

## จำนวนใบพัดและมุมติดตั้งใบพัดที่เหมาะสมของชุดใบพัดกังหันลม

### กรณีศึกษาใบพัดแบบแผ่นเรียบ

### Appropriateness of Number of Blade and Blade Setting Angle of Wind Rotor

### A Case study of Flat Plate Airfoil

ยุทธชัย เกี้ยวสันเทียะ\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล  
ถนนมิตรภาพ ตำบลบ้านเกาะ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย  
E-mail: KEAWSA2000@YAHOO.COM

#### บทคัดย่อ

กังหันลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกลโดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษ สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การสูบน้ำเพื่อการเกษตร และใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา จำนวนใบพัดและมุมติดตั้งใบพัดที่เหมาะสมเพื่อให้ชุดใบพัดกังหันลมซึ่งมีใบพัดแบบแผ่นเรียบมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนใบพัด 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24 และ 28 ใบ และปรับมุมติดตั้งใบพัดระหว่าง 15, 20, 25 และ 30 องศา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หา ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงาน และค่าทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมได้สร้างจากทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ จากการศึกษาชุดใบพัดกังหันลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกังหัน 0.7 เมตร ใบพัดเป็นแบบแผ่นเรียบมีความกว้างของใบพัด 0.1 เมตร ความยาวใบพัด 0.2 เมตรหนา 1 มิลลิเมตร ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที พบว่า จำนวนใบพัดที่เหมาะสมสำหรับชุดใบพัดกังหันลมแบบแผ่นเรียบเท่ากับ 12 ใบพัด และมุมติดตั้งใบพัดที่เหมาะสมเท่ากับ 20 องศา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.29 ที่อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบประมาณ 1.6

**คำหลัก:** กังหันลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม จำนวนใบพัดและมุมติดตั้งใบพัดกังหันลม

#### Abstract

The wind turbine is equipment which converts the wind energy into the mechanical energy that does not cause pollution. This energy was used for water pumping into irrigation and electricity generating; etc. This research paper were studied to the number of blade and blade setting angle for the propeller wind turbine those are appropriate, which give the maximum power coefficient of wind rotor as flat plate blade type. The mathematical model was used to study in this research by change the number of blade from 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24 and 28 blades respectively, and varies the blade setting angle from 15, 20, 25 and 30 degree respectively.

The mathematical model for performance and aerodynamic analysis was constructed from the axial momentum theory and the blade element theory. From the test of wind rotor of 0.7 meter diameter,

the blade of the wind turbine is a flat plate airfoil, the top tip and the bottom edge was 0.1 m, the length 0.2 m, 1 mm nominal thickness, at a wind velocity of 3 m/s. The performance calculations by simulation program show that a number of blades at 12 blades and the blade setting angle at 20 degree are optimum value for applying to this wind turbine that give maximum power coefficient of 0.29 at a tip speed ratio of 1.6.

**Keywords:** Wind turbine, mathematical model of wind turbine, the number of blade and blade setting angle of wind turbine.

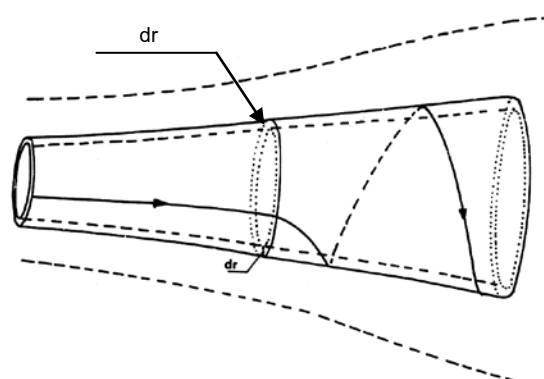
## 1. บทนำ

กังหันลม [1] เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกลแล้วนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ใช้ในการสูบน้ำเพื่อการเกษตร [2] การกะเทาะเมล็ดพืช ใช้ในการสีข้าว โม่แป้ง [3] และใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [4] เป็นต้น แต่ยังไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนัก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับอัตรากำลังงานที่กังหันลมสามารถผลิตได้และยังมีความไม่แน่นอนของกำลังงาน สำหรับประเทศไทยนั้นได้มีการนำกังหันลมมาใช้ในการสูบน้ำเพื่อการเกษตรและชลประทานเป็นหลัก [5] กังหันลมที่มีเพลาขับวางอยู่ในแนวระดับ (Horizontal Axis Wind Turbine) และมีใบพัดลักษณะเป็นแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate) เป็นกังหันลมประเภทหนึ่งที่มีใช้ในประเทศไทย แต่ราคาของกังหันลม ประเภทนี้ค่อนข้างสูง เนื่องจากชุดใบพัดมีจำนวนใบพัดมาก เช่น 30 ใบ, 40 ใบ เป็นต้น จำนวนใบพัดที่มากนี้ส่งผลให้กังหันลมมีราคาของโครงสร้างสูงเช่นกัน ดังนั้นการศึกษาและพัฒนากังหันลมเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ในประเทศไทย ซึ่งเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานลมค่อนข้างต่ำ จึงมีความสำคัญมาก มุมติดตั้งใบพัดและจำนวนใบพัดของชุดกังหันลมเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการดึงพลังงานและค่าใช้จ่ายในการสร้างกังหันลมสำหรับใช้งาน ในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาผลกระทบที่เกี่ยวข้องในด้านการดึงพลังงานที่ได้จากชุดใบพัดกังหันลม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบพัดและปรับ เปลี่ยนมุมติดตั้งใบพัดเพื่อให้ได้ชุดใบพัดที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานและใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนากังหันลมต่อไป

## 2. อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] มีทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของกังหัน ลมอยู่ 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial Momentum Theory) และทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบพัด (Blade Element Theory) เมื่อนำทฤษฎีทั้งสองมา รวมกันสามารถคำนวณหาสมรรถนะ หรือค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมได้

**2.1 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน** เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมที่เกิดขึ้นบนกังหันลม พิจารณาอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 1 ล้ออากาศที่ไหลผ่านด้านหน้ากังหันลม มีแต่ความเร็วตามแนวแกนเท่านั้น แต่เมื่ออากาศไหลผ่านกังหันลม บริเวณด้านหลังของกังหันลมอากาศนั้นมีความเร็วทั้งในทิศตามแนวแกนและในทิศทางเชิงมุม



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของอากาศด้านหลังกังหันลม

จากรูปที่ 1 พิจารณาวงแหวนที่มีรัศมี  $r$  และมีความหนาเท่ากับ  $dr$  พื้นที่หน้าตัดของลำอากาศ (Annular Tube) มีค่าเท่ากับ  $2\pi r(dr)$  เมื่อใช้สมการของเบอร์นูลลีวิเคราะห์ความแตกต่างของความดัน สถิตที่เกิดขึ้นบนกังหันลมเมื่อความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นจาก  $\Omega$  ไปเป็น  $\Omega + \omega$  จะได้แรงตามแนวแกน (Thrust) ที่เกิดขึ้นบนกังหันลมคือ

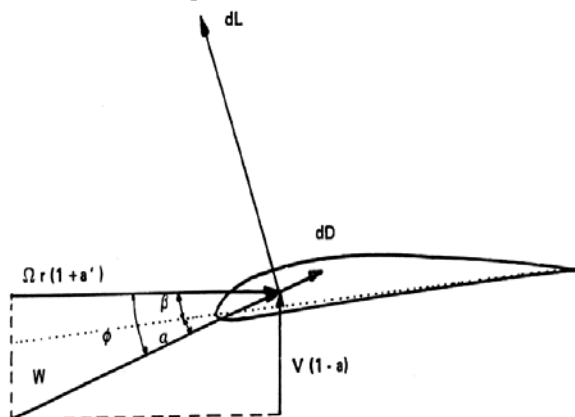
$$dT = 4a'(1+a') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (1)$$

และได้โมเมนต์บิด (Torque) ที่เกิดขึ้นบนกังหันลมคือ

$$dQ = 4a'(1-a) \frac{1}{2} \rho V \Omega r^2 2\pi r (dr) \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } a' = \frac{1}{2} \frac{\omega}{\Omega} \quad (3)$$

**2.2 ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบพัด** เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงแรงที่กระทำบนชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของใบกังหันลมแต่ละใบ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความเร็วลมและแรงที่กระทำบนใบพัด

แรงตามแนวแกนและโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นบนใบพัดสามารถเขียนในรูปสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงดูดได้ดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$dT = \frac{1}{2} Bc \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (4)$$

$$dQ = \frac{1}{2} Bc \rho W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 และสมการค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดดังสมการที่ 6 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของโมเมนต์บิดในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Torque) ได้ดังสมการที่ 7

สมการสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิด

$$C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho V^2 \pi R^3} \quad (6)$$

ค่าโมเมนต์บิดในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล

$$\begin{aligned} 2\sigma x^2 (\sin \phi + \lambda_r \cos \phi)^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \\ = \frac{dC_q}{dx} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{เมื่อให้ } \lambda_r = \frac{1 - \frac{w}{W} \tan \phi}{\tan \phi + \frac{w}{W}} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (9)$$

$$\frac{w}{W} = \frac{\sigma C_L}{4F \sin \phi} \quad (10)$$

เมื่อได้ค่าของ Differential Torque Coefficient แล้วจะ

พล็อตกราฟระหว่างค่า  $\frac{dC_q}{dx}$  กับ  $\lambda$  จากนั้นเปลี่ยน

กราฟให้เป็น  $\frac{dC_q}{dx}$  กับ  $x$  แล้วหาพื้นที่ใต้โค้งในแต่

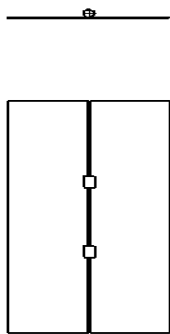
ละ  $\lambda$  จะได้ค่า  $C_q$  จากนั้นคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์กำลัง ( $C_p$ ) โดยที่  $C_p = C_q * \lambda$

### 3. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและค่า

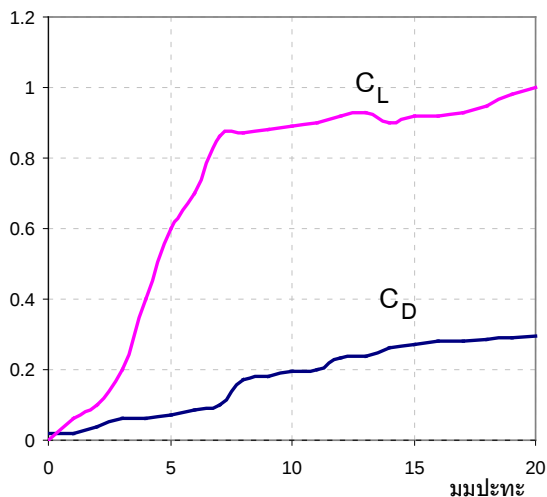
#### สัมประสิทธิ์แรงดูดของใบพัดแผ่นเรียบ

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องทราบค่า  $C_L$  และ  $C_D$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่าง ๆ ของใบพัด สำหรับใช้ในการคำนวณ การศึกษานี้ได้ใช้ใบพัดกังหันลมแบบแผ่นเรียบความยาวคอर्ड (c) เท่ากับ 0.1 เมตร ความยาวใบพัด เท่ากับ 0.2 เมตร ความหนาของใบเท่ากับ

1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 เป็นกรณีศึกษา สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของชุดใบพัดกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ( $C_L$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงจุด ( $C_D$ ) ของใบพัดแบบแผ่นเรียบที่มุมปะทะต่าง ๆ ได้ศึกษาจากโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองใบพัดแบบแผ่นเรียบในโปรแกรม Solid Work จากนั้นได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Flowork ประมวลผลค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและค่าสัมประสิทธิ์แรงจุด โดยผลการศึกษาได้แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 แบบจำลองใบพัดกังหันลมแบบแผ่นเรียบ



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและค่าสัมประสิทธิ์แรงจุดที่มุมปะทะต่าง ๆ

#### 4. การคำนวณสมรรถนะชุดใบพัดกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของชุดใบพัดกังหันลมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

1) กำหนดค่า รัศมีภายนอก ( $R$ ) มุมปะทะ ( $\alpha$ ) สัมประสิทธิ์แรงยก ( $C_L$ ) สัมประสิทธิ์แรงจุด ( $C_D$ ) คอร์ด ( $c$ ) มุมติดตั้งใบ ( $\beta$ ) จำนวนใบ ( $B$ ) และเลือกค่ารัศมีภายใน ( $r$ )

2) คำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$x = r/R$$

$$\sigma = Bc/2\pi r$$

$$\phi = \beta + \alpha$$

$$\lambda_r = \frac{1 - \frac{w}{W} \tan \phi}{\tan \phi + \frac{w}{W}}$$

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

$$\lambda = \lambda_r / x$$

$$\frac{2\sigma x^2 (\sin \phi + \lambda_r \cos \phi)^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{dx} = \frac{dC_q}{dx}$$

3) เปลี่ยนค่า  $\phi$  แล้วกลับไปคำนวณขั้นที่ 2 ใหม่

4) เปลี่ยนค่า  $r$  แล้วกลับไปคำนวณค่าของข้อ 2 ใหม่

5) พล็อตกราฟระหว่าง  $\frac{dC_q}{dx}$  กับ  $\lambda$

6) เปลี่ยนกราฟในข้อ 4 ให้เป็น  $\frac{dC_q}{dx}$  กับ  $x$

7) หาพื้นที่ใต้โค้งในแต่ละ  $\lambda$  จะได้ค่า  $C_q$

8) พล็อตกราฟระหว่างค่า  $C_p$  กับ  $\lambda$  โดยที่

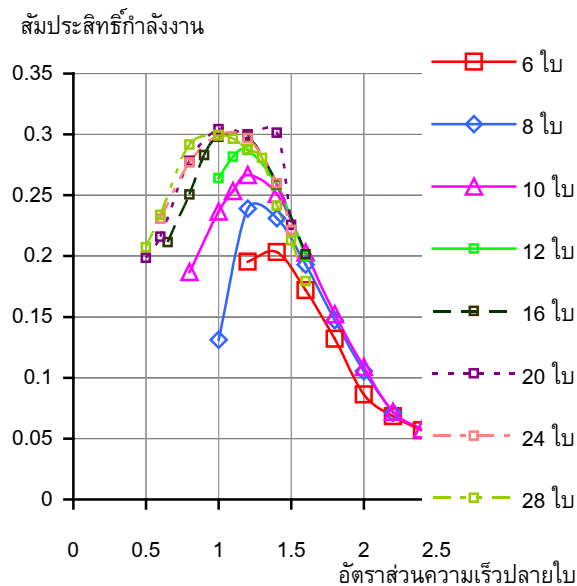
$$C_p = C_q * \lambda$$

เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ จากขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 แล้ว ได้ทำการเปลี่ยนจำนวนใบพัดในขั้นตอนที่ 1 ใหม่ เป็น 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24 และ 28 ใบ โดยในแต่ละจำนวนใบพัดได้คำนวณขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ใหม่ เพื่อหาจำนวนใบพัดที่เหมาะสม จากนั้น ได้เลือกจำนวนใบพัดที่เหมาะสมศึกษาค่ามุมติดตั้งใบพัด ( $\beta$ ) ที่เหมาะสมโดยปรับค่า มุมติดตั้งใบพัด ในขั้นตอนที่ 1 ใหม่ ซึ่งมุมที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง 15, 20, 25 และ 30 องศา โดยในแต่ละครั้งของการปรับมุมติดตั้งใบพัดจะทำการคำนวณขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ใหม่ในแต่ละมุม

### 5. ผลการศึกษา

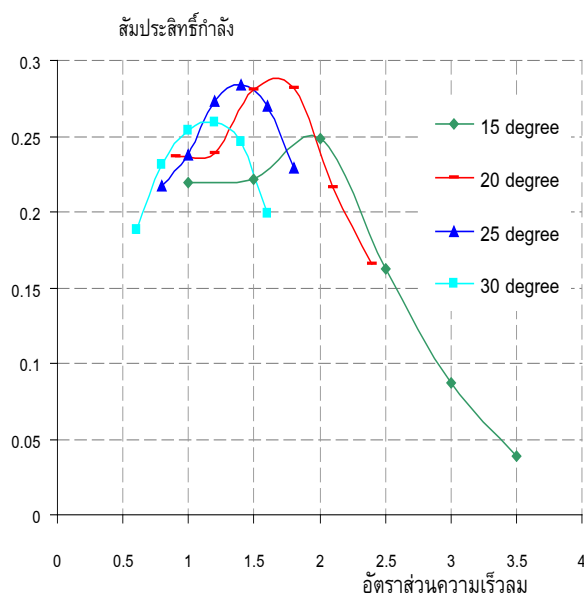
จากการศึกษาความสามารถในการดึงพลังงาน หรือค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมเมื่อกังหันลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ใบพัดแบบแผ่นเรียบมีความกว้างของใบพัด 0.1 เมตร ความยาวใบพัด 0.2 เมตร ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที โดยปรับเปลี่ยนจำนวนใบพัดดังนี้ 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24 และ 28 ใบ และปรับมุมติดตั้งใบพัดระหว่าง 15, 20, 25 และ 30 องศา พบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบพัด สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากจำนวนใบ 6 ใบ ถึง 10 ใบ และมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อจำนวนใบเพิ่มขึ้นจากจำนวนใบ 12 ใบถึง 28 ใบ สัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดอยู่ในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1 ถึง 1.5 โดยที่จำนวนใบพัดเท่ากับ 6 ใบ ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.203 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1.4 จำนวนใบพัดเท่ากับ 8 ใบ ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.239 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1.2 จำนวนใบพัดเท่ากับ 10 ใบ ชุดใบพัดกังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.266 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1.2 จำนวนใบพัดเท่ากับ 12 ใบ ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.287 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1.2 จำนวนใบพัดเท่ากับ 16 ใบ ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.298 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1.2 จำนวนใบพัด

เท่ากับ 20 ใบ ชุดใบพัดกังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.3 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1.2 จำนวนใบพัดเท่ากับ 24 ใบ ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.299 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1 จำนวนใบพัดเท่ากับ 28 ใบ ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 0.299 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบพัด

จากนั้นผู้ทำการศึกษาก็ได้เลือกใช้ชุดใบพัดกังหันลมจำนวน 12 ใบ ศึกษาผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานเมื่อปรับเปลี่ยนมุมติดตั้งใบพัดระหว่าง 15 องศา ถึง 30 องศา โดยปรับครั้งละ 5 องศา จากการศึกษพบว่า มุมติดตั้งใบพัด 15 องศา ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด เท่ากับ 0.248 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 2 มุมติดตั้งใบพัด 20 องศา ชุดใบพัดกังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด เท่ากับ 0.29 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 1.6 มุมติดตั้งใบพัด 25 องศา ชุดใบพัดกังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด เท่ากับ 0.283 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 1.4 มุมติดตั้งใบพัด 30 องศา ชุดใบพัด กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด เท่ากับ 0.26 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 1.2 ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วลม  
ปลายใบที่มุมติดตั้งใบพัดตั้งแต่มุม 15 ถึง 30 องศา

## 6. สรุปผล

จากการศึกษาจำนวนใบพัดและมุมติดตั้งใบพัดที่เหมาะสมเพื่อให้ชุดใบพัดกังหันลมที่มีใบพัดเป็นแบบแผ่นเรียบมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด พบว่า จำนวนใบพัดที่เหมาะสมสำหรับชุดใบพัดกังหันลมแบบแผ่นเรียบเท่ากับ 12 ใบพัด และมุมติดตั้งใบพัดที่เหมาะสมเท่ากับ 20 องศา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.29 ที่อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบประมาณ 1.6

## 7. รายการสัญลักษณ์

- a = ค่าการรบกวนกระแสตามแนวแกน
- a' = ค่าการรบกวนกระแสในทิศทางเชิงมุม
- b = ความยาวของใบกังหันลม (เมตร)
- c = ความยาวคอร์ดใบพัด (เมตร)
- r = รัศมีภายในของกังหันลม (เมตร)
- x = อัตราส่วนระหว่าง r กับ R
- B = จำนวนใบพัดของกังหันลม
- $C_D$  = สัมประสิทธิ์ของแรงต้าน
- $C_L$  = สัมประสิทธิ์ของแรงยก
- $C_p$  = สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน
- $C_q$  = สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด
- D = แรงต้านหรือแรงฉุด (นิวตัน)

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

R = รัศมีภายนอกของกังหันลม (เมตร)

T = แรงตามแนวแกน (นิวตัน)

W = ความเร็วลมสัมพัทธ์

$\lambda$  = อัตราส่วนความเร็วปลายใบ

$\lambda_r$  = อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่รัศมีใด ๆ

$\alpha$  = มุมปะทะ (องศา)

$\beta$  = มุมติดตั้งใบพัด (องศา)

$\phi$  = มุมระนาบการหมุนกับความเร็วลมสัมพัทธ์ (องศา)

$\Omega$  = ความเร็วเชิงมุมของกังหันลม (rad/s)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของลำอากาศหมุน (Wake)

$\sigma$  = อัตราส่วนโซลิดิตี (Solidity ratio of rotor)

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Frank, R. Eldridge. *Wind Machine* National Technology Information Service, U.S. Department of Commerce, 1975.
- [2] Jawaid Iqbal, M. 1981. *Performance and Aerodynamic Analysis of Thai Multi Blade Windmill*. M. Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- [3] Wilson, R.E and Lissaman, P.B.S. 1974. *Applied Aerodynamic of Wind Power Machines*. Oregon State University. U.S.A.
- [4] Mukhia, P. 1981. *Performance and Aerodynamic Analysis of Thai 4 Blade Windmill*. M. Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- [5] National Energy Administration. 1984. *A Feasibility Study of Water Lifting Technology in Thailand*. Ministry of science, Technology and Energy, Bangkok. 134 p.
- [6] Lysen, E.H. 1982. *Introduction to Wind Energy*. SWD Steering Committee Wind Energy Developing Countries, Netherland.