การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

การศึกษาและพัฒนากังหันลมสำหรับการสูบน้ำในประเทศไทย

A Study and Development of Windmill for Water Pumping in Thailand

ยุทธชัย เกี้ยวสันเทียะ[1]
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

สมพงษ์ พิเชฐภิญโญ[2]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เขตจตุจักร จ.กรุงเทพมหานคร 10900

Yuttachai Keawsuntia[1]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University.
Muang, NaKhonratchasima, 30000, Thailand

Sompong Pichetpinyo[2]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University.
Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาระบบที่เหมาะสมของกังหันลมสำหรับการสูบน้ำเพื่อนำมาใช้งานในประเทศไทย ซึ่งเป็นการศึกษาหาสมรรถนะของกังหันลมที่มีใบพัดเป็นลักษณะแผ่นโค้ง โดยมีอัตราส่วนความโค้ง 0.07 และหาประสิทธิภาพรวมทั้งระบบโดยนำเครื่องสูบน้ำต่อเข้ากับกังหันลมชนิดนี้ รวมถึงประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุนของกังหันลมและเครื่องสูบน้ำ

จากการทดสอบหาสมรรถนะของกังหันลม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นพบว่า จำนวนใบพัดที่เหมาะสมสำหรับกังหันลมชนิดนี้เท่ากับ 12 ใบ ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดประมาณ 0.29 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.2 จากนั้นได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปสร้างแบบจำลองกังหันลมเพื่อนำไปทดสอบภายในอุโมงค์ลม และสร้างกังหันลมเต็มขนาด

ผลจากการทดสอบแบบจำลองกังหันลมภายในอุโมงค์ลม พบว่าที่ความเร็วลม 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที กังหันลมชนิดนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด คือ 0.296, 0.318 และ 0.308 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.18,1.13 และ 0.85 ตามลำดับ

ผลการทดสอบกังหันลมแบบเต็มขนาดพบว่า เมื่อความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที สามารถสูบน้ำที่ความสูง 2 เมตร ได้ 3.5 ลิตรต่อนาที และสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพรวมได้ 0.0689 เมื่อคิดผลตอบแทนจากปริมาณน้ำที่ได้เทียบกับอายุการใช้งานของกังหันลม 10 ปี จะได้ต้นทุนในการสูบน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร คือ 4.50 บาท

Abstract

The objective of this research is to determine optimization of a windmill for water pumping in Thailand by using a studying performance of windmill which has a curvature plate ratio of 0.07 and determine overall efficiency and evaluate economic of the system.

The performance calculations by simulation program show that a number of blade at 12 blades is the optimum value for applying to this windmill that give maximum power coefficient of 0.29 at a tip speed ratio of 1.2.

The results from the test run of wind rotor model in the wind tunnel at a wind velocity of 3 m/s, the windmill give maximum power coefficient of 0.296 at tip speed ratio of 1.18. At the wind velocity of 4 m/s and 5 m/s the windmill give maximum power coefficient of 0.318 and 0.308 at tip speed ratio of 1.13 and 0.85 respectively.

The results from the test run of the system at 2 m head has an overall efficiency of about 0.0689 at wind velocity of 2 m/s. The output 3.5 litre per minute, which implies a rate of return for water pumping at 4.5 Baht per cubicmetre base on 10 year-life time of windmill.

1. บทนำ

กังหันลม เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกลแล้วนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ[1] เช่น ใช้ในการสูบน้ำสำหรับการเกษตร การกะเทาะเมล็ดพืช เครื่องสีข้าว โม่แป้ง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า[5] เป็นต้น แต่ยังไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนักเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับอัตรากำลังงานที่กังหันลมสามารถผลิตได้ และยังมีความไม่แน่นอนของกำลังงานที่ได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับประเทศไทยนั้นได้มีการนำกังหันลมมาใช้ในสูบน้ำเพื่อการเกษตร และชลประทานเป็นหลัก กังหันลมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นกังหันลมที่มีเพลาขับวางอยู่ในแนวระดับ โดยจะเป็นกังหันลมที่ผลิตจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในประเทศไทย เนื่องจากความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบขนาดของกังหันลมนั้นสูงกว่าความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยมาก และราคาของกังหันลมนั้นค่อนข้างสูง

ดังนั้น การศึกษาและพัฒนากังหันลมเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในการสร้างกังหันลมให้ต่ำลง เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในประเทศไทยจึงมีความสำคัญมาก

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาพารามิเตอร์ที่ควบคุมสมรรถนะกังหันลมที่ใช้เพื่อการสูบน้ำ และพิจารณาหาระบบที่เหมาะสมของกังหันลมสำหรับการสูบน้ำเพื่อใช้งานในประเทศไทย รวมทั้งศึกษาเศรษฐศาสตร์การลงทุนของกังหันลมและเครื่องสูบน้ำ

3.วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

(1) ศึกษาและทดสอบหาสมรรถนะของกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

(2) สร้างแบบจำลองกังหันลมและทดสอบภายในอุโมงค์ลม

(3) สร้างและทดสอบกังหันลมแบบเต็มขนาด และประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

3.1 การศึกษาและทดสอบหาสมรรถนะกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์เพื่อหาสมรรถนะของกังหันลม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ได้เลือกใช้ใบพัดกังหันลมที่มีลักษณะเป็นใบพัดโค้งโดยมีอัตราส่วนความโค้งเท่ากับ 0.07 ซึ่งมีสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงฉุดดังรูปที่ 1 ส่วนขั้นตอนการทดสอบหาสมรรถนะกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จะคำนวณหาอัตราส่วนความเร็วปลายใบ และสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดที่รัศมีหนึ่งๆ ตั้งแต่โคนใบถึงปลายใบ สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์นั้น เมื่อนำทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial Momentum) และ ทฤษฎีอีลีเมนท์ของใบ (Blade Element) มารวมกันจะสามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล [2] ได้ดังนี้

$$\frac{dCq}{dx} = 2\sigma x^2\left(\sin\phi + \lambda_r \cos\phi\right)\left(C_L \sin\phi - C_D \sin\phi\right) \qquad (1)$$

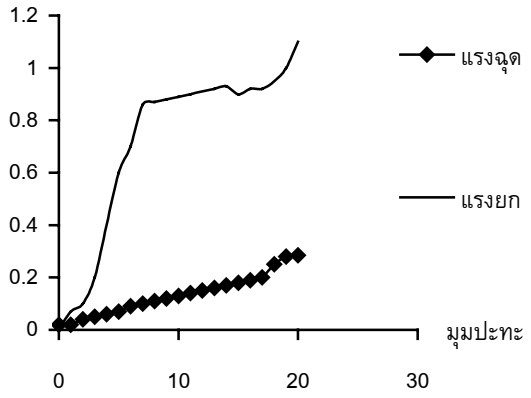
โดยที่

$$\lambda_r = \frac{1 - \frac{w}{W}\tan\phi}{\tan\phi + \frac{w}{W}} \qquad (2)$$

$$\sigma = Bc/2\pi r \qquad (3)$$

$$\frac{w}{W} = \frac{\sigma C_L}{4F\sin\phi} \qquad (4)$$

เมื่อได้ค่าของ Differential Torque Coefficient แล้วจะพล็อตกราฟระหว่างค่า $\frac{dCq}{dx}$ กับ λ จากนั้นเปลี่ยนกราฟให้เป็น $\frac{dCq}{dx}$ กับ x แล้วหาพื้นที่ใต้โค้งในแต่ละλ จะได้ค่า Cq จากนั้นคำนวณหาค่าของสัมประสิทธิ์กำลัง (Cp) โดยที่ Cp = Cq*λ



รูปที่1 แสดงสัมประสิทธิ์แรงยก สัมประสิทธิ์แรงฉุดที่มุมปะทะต่าง ๆ

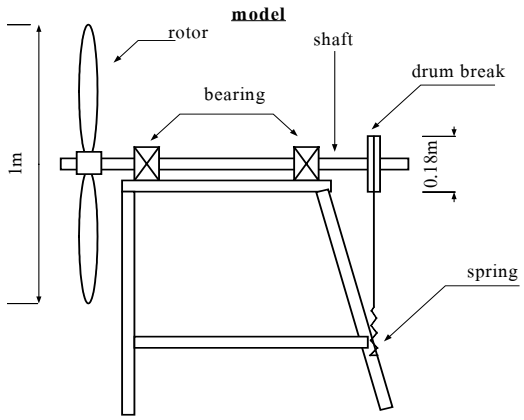
3.2 การสร้างและทดสอบสมรรถนะแบบจำลองกังหันลมภายใน อุโมงค์ลม

แบบจำลองกังหันลมที่สร้างขึ้นมา สำหรับทดสอบภายในอุโมงค์ลมนั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร จำนวนใบพัด 12 ใบ ความยาวคอร์ดใบพัด 11.2 เซนติเมตร ใบกังหันลมมีอัตราส่วนความโค้ง 0.07 และความยาวของใบกังหันลม 30 เซนติเมตร มุมติดตั้งใบพัดคงที่ 30 องศา จากนั้นต่อดรัมเบรคซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตรเข้าที่ด้านหลังเพื่อเป็นอุปการณ์วัดแรง ดังรูปที่ 2 กำหนดความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ คือ 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที

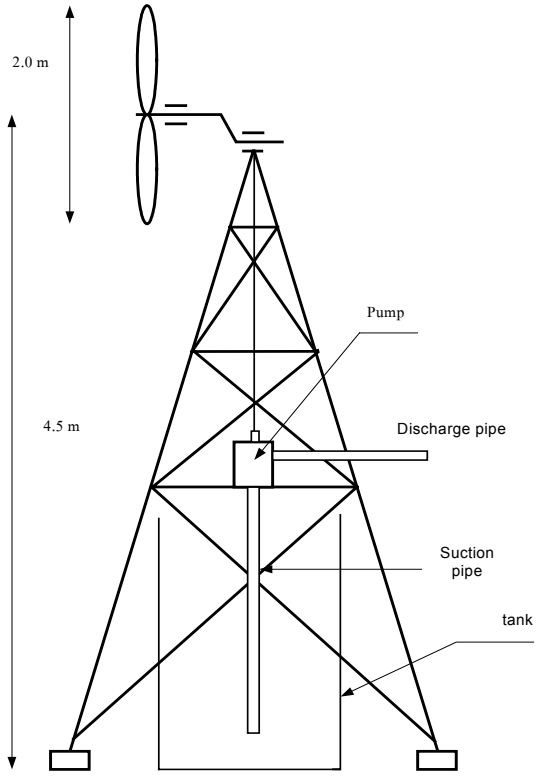
3.3 การสร้างและทดสอบกังหันลมแบบเต็มขนาด และประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในการทดสอบกังหันลมแบบเต็มขนาดนั้น มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาประสิทธิภาพรวม (Overall efficiency) ของระบบ กังหันลมแบบเต็มขนาดที่สร้างขึ้นมานั้นได้ขยายจากแบบจำลองกังหันลม 2 เท่า

มีระยะชัก 5 นิ้ว หลังจากสร้างแล้วได้นำมาทดสอบร่วมกับเครื่องสูบน้ำแบบสูบชักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร โดยสูบน้ำสูง 2 เมตร ดังรูปที่3



รูปที่ 2 แบบจำลองกังหันลมที่ใช้ทดสอบภายในอุโมงค์ลม



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการติดตั้งกังหันลมและเครื่องสูบน้ำ

การหาประสิทธิภาพรวม (Overall Efficiency) ของกังหันลมสามารถหาได้จากสัดส่วนของกำลังน้ำที่ได้ (Water Power) ต่อกำลังงานลม (Wind Power) ที่ได้จากกังหันลม [3] สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพรวม} = \left(\frac{\rho_w g\left(HQx10^{-3}\right)/60}{\frac{1}{2}\rho_a V^3 \pi R^3} \right) \quad (5)$$

การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ ได้ใช้วิธีหามูลค่าเทียบเท่าของค่าใช้จ่ายประจำปี [4]

$$AC = P\,(A/P, i, n) + \Sigma C \quad (6)$$

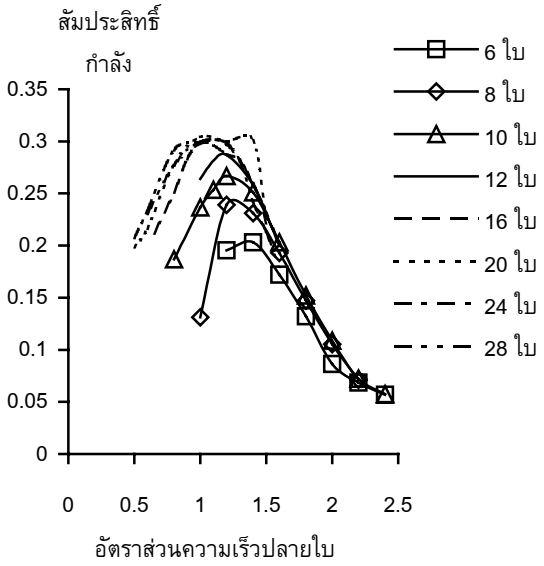
ปริมาณน้ำที่สูบได้ = อัตราการไหลของน้ำ (ลบ.ม. / ชม.) x ชั่วโมงการทำงานต่อปี (7)

ต้นทุนในการสูบน้ำ = มูลค่าเทียบเท่าประจำปีของต้นทุน / ปริมาณน้ำที่สูบได้ (8)

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบพัดกังหันลมตั้งแต่ 6 ใบ ถึง 28 ใบนั้น พบว่า เมื่อจำนวนใบพัดลดลงนั้นจะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์ กำลังงานลดลงด้วย ดังรูปที่ 4



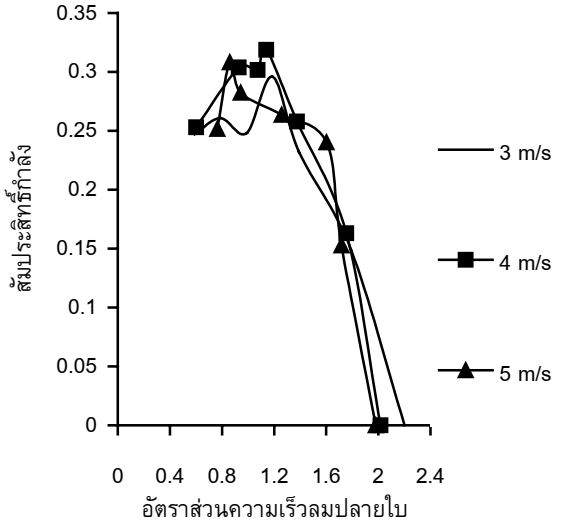
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบ

จากผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นนั้น ได้เลือกชุดใบพัดจำนวน 12 ใบ เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองกังหันลมสำหรับนำไปทดสอบภายในอุโมงค์ลม เนื่องจากกังหันลมที่มีชุดใบพัด 12 ใบนั้น ให้สัมประสิทธิ์กำลังใกล้เคียงกับกังหันลมที่มีใบพัดตั้งแต่16 ใบถึง 28 ใบ

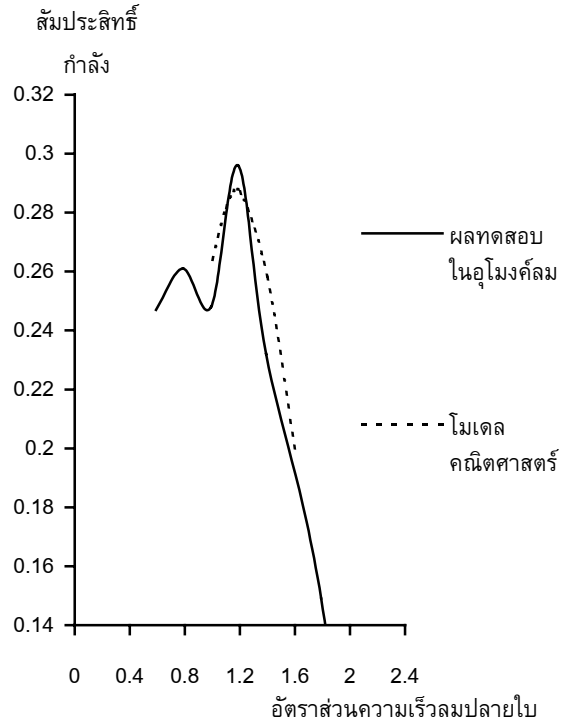
4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะแบบจำลองกังหันลมภายในอุโมงค์ลม

ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมนั้น พบว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมสูงสุดที่ความเร็วลมต่างๆนั้นอยู่ระหว่าง 0.296 ถึง 0.3189 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.8 ถึง 1.2 โดยที่ ดังรูปที่ 5 เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์เมื่อจำนวนใบพัดเท่ากับ 12 ใบ มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานที่ได้จากการทดสอบภายในอุโมงค์ลม ได้ผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานและอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม



รูปที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะกังหันลมจากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภายในอุโมงค์ลม

จากการทดสอบหาความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Excel พบว่า การทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบแบบจำลองกังหันลมภายในอุโมงค์ลม ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

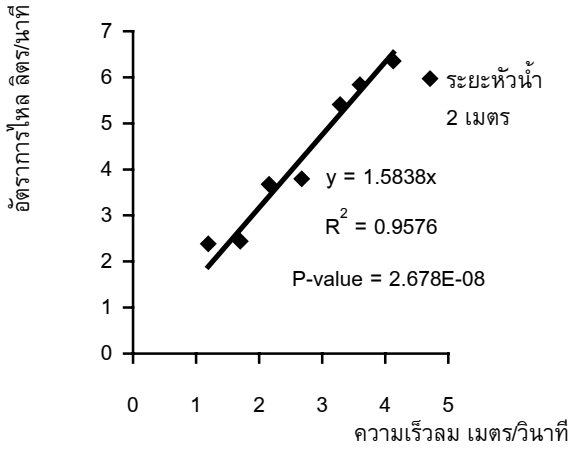
4.3 ผลการทดสอบกังหันลมแบบเต็มขนาด

จากการทดสอบได้เก็บข้อมูลของความเร็วลม และความเร็วรอบของกังหันลม อัตราการไหลของน้ำ แล้วได้นำค่าต่างๆ เหล่านี้มาคำนวณหาประสิทธิภาพรวมของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณ ความเร็วรอบ อัตราการไหลและประสิทธิภาพรวมของระบบที่ความเร็วลมต่างๆที่ระยะหัวน้ำ 2 เมตร

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	Overall Efficiency
1.2	26.90	2.38	0.2389
1.7	27.87	2.44	0.0861
2.2	40.90	3.68	0.0689
2.7	42.00	3.80	0.0374
3.3	60.25	5.41	0.0280
3.6	65.10	5.84	0.0217
4.1	70.75	6.35	0.0159

จากการทดสอบกังหันลมโดยใช้ลมที่ได้จากธรรมชาตินั้น พบว่ากังหันลมที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น เมื่อต่อเข้ากับเครื่องสูบน้ำจะเริ่มทำงานที่ความเร็วลมประมาณ 2 เมตรต่อวินาที เมื่อความเร็วลมลดต่ำลงกังหันลมจะไม่หยุดหมุนทันทีแต่จะค่อย ๆ หยุดหมุนเนื่องจากแรงเฉื่อยของตัวกังหันเอง เมื่อนำอัตราการไหลของน้ำที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับความเร็วลมในรูปของกราฟจะได้ดังรูปที่ 7 โดยพบว่าอัตราการสูบน้ำที่ได้นั้นเมื่อเทียบกับความเร็วลมจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง อัตราการสูบน้ำที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมและความเร็วรอบของกังหันลมเป็นหลัก เมื่อกังหันลมมีความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอัตราการไหลของน้ำจะเพิ่มขึ้นด้วย ที่ความเร็วลมประมาณ 2 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทยจะให้อัตราการไหลประมาณ 3.5 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับความเร็วลม

4.4 การประเมินผลด้านเศรษฐศาสตร์

จากผลการทดสอบกังหันลมแบบเต็มขนาด พบว่าที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที กังหันลมสามารถสูบน้ำได้ 3.68 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 2 เมตร ค่าใช้จ่ายในการสร้างกังหันลมอยู่ที่12,000 บาท อัตราดอกเบี้ยที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 10 เปอร์เซนต์ต่อปี กำหนดให้กังหันลมทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน ปีละ 365 วัน อายุการใช้งานของกังหันลม 10 ปี สามารถคำนวณปริมาณน้ำที่ได้ใน 1 ปี คือ 546 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และจะได้มูลค่าเทียบเท่าต้นทุนของกังหันลม คือ 2,453 บาทต่อปี เมื่อคำนวณหาต้นทุนที่ใช้ในการสูบน้ำ จะได้ 4.5 บาทต่อน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร

5. สรุป

จากการศึกษาหาระบบที่เหมาะสมของกังหันลม สำหรับการสูบน้ำเพื่อใช้งานในประเทศไทย ซึ่งเป็นการศึกษาหาสมรรถนะของกังหันลมที่มีใบพัดเป็นลักษณะแผ่นโค้ง โดยมีอัตราส่วนความโค้งเท่ากับ 0.07 รวมถึงประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุนของกังหันลม และเครื่องสูบน้ำ พบว่า

(1) จากการศึกษาถึงสมรรถนะของกังหันลมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากการทดสอบแบบจำลองกังหันลมภายในอุโมงค์ลมมีค่าใกล้เคียงกัน

(2) จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์นั้น พบว่าจำนวนใบพัดที่เหมาะสมสำหรับนำมาสร้างแบบจำลองกังหันลม เพื่อทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลมคือ 12 ใบ เนื่องจาก ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดใกล้เคียงกับกังหันลมที่มีจำนวนใบมากๆ

(3) จากการศึกษาหาสมรรถนะแบบจำลองกังหันลมภายในอุโมงค์ลม โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม พบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่ความเร็วลม3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที กังหันลมชนิดนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด คือ 0.296, 0.318 และ 0.308 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.18,1.13 และ 0.85 ตามลำดับ

(4) กังหันลมแบบเต็มขนาดที่สร้างขึ้นนั้น เมื่อนำมาทดสอบใช้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำนั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากกังหันลมจะเริ่มหมุนที่ความเร็วลมประมาณ 2 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยสำหรับประเทศไทย

(5) ประสิทธิภาพรวม (Overall Efficiency) ของระบบ จะมีค่ามากเมื่อความเร็วลมต่ำๆ และจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นเนื่องจากเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น การที่เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเล็กเนื่องจากได้ถูกออกแบบไว้ที่ความเร็วลมต่ำและได้เผื่อประสิทธิภาพการส่งกำลัง จึงทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำน้อยมากเมื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิรวมของระบบส่งผลให้ได้ค่าต่ำมาก

(6) ผลจากการทดสอบกังหันลมแบบเต็มขนาด พบว่า ปริมาณของน้ำจะขึ้นอยู่กับความเร็วลม และขนาดของเครื่องสูบน้ำเป็นหลัก สำหรับเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 เมตร เมื่อความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที กังหันสามารถสูบน้ำได้ 3.5 ลิตรต่อนาที

(7) จากผลการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้นทุนในการสูบน้ำโดยใช้กังหันลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 4.5 บาทต่อน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที และต้นทุนจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการเลือกสถานที่สำหรับติดตั้งกังหันลมเพื่อใช้ในการสูบน้ำ ควรที่จะเลือกสถานที่ที่มีลมพัดอย่างต่อเนื่องเพื่อลดต้นทุนในการสูบน้ำให้น้อยลง

6.เอกสารและสิ่งอ้างอิง

[1]Frank, R. Eldridge. 1975.” Wind Machine.” National Technology Information Service, U.S. Department of Commerce.

[2]Wilson, R.E and Lissaman, P.B.S. 1974.” Applied Aerodynamic of Wind Power Machines.” Oregon State University. U.S.A.

[3] National Energy Administration. 1984.” A Feasibility Study of Water Lifting Technology in Thailand.” Ministry of science, Technolgy and Energy, Bangkok. 134 p.

[4] Lysen, E.H. 1982.”Introduction to Wind Energy. SWD Steering Committee Wind Energy Developing Countries”, Netherland.

[5] หลาบ รับสิริ. 2531.” กังหันลมเพื่อการเกษตรและไฟฟ้า.” มหาวิทยาเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

[6] ยุทธชัย เกี้ยวสันเทียะ.2547. ”การศึกษาและพัฒนากังหันลมสำหรับการสูบน้ำในประเทศไทย” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

7. คำอธิบายสัญลักษณ์

c = ความยาวคอร์ดใบพัด (เมตร)

r = รัศมีภายในของกังหันลม (เมตร)

x = อัตราส่วนระหว่าง r กับ R

B = จำนวนใบของกังหันลม

C_D = สัมประสิทธิ์ของแรงต้าน

C_L = สัมประสิทธิ์ของแรงยก

C_P = สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน

C_Q = สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด

F = ค่าการสูญเสียที่ปลายใบ เท่ากับ $\{1- \frac{1.386}{B} \sin (\phi/2)\}^2$

Q = โมเมนต์บิด หรือ ทอร์ค (นิวตัน เมตร)

R = รัศมีภายนอกของกังหันลม (เมตร)

W = ความเร็วลมสัมพัทธ์

λ = อัตราส่วนความเร็วปลายใบ

λ_r = อัตราส่วนความเร็วที่ตำแหน่งรัศมีใด ๆ

ϕ = มุมระหว่างระนาบการหมุนกับความเร็วลมสัมพัทธ์

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ kg/m^3

g = แรงโน้มถ่วง m/s^2

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ kg/m^3

H = ความสูงของการสูบ m

Q = อัตราสูบน้ำ ลิตรต่อนาที

V = ความเร็วลม m/s

π = 3.14127

AC = มูลค่าเทียบเท่าของค่าใช้จ่ายประจำปี (Annual Cost)

P = เงินลงทุนในครั้งแรก

A/P = ปัจจัยอัตราดอกเบี้ยเงินลงทุน (Capital Recovery Factor)

I = อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืมต่อปี

n = จำนวนปีในการกู้ยืมเงินลงทุน

ΣC = ค่าใช้จ่ายประจำปีคิดที่สิ้นปีได้แก่ค่าซ่อมบำรุงค่าดำเนินการ