## **AEC036**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

# ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนสำหรับกังหันลมที่มีสองโรเตอร์หมุนสวนทางกัน Axial Momentum Theory for Contra Rotating Rotors Wind Turbine

บันเทิง สุวรรณตระกูล<sup>1\*</sup> ชวิน จันทรเสนาวงศ์<sup>1</sup> อรรณพ เรืองวิเศษ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี บางมด เขตทุ่งครุ

กรุงเทพมหานคร 10140

โทร 0-2470-9124,0-2470-9285 โทรสาร 0-2470-9111 <sup>\*</sup>อีเมล์ Banterng.Suw@kmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับ ้กังหันลมให้มีสองโรเตอร์หมุนสวนทางกัน โรเตอร์ทั้งสองของกังหันลม ถูกแทนด้วยแผ่นแอกทูเอเตอร์ (Actuator-Disc) อากาศที่เคลื่อนที่ผ่าน กังหันลมอยู่ในท่อสตรีม 2 ท่อ คือท่อสตรีมด้านในและท่อสตรีมด้าน นอก โดยท่อสตรีมด้านนอกมีหน้าตัดเป็นวงแหวนล้อมท่อสตรีมด้านใน ท่อสตรีมด้านในตัดผ่านบางส่วนของโรเตอร์ตัวแรก และมีขนาดเท่ากับ โรเตอร์ตัวที่สองเมื่อไหลผ่านโรเตอร์ตัวที่สอง ท่อสตรีมด้านนอกมี ขนาดเท่ากับโรเตอร์ตัวแรกเมื่อไหลผ่านโรเตอร์ตัวแรก ใช้สมการ ์ โมเมนตัมในแนวแกนร่วมกับกฎของการทรงมวลพบว่า กังหันลมชนิดนี้ ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด 81.4 % เมื่อให้โรเตอร์ตัวแรกมีลักษณะ ที่ส่วนกลางเปิดเป็นช่องมีพื้นที่เป็น 58 % ของพื้นที่ของโรเตอร์ตัวที่ สองที่อยู่ข้างหลัง หรือคิดเป็นของเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิด 76.2 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ตัวที่สองที่อยู่ข้างหลัง ตำแหน่งที่มีค่า รัศมีมากกว่าส่วนที่ช่องเปิดดังกล่าวได้รับออกแบบรูปร่างใบพัดโดยใช้ ทฤษฎีของ Betz กล่าวคือให้ ความเร็วลมในแนวแกนขณะผ่านโรเตอร์ มีค่าเป็น 2/3 ของความเร็วลม ก้านของใบที่ผ่านช่องว่างได้รับการ ออกแบบให้รับแรงที่เกิดขึ้นจากใบและมีแรงต้านอากาศต่ำ โดยไม่ได้มี ้วัตถุประสงค์หลักที่จะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงาน โรเตอร์ตัวที่สอง ได้รับการออกแบบให้ ความเร็วลมในแนวแกนขณะผ่านกังหันลมมีค่า เป็น 0.582 ของความเร็วลมอิสระ

#### Abstract

This research aims to optimise the design of a contra rotating rotors wind turbine. The rotors are modeled as actuator discs positioned inside two concentric stream tubes. The flow in the inner stream tube passes through the inner region of the upstream rotor and the stream tube cross section area expands to cover the entire downstream rotor. The flow in the outer stream tube passes through the external part up to the blade tip of the upstream rotor. Using the axial momentum equation in conjunction with the mass conservation equation reveals that the turbine maximum power coefficient is 81.4%. This is achieved when the inner part of the upstream rotor has zero solidity and covers 58% of the total swept area or corresponding to 76.2% of the diameter of the downstream rotor. In practice, this part of the turbine blade is designed to generate minimum drag as its function is only support the blade tip and not to extract wind energy itself. The turbine blades in the outer region of the upstream rotor are designed using Betz theory which specifies the local axial flow velocity to be 2/3 of the free stream. The local axial flow velocity at the downstream rotor is 0.582 of free stream velocity.

Key words: Horizontal axis wind turbine, contra rotating rotor, counter rotating rotors, axial momentum theory

#### 1. คำนำ

ทฤษฎีกังหันลมของ Betz ได้รับการนำเสนอมาตั้งแต่ปี คศ 1919 [1] ทฤษฎีดังกล่าววิเคราะห์จากสมการโมเมนตัมการไหล ตามแนวแกน (Axial Momentum Equation) ประกอบกับ สมการการ ทรงมวล (Mass Continuity Equation) กำลังงานเพลาที่ได้จาก กังหันลมเมื่อนำมาเทียบกับกำลังงานจากลม นิยมเขียนอยู่ในรูปของ สัมประสิทธิ์ กำลัง ดังนี้

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AV^3} \tag{1}$$

เมื่อ C<sub>n</sub> เป็นสัมประสิทธิ์กำลัง

P เป็นกำลังงานที่กังหันลมผลิตได้

- ho เป็นความหนาแน่นของอากาศ
- V เป็นความเร็วลมอิสระ

้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้พบว่าขึ้นอยู่กับค่าความเร็วลมขณะผ่านโรเตอร์ กังหันลม หากปรับให้มีตัวเลขเป็น 2/3 ของความเร็วลมอิสระ จะได้ ความเร็วด้านหลังโรเตอร์กังหันลมมีค่าเป็น 1/3 ของความเร็วลมอิสระ และได้สัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดเป็น 16/27 หรือ 59.3% เรียกว่า สัมประสิทธิ์กำลังของ Betz ทฤษฎีนี้เมื่อนำไปใช้ร่วมกับทฤษฎีอีลีเมนท์ ของใบ (Blade Element Theory) สามารถออกแบบรูปร่างใบพัดกังหัน ลมได้

ทฤษฏีที่ใช้วิเคราะห์กังหันลมที่โรเตอร์วางเรียงกัน 2 โรเตอร์ ได้ เสนอโดย Newman [2] พบว่ากำลังงานสูงสุดที่กังหันลมทำงานได้มี ค่าเป็น 16/25 หรือ 64 % ของกำลังงานจากลม ความเร็วลมขณะผ่าน โรเตอร์ตัวแรกมีค่าเป็น 0.8 ของความเร็วลมอิสระ ความเร็วลมขณะ ผ่านโรเตอร์ตัวที่ 2 มีค่าเป็น 0.4 ของความเร็วลมอิสระ หลังจากนั้น Newman [3] ได้ขยายทฤษฏีโดยเพิ่มจำนวนโรเตอร์ให้มีจำนวนมากขึ้น จนถึงจำนวนไม่จำกัด (Infinity Rotor) และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สูงสุดของกังหันลมที่จำนวนโรเตอร์ไม่จำกัดวางเรียงต่อเนื่องกันมีค่า เป็น 2/3 หรือ 66.67 %

นอกเหนือจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีแล้ว ในทางปฏิบัติได้มี ผู้ออกแบบและสร้างกังหันลมสองโรเตอร์หมุนสวนทางกัน โรเตอร์ตัวแรก ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานลมเป็นพลังงานกล เนื่องจากความเร็วลมที่ อยู่ด้านหลังโรเตอร์ตัวแรกนี้ ยังมีค่าสูงอยู่เพียงพอที่จะดึงพลังงานไปใช้ได้ อีกจึงวางโรเตอร์อีกตัวหนึ่งอยู่ด้านหลังของโรเตอร์ตัวแรก ทำหน้าที่ เปลี่ยนรูปพลังงานลมเป็นพลังงานกลเช่นเดียวกับโรเตอร์ตัวแรก พลังงานเพลาจากโรเตอร์ทั้งสองมักจะนำมาขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่ เพลาหนึ่งขับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกเพลาหนึ่งสเตเตอร์ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่1



รูปที่ 1 แสดงกังหันลมที่มีสองโรเตอร์หมุนสวนทางกัน

Ushiyama และคณะ [4] ได้ทดลองสร้างโมเดลกังหันลมแบบ โรเตอร์หมุนสวนทางกัน โรเตอร์ตัวแรกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 m ทดสอบที่จำนวนใบพัด 3, 4 และ 6 ใบ โรเตอร์ดัวที่สองมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 m ทำการทดสอบที่จำนวนใบพัด 2 และ3 ใบ ผลการทดสอบพบว่ากำลังงานที่ได้มีค่าสูงขึ้น และความเร็วรอบสัมพัทธ์ มีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับกังหันลมโรเตอร์เดียว จึงมีความเหมาะสมทาง เทคนิคที่จะพัฒนาใช้ต่อไป

Jung และ คณะ [5] ออกแบบสร้างกังหันแบบแกนหมุนอยู่ใน แนวนอนที่โรเตอร์วางเรียงกันและหมุนสวนทางกันขนาด 30 kW ที่ ความเร็วลม 10.6 m/s โรเตอร์หลักมี 3 ใบพัดอยู่ด้านหลังมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 11 m โรเตอร์ช่วยมี 3 ใบพัด (Auxiliary Rotor, A/R) อยู่ด้านหน้า มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 m ความเร็วรอบของโร เตอร์หลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของโรเตอร์ช่วย กำลังงานทั้งสองถูกนำมา รวมกันด้วยระบบเฟืองและนำมาขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากผลการ ทดสอบพบว่า กำลังงานที่ได้จากการให้กังหันลมเดินด้วยโรเตอร์ 2 ตัว ได้กำลังงานสูงกว่าการเดินเฉพาะโรเตอร์หลักตัวเดียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ระยะห่างของโรเตอร์ทั้งสอง เมื่อให้โรเตอร์ทั้งสองอยู่ห่างกันเป็น ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์หลักพบว่าได้กำลังงานเพิ่มขึ้น 21 % และมีผลให้สัมประสิทธิกำลังมีค่าเป็น 0.5

Kanemoto และ Galal [6]เสนอให้มีการพัฒนากังหันลมสองโร เตอร์วางเรียงกันเพื่อใช้งานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Synchronous ที่ได้พัฒนามาก่อนแล้ว โรเตอร์หน้าของกังหันลมขับอะมาเจอร์ตัวใน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรเตอร์หลังของกังหันลมขับอะมาเจอร์ตัวนอก โมเดลกังหันลมที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์หน้า เป็น 550 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์หลังเป็น 390 mm จากผลการทดลองพบว่าโรเตอร์ทั้งสองของกังหันลมเริ่มต้นหมุนใน ทิศทางเดียวกัน โรเตอร์หลังมีความเร็วรอบสูงกว่าโรเตอร์หน้าเนื่องจาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า ที่ความเร็วลมระบุพบว่าของโรเตอร์ หลังมีความเร็วรอบสูงสุด เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นพบว่าความเร็วรอบ แล้วหมุนกลับทิศซึ่งเป็นการหมุนในทางเดียวกับ ลดต่ำลงจนหยุด โรเตอร์ หน้า จำนวนใบพัดที่เหมาะสมคือ โรเตอร์หน้ามีจำนวน 3 ใบ โรเตอร์หลังมีจำนวน 4-6 ใบ ข้อดีของกังหันลมและเครื่อง และ ้กำเนิดไฟฟ้าชุดนี้คือให้กำลังงานสูงกว่ากังหันลมโรเตอร์เดียว และได้ค่า กำลังงานคงที่โดยไม่ต้องติดตั้งเบรคหรือปรับมุมใบ

Shen และคณะ [7] ได้วิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมมีสอง โรเตอร์ขนาดเท่ากันหมุนสวนทางกันโดยวิธีเชิงดัวเลข โดยใช้เส้น คุณลักษณะของกังหันลม 3 ใบ ยี่ห้อ Nordtank 500 kW ผลจากการ วิเคราะห์พบว่าพลังงานต่อปีที่กังหันลมที่มีสองโรเตอร์หมุนสวนทางกัน สามารถผลิตได้มากกว่ากังหันลมโรเตอร์เดียวประมาณ 43.5 %

จากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีพบว่ากังหันลมที่มีสองโรเตอร์หมุน สวนทางกัน มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังมีค่าสูงสุดมีเพิ่มขึ้น 8 % เมื่อเทียบ กับกังหันลมโรเตอร์เดียว แต่ผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังกังหันลมที่มีสองโรเตอร์หมุนสวนทางกันมีค่า เพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 21 % ดั้งนั้นจึงน่าจะพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ ขึ้นใหม่ ตลอดจนการหารูปแบบกังหันลมและความเร็วลมที่เหมาะสม เมื่อไหลผ่านโรเตอร์กังหันลมแบบสองโรเตอร์หมุนสวนทางกันโดยใช้ สมการโมเมนตัมในแนวแกน อันเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

#### 2. ทฤษฎี



โรเตอร์ของกังหันลม 2 ตัวถูกแทนที่ด้วย Actuator-Disc ดังแสดง ในรูปที่ 2

#### รูปที่ 2 แสดงไดอะแกรมกังหันลมที่มีสองโรเตอร์

จากไดอะแกรมในรูปที่ 2 ความเร็วลมอิสระ V เคลื่อนที่ใน ความดันบรรยากาศ  $p_0$  ไหลผ่านกังหันลม กังหันลมอยู่ในท่อสตรีม สองท่อ คือท่อสตรีมด้านใน(ท่อสตรีม1)และท่อสตรีมด้านนอก(ท่อ สตรีม2) โดยท่อสตรีมด้านใน(ท่อสตรีม1)และท่อสตรีมด้านนอก(ท่อ สตรีม2) โดยท่อสตรีมด้านในตัดผ่านบางส่วนของโรเตอร์ตัวแรก (โรเตอร์ 1) มีพื้นที่เป็น  $A_{1-Inner}$  และมีขนาดเท่ากับโรเตอร์ตัวที่สอง (โรเตอร์ 2),  $A_2$  เมื่อไหลผ่านโรเตอร์ 2 ท่อสตรีมด้านนอกมีขนาดเท่ากับโรเตอร์ 1,  $A_1$  เมื่อไหลผ่านโรเตอร์ 1 กำลังงานกลที่ได้จากพื้นที่  $A_{1-Inner}$  มี ค่าเป็น  $P_{1-Inner}$  กำลังงานกลที่ได้จากพื้นที่ด้านนอก  $A_{1-Outer}$  มีค่า เป็น  $P_{1-Outer}$  กำลังงานกลที่ไปลี่ยนรูปที่โรเตอร์ 2 มีค่าเป็น  $P_2$ 



ค. ความดันที่อยู่ระหว่างท่อสตรีม1 และท่อสตรีม2

รูปที่ 3 แสดงความเร็ว และความดันที่ตำแหน่งต่างๆ

ความเร็วลมอิสระ V ใหลผ่านส่วนในของโรเตอร์ 1 ภายในท่อ สตรีม 1 ด้วยความเร็ว (1-a)V ซึ่งมีผลให้เกิดความแตกต่างของ ความดันที่ด้านหน้าและด้านหลังเป็น  $\Delta p_{1-Inner}$  จากนั้นความเร็วมี ค่าลดลงจนมีค่าเป็น (1-b)V ซึ่งมีผลให้ความดันภายในท่อสตรีมที่ ดำแหน่งนั้นมีค่าเป็นความดันบรรยากาศ ความเร็วลมลดต่ำลงไปอีก จนมีค่าเป็น (1-b-c)Vเมื่อไหลผ่านโรเตอร์ 2 ซึ่งมีผลให้เกิด ความแตกต่างของความดันที่ด้านหน้าและด้านหลังของโรเตอร์ 2 เป็น

 $\Delta p_2$  หลังจากผ่านโรเตอร์ 2 แล้ว ความเร็วลมมีค่าลดลงจนมีค่าเป็น (1-b-d)V ซึ่งมีผลให้ความดันภายในท่อสตรีมที่ตำแหน่งนั้นมี ค่าเป็นความดันบรรยากาศ

ความเร็วลมอิสระ V ไหลผ่านส่วนนอกของโรเตอร์ 1 ซึ่งอยู่ ระหว่างท่อสตรีม 1 และท่อสตรีม 2 ด้วยความเร็ว  $(1\!-\!e)V$  ซึ่ง มีผลให้เกิดความแตกต่างของความดันที่ด้านหน้าและด้านหลังเป็น

 $\Delta p_{\scriptscriptstyle 1-Outer}$  จากนั้นความเร็วมีค่าลดลงจนมีค่าเป็น (1-f)Vซึ่งมีผลให้ความดันภายในท่อสตรีมที่ตำแหน่งนั้นมีค่าเป็นความดัน บรรยากาศ

แรงกระทำในแนวแกนของโรเตอร์ 1 ส่วนใน,

$$T_{1-Inner} = A_{1-Inner} \cdot \left( p_{1-Inner}^+ - p_{1-Inner}^- \right)$$
 (2)  
แรงกระทำในแนวแกนของโรเตอร์ 1 ส่วนนอก

$$T_{1-Outer} = A_{1-Outer} \cdot \left( p_{1-Outerr}^+ - p_{1-Outer}^- \right)$$
(3)  
กระทำในแนวแกนของโรเตอร์ 2

แรงกระทำในแนวแกนของไร / เ

$$T_2 = A_2 \cdot \left( p_2^+ - p_2^- \right) \tag{4}$$

สมการเบอรนูลลีระหว่างตำแหน่งไกลจากด้านหน้าโรเตอร์1 จน ถึงตำแหน่งชิดหน้าโรเตอร์ 1 ส่วนใน

$$p_0 + 0.5\rho V^2 = p_{1-Inner}^+ + 0.5\rho (1-a)^2 V^2 \quad (5)$$

สมการเบอรนูลลีระหว่างตำแหน่งชิดหลังโรเตอร์ 1 ส่วนใน จนถึง ตำแหน่งที่ความดันเป็นบรรยากาศที่อยู่ระหว่างโรเตอร์ 1 และโรเตอร์ 2

$$\bar{p_{1-Inner}} + 0.5\rho(1-a)^2 V^2 = p_0 + 0.5\rho(1-b)^2 V^2$$
(6)

สมการเบอรนูลลีระหว่างตำแหน่งความดันบรรยากาศที่อยู่ระหว่าง โรเตอร์ 1 และโรเตอร์ 2 ส่วนใน จนถึงตำแหน่งชิดหน้าโรเตอร์ 2 ส่วน ใน

$$p_0 + 0.5\rho(1-b)^2 V^2 = p_2^+ + 0.5\rho(1-b-c)^2 V^2$$
<sup>(7)</sup>

สมการเบอรนูลลีระหว่างตำแหน่งชิดหลังโรเตอร์2 จนถึงตำแหน่ง ที่มีความดันบรรยากาศด้านหลัง

$$p_{2}^{-} + 0.5\rho(1-b-c)^{2}V^{2} = p_{0} + 0.5\rho(1-b-d)^{2}V^{2}$$
(8)

สมการเบอรนูลลีระหว่างตำแหน่งไกลจากด้านหน้าโรเตอร์1 ส่วน นอก จนถึงตำแหน่งชิดหน้าโรเตอร์1 ส่วนนอก

$$p_0 + 0.5\rho V^2 = p_{1-Outer}^+ + 0.5\rho (1-e) V^2$$
 (9)

สมการเบอรนูลลีระหว่างตำแหน่งชิดด้านหลังโรเตอร์1 ส่วนนอก จนถึงตำแหน่งที่มีความดันบรรยากาศด้านหลัง

$$p_{1-Outer}^{-} + 0.5\rho(1-e)^2 V^2 = p_0 + 0.5\rho(1-f)^2 V^2$$
(10)

จากสมการที่ (5) และ (6) ได้

$$p_{1-Inner}^{+} - p_{1-Inner}^{-} = 0.5 \rho \left[ 1 - (1-b)^2 \right] V^2$$
  
จากสมการที่ (7) และ (8) ได้  
 $p_2^{+} - p_2^{-} = 0.5 \rho \left[ (1-b)^2 - (1-b-d)^2 \right] V^2$   
จากสมการที่ (9) และ (10) ได้  
 $p_{1-Outer}^{+} - p_{1-Outer}^{-} = 0.5 \rho \left[ 1 - (1-f)^2 \right] V^2$ 

และสามารถคำนวณเป็นแรงกระทำในแนวแกนได้ดังนี้

แรงกระทำในแนวแกนของโรเตอร์ 1 ส่วนใน

$$T_{1-Inner} = 0.5\rho A_{1-Inner} \left[ 1 - (1-b)^2 \right] V^2$$
(11)

แรงกระทำในแนวแกนของโรเตอร์ 2

$$T_2 = 0.5\rho A_2 \left[ (1-b)^2 - (1-b-d)^2 \right] V^2$$

$$T_{2} = 0.5 \rho A_{2} \left[ 2d - 2bd - d^{2} \right] V^{2}$$
(12)  
แรงกระทำในแนวแกนของโรเตอร์ 1 ส่วนนอก

$$T_{1-Outer} = 0.5\rho A_{1-Outer} \left[ 1 - (1 - f)^2 \right] V^2$$
 (13)

แรงกระทำตามแนวแกนสามารถวิเคราะห์ได้อีกทางหนึ่งคือ ใช้ สมการโมเมนตัมตามแนวแกนดังนี้

$$T_{1-Inner} = \rho A_{1-Inner} (1-a) [1-(1-b)] V^2$$
 (14)

$$T_{2} = \rho A_{2} (1-b-c) [(1-b)-(1-b-d)] V^{2}$$
  

$$T_{2} = \rho A_{2} d (1-b-c) V^{2}$$
(15)  

$$T_{1-Outer} = \rho A_{1-Outer} (1-e) [1-(1-f)] V^{2}$$
(16)

สมการ (11) = สมการ (14) ได้
$$b=2a$$
 (17)

การ (13) = สมการ (16) โด
$$f = 2e$$
 (19)

$$= 2e \tag{19}$$

กำลังงานทางกลที่ได้จากกังหันลมคำนวณได้จากพลังงานจลน์ที่ เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา

$$P_{1-Inner} = 0.5\rho A_{1-Inner} (1-a) V \left[ V^2 - (1-b)^2 V^2 \right]$$
where  $P_{1-Inner} = 0.5\rho A_{1-Inner} V^3 \left[ 4a(1-a)^2 \right]$  (20)

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

$$P_{2} = 0.5\rho A_{2}(1-b-c)V \left[ (1-b)^{2}V^{2} - (1-b-d)^{2}V^{2} \right]$$

หรือ

$$P_{2} = 0.5\rho A_{2}V^{3}(1-b-c)[2d-2bd-d^{2}]$$
(21)

$$P_{1-Outer} = 0.5\rho A_{1-Outer} (1-e)V \left[ V^2 - (1-f)^2 V^2 \right]$$
where  $V_{1-Outer} = 0.5\rho A_{1-Outer} (1-e)V \left[ V^2 - (1-f)^2 V^2 \right]$ 

$$P_{1-Outer} = 0.5\rho A_{1-Outer} V^{3} [4e(1-e)^{2}]$$
(22)  
กำลังงานทางกลรวม

 $P = P_{1-Inner} + P_{1-Outer} + P_2$ 

เมื่อคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิของกำลังงานจะได้

$$\begin{split} C_p &= \left(\frac{A_{1-Inner}}{A}\right) \left[4a(1-a)^2\right] \\ &+ \left(\frac{A_{1-Outer}}{A}\right) \left[4e(1-e)^2\right] \\ &+ \left(\frac{A_2}{A}\right) (1-b-c) (2d-2bd-d^2) \\ \text{nstand} \ A &= A_2 = \left(A_{1-Inner} + A_{1-Outer}\right) \\ \text{use} \ m &= \frac{A_{1-Inner}}{A} \quad \text{is} \end{split}$$

$$C_{p} = m \Big[ 4a(1-a)^{2} \Big] + (1-m) \Big[ 4e(1-e)^{2} \Big] + (1-b-c) \Big( 2d - 2bd - d^{2} \Big)$$
(23)

หาค่า e เพื่อให้ได้ค่า  $C_p$  สูงสุด ได้ค่า e=1/3 หรือ 0.3333 ดังนั้น

$$C_{p} = m \Big[ 4a(1-a)^{2} \Big] + \left( \frac{16}{27} \right) (1-m) + (1-b-c) \Big( 2d - 2bd - d^{2} \Big)$$
(24)

สมการ (24) ต้องวิเคราะห์ร่วมกับกฎทรงมวลของของไหล ภายใน ท่อสตรีม1

$$m(1-a) = (1-2a-c)$$
 (25)

แทนค่า (25) ใน (24) และเขียนสมการ  $C_p$  ในรูปของตัวแปร a และ c ได้

$$C_{p} = 4(1 - 2a - c)(a + c - 2ac - a^{2} - c^{2}) + \left(\frac{16}{27}\right)\left(\frac{a + c}{1 - a}\right)$$
(26)

#### ผลที่ได้จากการวิจัย

จากการแทนตัวแปรด้วยตัวเลขพบว่าได้ผลการวิเคราะห์ แสดงได้ ดังรูปที่ 4 และ 5

รูปที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลัง เมื่อปรับค่า ความเร็วเหนี่ยวนำ (Axial Induction Velocity), c จาก 0 จนถึง 0.5 เมื่อให้ค่า ความเร็ว เหนี่ยวนำ a มีค่า 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.3333, 0.4 ตามลำดับ มี เส้นกราฟบางเส้นสิ้นสุดเร็วกว่าเส้นอื่นเนื่องจากจุดที่เลยออกไปไม่ สอดคล้องกับกฏของการทรงมวล



## รูปที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเร็ว เหนี่ยวนำ a และ c

สัมประสิทธิ์กำลังมีค่าสูงสุดเมื่อค่า a เป็น 0 ซึ่งมีความหมายว่า ไม่มีใบพัดในท่อสตรีมณ.ตำแหน่งโรเตอร์1 ดังนั้นเมื่อแทนค่า *a* = 0 ในสมการ (26) จะได้

$$C_p = 4c(1-c)^2 + \left(\frac{16}{27}\right)c$$

หาค่า c เพื่อให้ได้ค่า  $C_{p \max}$ ได้สมการ  $c^2 - 1.3333c + 0.382716 = 0$ 

คำตอบที่ได้คือ c=0.418 และได้ค่า  $C_{_{p\,\mathrm{max}}}=0.814$  ซึ่งเป็นผล เดียวกันกับที่แสดงมาแล้วในรูปที่ 4

คำนวณค่า 
$$m = \frac{A_{1-Inner}}{A} = 0.58$$

รูปที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังงาน ( $C_p$ ) ที่ได้มาจากโรเตอร์1 และโรเตอร์2 ซึ่งพบว่าโรเตอร์2 ให้ค่า  $C_{p2}$  สูงสุดเมื่อค่า c เป็น 1/3 แต่ค่า  $C_p$  โดยรวมมีค่าเป็น 0.79 ตำแหน่งที่ค่า  $C_p$ รวมมี ค่าสูงสุดอยู่ที่ c = 0.418 และได้ค่า  $C_p$  โดยรวมเป็น 0.814 ซึ่งเป็น ผลจากโรเตอร์1 ให้ค่า  $C_{p1}$ สูงขึ้น อันเป็นผลสืบเนื่องจากพื้นที่ของท่อ สตรีม1 ที่ผ่านโรเตอร์1 ลดลง และพื้นที่ส่วนนอกของใบมีมากขึ้น



รูปที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากโรเตอร์1, 2 และผลรวม

### 4. อภิปรายผล

สมประสิทธิ์กำลังงานกังหันลมสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่า ผลการวิเคราะห์โดย Newman เหตุผลที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจาก โมเดลของ Newman ได้วางให้โรเตอร์ 2 ทำงานภายใต้เวก (Wake) ของโรเตอร์ 1 ซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปของการออกแบบกังหันลมชนิดที่มี สองโรเตอร์ งานวิจัยนี้ได้ใช้ประโยชน์จากรูปร่างของกังหันลมแบบ แกนเพลาในแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) ที่มีระยะห่าง ในแนวแกนระหว่างโรเตอร์ทั้ง 2 ดัว และมีการเปลี่ยนขนาดพื้นที่ของ ท่อสดรีม

#### 5. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการออกแบบกังหันลมชนิดที่มีสองโรเตอร์หมุนสวน ทางกันจากวิธีการออกแบบเดิม โดยให้โรเตอร์ตัวแรกมีลักษณะที่ ส่วนกลางเปิดเป็นช่องมีพื้นที่เป็น 58 % ของพื้นที่ของโรเตอร์ตัวที่สองที่ อยู่ข้างหลัง หรือคิดเป็นของเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิดเป็น 76.2 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ตัวที่สองที่อยู่ข้างหลัง ดังแสดงใน รปที่ 6 ตำแหน่งที่มีค่ารัศมีที่มากกว่าส่วนที่ช่องเปิดดังกล่าวได้รับ ออกแบบรูปร่างใบพัดโดยใช้ทฤษฎีของ Betz กล่าวคือให้ ความเร็วลม ในแนวแกนขณะผ่านโรเตอร์มีค่าเป็น 2/3 ของความเร็วลม ก้านของใบ ที่ผ่านช่องว่างได้รับการออกแบบให้รับแรงที่เกิดขึ้นจากใบและให้เกิดแรง ต้านอากาศมีค่าต่ำ โดยไม่ได้มีวัตถุประสงค์หลักที่จะทำหน้าที่เปลี่ยนรูป โรเตอร์ตัวที่สองได้รับการออกแบบให้ ความเร็วลมใน พลังงาน แนวแกนขณะผ่านกังหันลมมีค่าเป็น 0.582 ของความเร็วลม จากการ คำนวณทางทฤษฎีได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกังหันลมมีค่าเป็น 81.4 %

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Dr.Choon Tan จาก Gas Turbine Lab, MIT ที่ได้ให้ข้อคิดและข้อแนะนำในงานวิจัยนี้



งานวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- Betz, A ,1919, Schraubenpropeller mit Geringstem Energieverlust, Nach.der Kgl. Gesellschaft der Wiss. Zu Gottingen, Math.-Phys. Klasse, pp. 193-217.
- Newman B G ,1983, Actuator-Disc Theory for Vertical-axis Wind Turbine, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 15 pp 347-355.
- Newman B G ,1986, Multiple Actuator-Disc Theory for Wind Turbine, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 24 pp 215-225.
- Izumi Ushiyama, Toshihiko Shimota and Yukihiro Miura, 1996, An Experimental Study of the Two-staged Wind Turbines, Renewable Energy, Vol.9, Issue 1-4, pp 909-912.
- Sung Nam Jung, Tae-Soo No and Ki-Wahn Ryu, 2004, Aerodynamics Performance Prediction of a 30 kW Counterrotating Wind Turbine System, Renewable Energy, Vol.30 pp 631-644.
- Toshiaki Kanemoto and Ahmed Mohamed Galal,2006, Development of Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armatures, JSME International Journal, Series B, Vol.49, No.2, p.450-
- Shen,W Z , Zakkam,V A K , Sorensen, J N and Appa, K, 2007, Analysis of Counter-Rotating Wind Turbines, The Science of Making Torque from Wind, Journal of Physics: Conference Series 75 (2007)012003, 9 pages.