฝืดของระบบรอก การบันทึกผลการทดลองจะทำการทดลองซ้ำที่เงื่อนไขเดิม

เป็นจำนวน 5 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยผลการทดลอง



รูปที่ 5 พารามิเตอร์ของใบกังหันและความยาวแขนของโรเตอร์

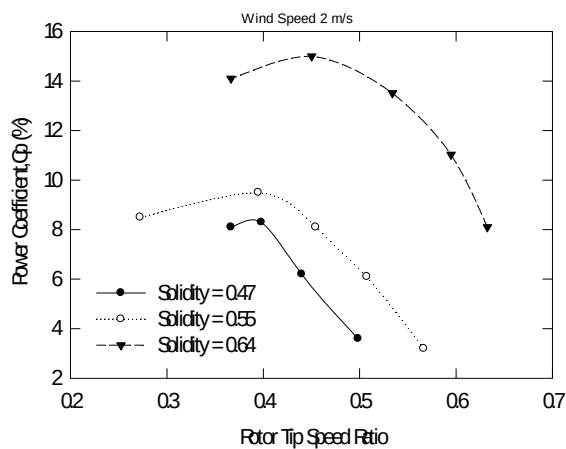
5. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

จากรูปที่ 6a ถึงรูปที่ 6d แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม, C_p กับ อัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์, RTSR ที่ค่าความทึบของใบกังหัน (Solidity, σ) ต่างกัน 3 ค่าคือ 0.47, 0.55 และ 0.64 ตามลำดับและ ที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2 ถึง 5 m/s จากผลการทดลองพบว่า กังหันลมจะให้สัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 22% ที่ค่าความทึบของใบกังหันเท่ากับ 0.64 ที่ความเร็วลม

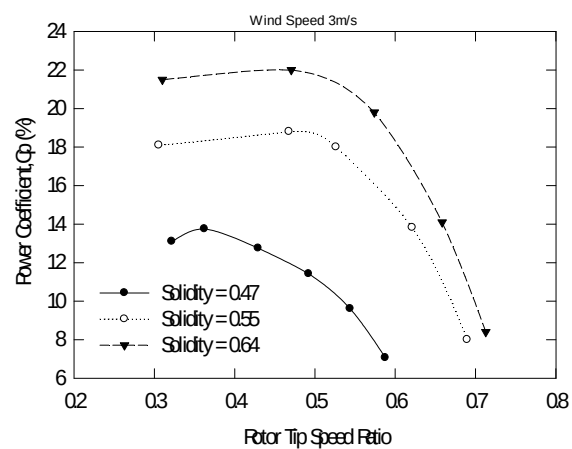
ETM-96

3 m/s โดยมีค่าอัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์,RTSR เท่ากับ 0.47 ทั้งนี้เนื่องจาก ที่ความเป็นของแข็งสูงหมายถึงกังหันลมมีพื้นที่รับลมมากที่สุด และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อพิจารณาที่ความเร็วลมต่างๆกันจะเห็นว่า ที่ความเร็วลมเท่ากับ 3 m/s กังหันจะให้สัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด โดยผลิตกำลังออกมาเท่ากับ 1.96 W (ดูรูปที่ 7) แต่อย่างไรก็ตามที่ทุกๆค่าความทึบของใบกังหันเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นกำลังลม

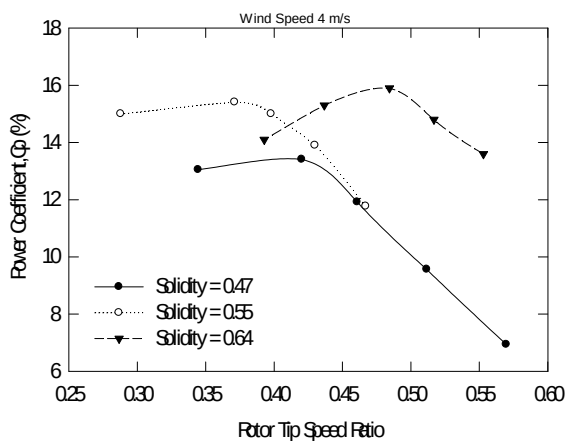
ก็จะผลิตกำลังออกมาได้มากขึ้นตามไปด้วย นั่นคือเมื่อความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ที่ค่าความทึบของใบกังหันเท่ากับ 0.64 กังหันลมจะผลิตกำลังออกมาได้เท่ากับ 5.61 W โดยมีความเร็วรอบแกนโรเตอร์เท่ากับ 47.20 rpm และค่าอัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์,RTSR เท่ากับ 0.4 (ดูรูปที่ 8)



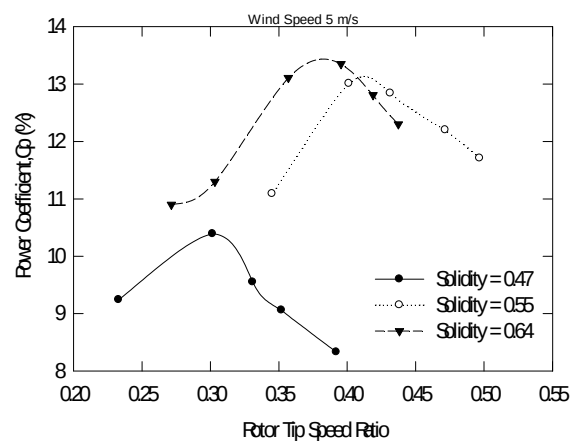
(a)



(b)



(c)

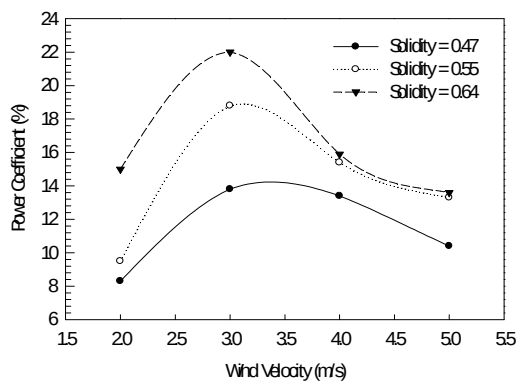


(d)

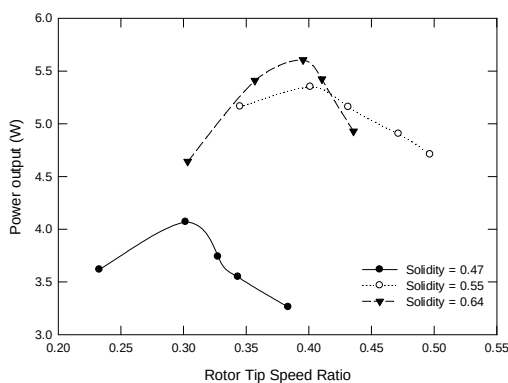
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p กับ RTSR ที่แต่ละค่าความเป็นของแข็งต่างกัน

(a) ที่ความเร็วลม 2 m/s (b) ที่ความเร็วลม 3 m/s (c) ที่ความเร็วลม 4 m/s (d) ที่ความเร็วลม 5 m/s

ETM-96



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p ของกังหันลมที่สูงที่สุดกับความเร็วลม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง P_T กับ RTST ที่ความเร็วลม 5 m/s

6. สรุป

ผลการทดสอบสมรรถนะกังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมได้อย่างต่อเนื่องต้นแบบโดยทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วลม และค่าความเป็นของแข็งที่มีต่อสัมประสิทธิ์กำลังและอัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์ ทำให้สามารถสรุปได้ดังนี้

กังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมได้อย่างต่อเนื่องที่ได้ทำการออกแบบใหม่นี้ เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำโดยความเร็วลมอยู่ที่ 2.5 ถึง 3.5 m/s ก็สามารถเริ่มหมุนและผลิตพลังงานออกมาได้ และกังหันลมนี้มีค่า RTST ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.45 ถึง 0.55 เนื่องจาก

กังหันลมสามารถเริ่มหมุนและผลิตพลังงานออกมาได้ ที่ความเร็วลมต่ำจึงเป็นกังหันที่เหมาะสมกับสภาพลมโดยทั่วไปอย่างในประเทศไทย และการที่กังหันลมต้นแบบนี้มีความเร็วรอบที่ต่ำซึ่งก็เป็นข้อดีนั้นคือเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนน้อยนอกจากนี้เมื่อความเร็วรอบแกนโรเตอร์ต่ำก็จะส่งผลให้การสึกหรอต่ำไปด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณโปรแกรมวิชาช่างยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการสร้างต้นแบบและทดสอบกังหันลม ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งไปยังคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Golding, E.W.: The Generation of Electricity by Wind power, Auflage 1955; Reprint with additional material, E&F.N. Spon Ltd., London 1976
- [2] Technology Roadmap Wind Energy (2009). International Energy Agency, 2009, URL: <http://www.iea.org/about/copyright.asp>
- [3] Global Wind Report –Annual market update (2013). Global Wind Energy Council, URL: <http://www.gwec.net>
- [4] Breathe Systems - Vertical Wind Turbines, URL: <http://www.breathesystems.com/Wind-VIAWT.asp>
- [5] Hwang, I.S., Min, S.Y., Jeong, I.O., Lee, Y.H., & Kim, S.J.(2006) Efficiency improvement of a new vertical axis wind turbine by individual

ETM-96

active control of blade motion. Smart Structure and Materials 2006: Smart Structures and Integrated Systems. Edited by Matsuzaki, Yugi. Proceedings of the SPIE.6173, 319-323.

[6] Altan, B.D., Atilgan, M. and Özdamar, A.(2008). An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 32, June 2008, pp. 1673-1678.

[7] Müller, G., Jentsch, M.F. and Stoddart, E. (2009). Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings, Renewable Energy, vol. 34, November 2008, pp. 1407-1412.

[8] Kim, D., and Gharib, M. (2013). Efficiency improvement of straight-bladed vertical-axis wind turbines with and upstream deflector, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 115, Februaryr 2013, pp. 48-52.

[9] Saha, U.K. and Rajkumar, M.J. (2006). On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades, Renewable Energy, vol. 31, October 2005, pp. 1776-1788.