

แบบจำลองที่ได้จากการทดลองสำหรับกังหันลมแบบไจโรมิลล์ที่ใช้แพนอากาศชนิด

NACA0015 และ NACA4412

Empirical Model of Gyro-mill Wind Turbines of NACA0015 and NACA4412

ศักดิ์วิมล นันทะสี, กุลธิดา แก้วมณี, จุฑาวิชญ์ กลิ่นโลภัย, ศุภอัฐ เกียรติโสภณ, จันทิพย์ สุริวรรโณ, พีรดนัย ฉาโสง,
วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

*ติดต่อ: worapiro@gmail.com, 0818048996

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งที่ใช้แพนอากาศชนิด NACA0015 และ NACA4412 เป็นใบพัด จำนวน 3 ใบ โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะอาศัยข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านจากงานวิจัยที่ตีพิมพ์ไปแล้วในอดีต แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลที่เผยแพร่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น จึงต้องอาศัยเทคนิคในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวโดยอาศัยข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ จะทำการทดลองกังหันลมขนาดเล็ก เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ ซึ่งเป็นข้อมูลที่จำเป็นอย่างยิ่ง จากแบบจำลองดังกล่าวนี้ จะสามารถทำนายสมรรถนะของกังหันลมที่ใช้แพนอากาศชนิด NACA0015 และ NACA4412 ได้ โดยในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอโมเมนต์บิดและกำลังที่ได้จากใบพัดของกังหันลมแต่ละใบ สำหรับ NACA0015 และ NACA4412 รวมถึงโมเมนต์บิดและกำลังรวมจากกังหันลมดังกล่าว อีกทั้งยังนำเสนออิทธิพลของมุมปะทะที่มีต่อสมรรถนะของกังหันลมดังกล่าวอีกด้วย

คำหลัก: กังหันลม, แพนอากาศ, สมรรถนะของกังหันลม

Abstract

The present study investigated the mathematical model for performance of 3 blades gyro-mill wind turbines of two airfoil profiles of NACA0015 and NACA4412. The drag and lift coefficients for the mathematical model were obtained from published literature. Nevertheless, the experimental data depended on attack angle were limited. Then, the technique of approximation from published literature was used to determine those coefficients. Moreover, in this research, the correlations between revolution of turbines and wind velocity were investigated experimentally. From the mathematical model, the performances of 3 blades gyro-mill wind turbines of NACA0015 and NACA4412 could be evaluated theoretically. In this research, the torque and the power of a blade of NACA0015 and NACA4412 were presented. The total torque and the total power were also presented. Moreover, the effect of angle of attack was investigated.

Keywords: Airfoil, Gyro-mill wind turbine, Performance of wind turbine

TSF-40

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ความต้องการพลังงานของมนุษย์เพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยพลังงานกว่าร้อยละ 80 เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน อีกทั้ง ปริมาณพลังงานดังกล่าวก็ลดน้อยลงอยู่เรื่อยๆ ดังนั้น จึงมีความพยายามที่จะค้นคว้าและพัฒนาเพื่อสรรหาพลังงานที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิล เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม พลังงานจากคลื่นทะเล เป็นต้น โดยกังหันลมเป็นเครื่องจักรกลประเภทหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ อีกทั้งในปัจจุบัน ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่สนับสนุนให้ใช้พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทน โดยคาดการณ์ว่า การใช้พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนจะมีศักยภาพประมาณ 1,600 เมกะวัตต์ และได้บรรจุอยู่ในแผนพลังงานทดแทน 15 ปี พ.ศ. 2551-2565 ของกระทรวงพลังงาน

กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยในแนวตั้ง (Vertical-axis type wind turbine, VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของลม ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทางและสามารถติดตั้งบริเวณพื้นด้านล่างได้ โดยตัวเสาของกังหันลมยังไม่จำเป็นที่จะต้องอยู่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพต่ำ เมื่อเทียบกับกังหันลมที่มีแกนเพลาลอยแบบแกนนอน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้งานอยู่น้อย

ในปี พ.ศ. 2555 ชนะชาติและคณะ [1] ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งที่ใช้แพนอากาศชนิด NACA0015 เป็นใบพัดจำนวน 3 ใบ โดยชนะชาติและคณะ [1] ได้อาศัยข้อมูลจากงานวิจัยในหลายๆ บทความ [2-5] ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำนายสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่มุมของการหมุนต่างๆ กัน อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนไปพอสมควร อีกทั้งแบบจำลองดังกล่าวนี้ ก็ไม่สามารถประยุกต์ใช้กับแพนอากาศชนิดไม่สมมาตรได้อีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2556 Deshpande and Li [6] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายสมรรถนะของกังหันลมที่ใช้แพนอากาศชนิดต่างๆ เป็นใบพัด โดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ในการแก้สมการ

อนุพันธ์ที่อธิบายปรากฏการณ์การไหลของอากาศผ่านแพนอากาศชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของ Deshpande and Li [6] อาศัยเพียงข้อมูลในเชิงทฤษฎี โดยไม่ได้อาศัยข้อมูลจากการทดลองแต่อย่างใด

ในปี พ.ศ. 2557 ศุภอัฐและคณะ [7] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อจากชนะชาติและคณะ [1] โดยอาศัยข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการทดลองที่ดีพิมพ์ไปแล้วในอดีตในการคำนวณสมรรถนะของกังหันลม แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลสำหรับสัมประสิทธิ์ดังกล่าว จำกัอยู่ที่แค่มุมปะทะช่วงหนึ่งเท่านั้น ดังนั้น ศุภอัฐและคณะ [7] จึงใช้วิธีซอร์สและวอร์เทกซ์พานในการทำนาย สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านในบางช่วง รวมถึงอาศัยคำแนะนำจากงานวิจัยในอดีตเข้าร่วมด้วย

อย่างไรก็ตาม จากการสืบค้นข้อมูลจากฐานข้อมูลงานวิจัยในอดีต ยังไม่พบว่า มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยใด ที่สามารถใช้ทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งที่ใช้แพนอากาศเป็นใบพัดได้อย่างแม่นยำ

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งที่ใช้แพนอากาศทั้งชนิดสมมาตร คือ NACA0015 และชนิดไม่สมมาตร คือ NACA4412 เป็นใบพัดสำหรับขับเคลื่อน โดยเน้นอาศัยการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ ควบคู่ไปกับการสืบค้นข้อมูลจากการทดลองให้มากที่สุด

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งที่ใช้แพนอากาศเป็นใบพัด จำนวน 3 ใบ

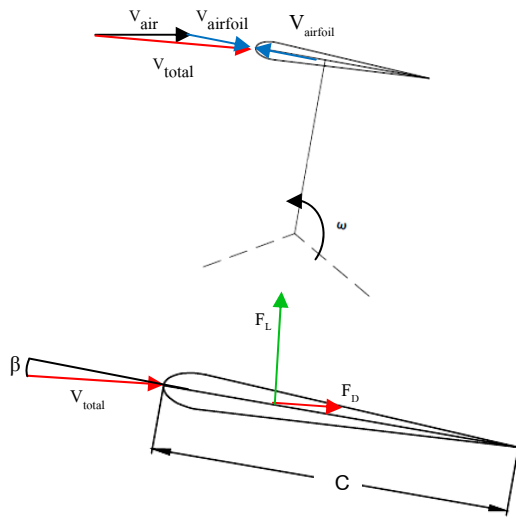
2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะของแพนอากาศชนิดชนิดสมมาตร คือ NACA0015 และชนิดไม่สมมาตร NACA4412 มีต่อสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้ง

2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วลม ความเร็วรอบของกังหัน มุมปะทะระหว่างอากาศกับแพนอากาศที่ใช้เป็นใบพัด ที่มีต่อสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้ง

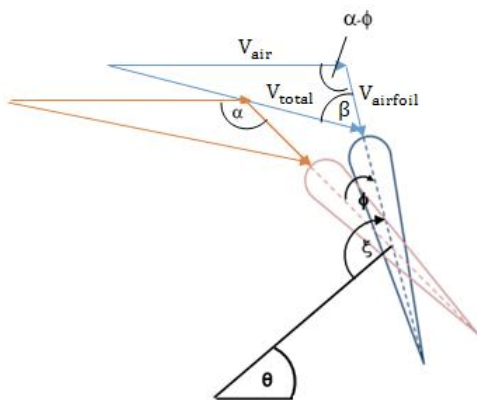
TSF-40

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งที่ใช้แพนอากาศเป็นใบพัดนั้น จะเริ่มจากการพิจารณาแรงที่อากาศกระทำกับแพนอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1



(1.1) แพนอากาศทำมุม 0 องศา



(1.2) แพนอากาศทำมุม ϕ องศา
รูปที่ 1 แรงที่อากาศกระทำกับแพนอากาศ

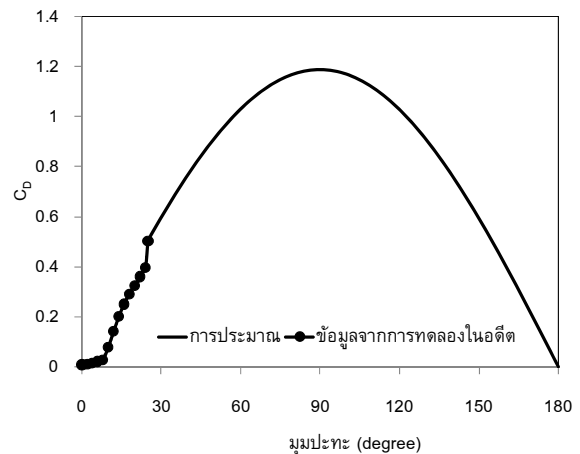
จากรูปที่ 1.1 กังหันลมหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ทำให้แพนอากาศมีความเร็วเท่ากับ $V_{airfoil}$ ในขณะที่อากาศไหลด้วยความเร็ว V_{air} ทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ที่อากาศไหลเข้าปะทะกับกังหันลมมีค่าเท่ากับ V_{total} โดยความเร็วดังกล่าวนี้จะก่อให้เกิดแรงต้าน F_D ซึ่งมีทิศทางอยู่ในแนวเดียวกันกับ V_{total} และก่อให้เกิดแรงยก F_L ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับ V_{total} โดยขนาดของแรงทั้งสอง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_L = 0.5 C_L \times C \times L \times \rho \times V_{total}^2 \quad (1)$$

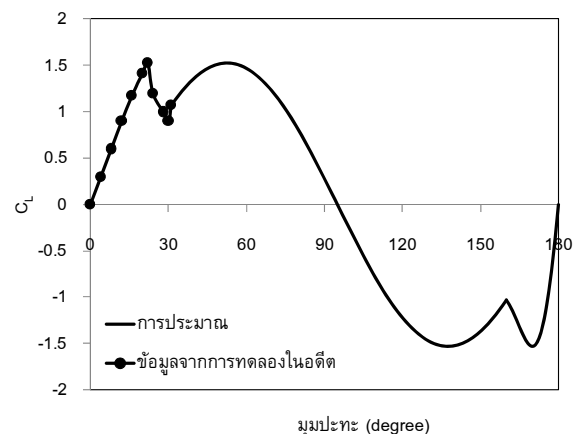
$$F_D = 0.5 C_D \times C \times L \times \rho \times V_{total}^2 \quad (2)$$

เมื่อ C_L และ C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน ตามลำดับ โดยสามารถหาได้จากข้อมูลของ Jacobs et al. [8]

จากรูปที่ 1.2 เมื่อกังหันเอียงตัวไปเป็นมุม ϕ จะทำให้มุมปะทะของอากาศกับกังหันหรือมุม β เปลี่ยนไป โดยมุม ϕ อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ การเปลี่ยนแปลงมุมดังกล่าวนี้ จะมีผลต่อสมรรถนะของกังหันลมโดยตรง เนื่องจาก โมเมนต์บิดและกำลังที่ได้ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เนื่องจาก C_L และ C_D เปลี่ยนแปลงไปตามมุมปะทะหรือมุม β ที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง



(2.1) C_D สำหรับ NACA0015



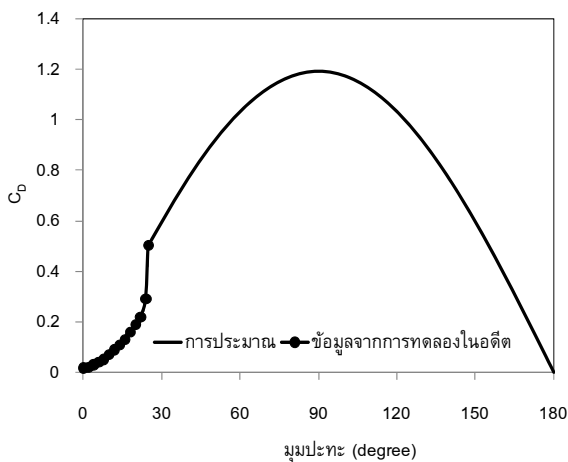
(2.2) C_L สำหรับ NACA0015

รูปที่ 2 C_D และ C_L สำหรับ NACA0015

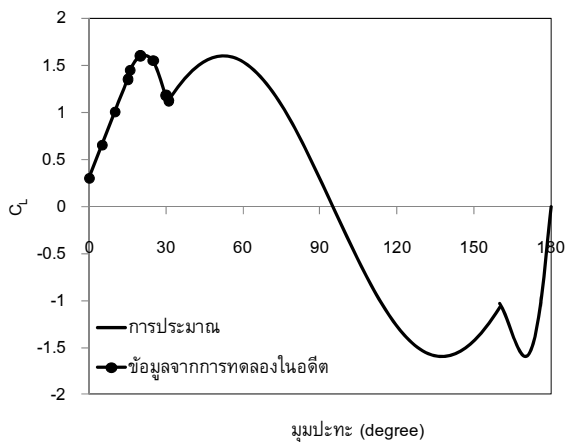
TSF-40

นอกจากนี้ C_L และ C_D ที่สืบค้นได้จากงานวิจัยดังกล่าว นั้น จะถูกแสดงสำหรับมุมปะทะ (β) เพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น

ในปี ค.ศ. 2006, Claessens [9] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับสมรรถนะของแพนอากาศที่มุมปะทะต่างๆ โดยในงานวิจัยของ Claessens [9] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มุมปะทะต่างๆ โดยจะพบว่า ลักษณะกราฟของแพนอากาศแบบสมมาตรชนิดต่างๆ จะคล้ายคลึงกัน และลักษณะกราฟของแพนอากาศแบบไม่สมมาตรชนิดต่างๆ ก็จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันเช่นกัน ซึ่งเมื่ออาศัยข้อมูลดังกล่าว จะสามารถทำนาย C_D และ C_L สำหรับ NACA0015 และ NACA4412 ได้ดังรูปที่ 2 และ 3



(3.1) C_D สำหรับ NACA4412



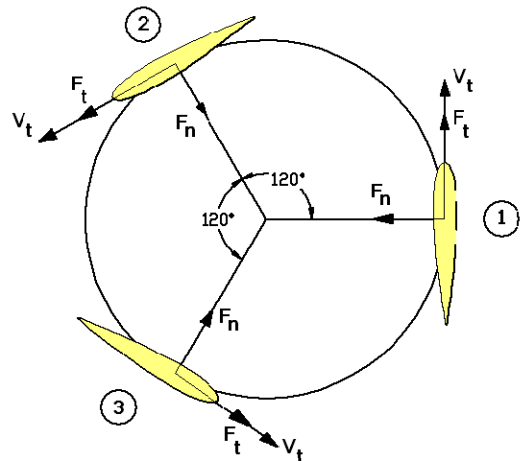
(3.2) C_L สำหรับ NACA4412

รูปที่ 3 C_D และ C_L สำหรับ NACA4412

เพราะฉะนั้น จากรูปที่ 1 แรงในแนวสัมผัส (F_t) และแรงในแนวรัศมี (F_n) สามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

$$F_t = F_L \sin \beta - F_D \cos \beta \quad (3)$$

$$F_n = -F_L \cos \beta - F_D \sin \beta \quad (4)$$



รูปที่ 4 กังหันลมที่ใช้แพนอากาศ 3 ใบพัด

โมเมนต์บิดและกำลังของแพนอากาศ 1 ใบพัด สามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

$$T = F_t \times r \quad (5)$$

$$Power = T \times \omega = \int \frac{F_t \times r}{t} d\theta \quad (6)$$

อย่างไรก็ตาม ในการเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณนั้น มุมที่หมุนไป หรือ θ ที่แตกต่างกัน ก็จะทำให้ลักษณะสามเหลี่ยมความเร็วในรูปที่ 1.1 เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งก็จะทำให้ได้สมการในการคำนวณความเร็ว (V_{total}), มุมปะทะ (β), แรงในแนวสัมผัส ที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงต้องแยกการพิจารณาการหมุนของกังหันออกเป็น 4 ช่วง แล้วจึงสร้างสมการสำหรับหา V_{total} , β และ F_t แต่ละช่วงนั้น นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงยกจากรูปที่ 2 และ 3 ก็จะต้องถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการโดยอาศัยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซลอีกด้วย

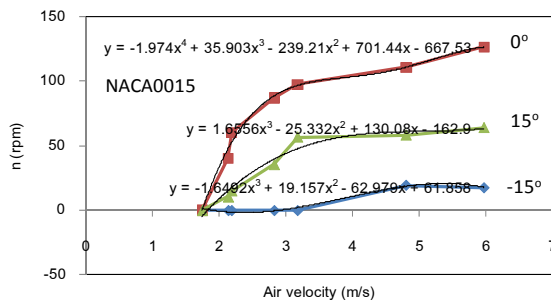
TSF-40

4. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ จะสร้างกังหันลมแกนตั้งที่ใช้แพนอากาศเป็นใบพัดจำนวน 3 ใบ ดังรูปที่ 4 โดยใบพัดแต่ละใบ มีขนาดคอร์ดเท่ากับ 30 cm และมีความสูง 60 cm ระยะรัศมีจากแกนเพลากับ 60 cm จากนั้นจะนำกังหันที่ได้ไปทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4 กังหันลมที่ใช้ทดสอบ



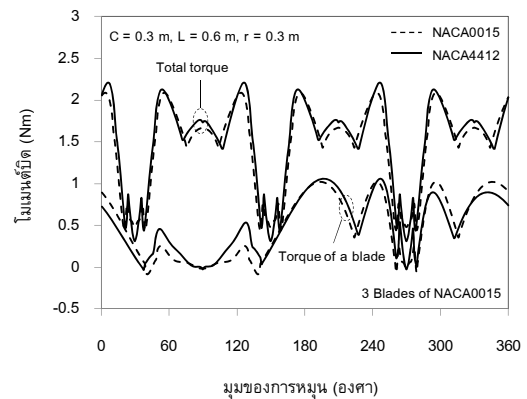
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง n และ V_{air}

รูปที่ 5 แสดงส่วนหนึ่งของผลลัพธ์ที่ได้ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ สำหรับ NACA0015 ซึ่งจากรูปจะสามารถสร้างสมการสำหรับทำนายความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ ได้

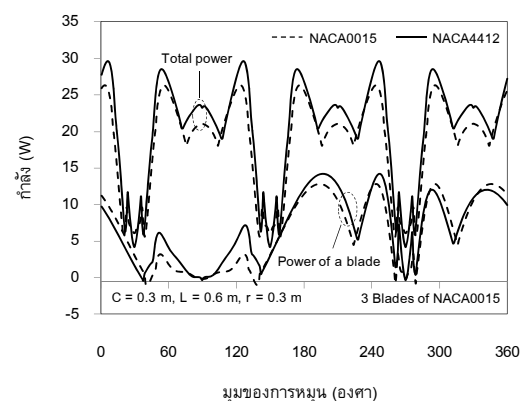
อย่างไรก็ตาม ความเร็วรอบของกังหันลมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น การหล่อลื่นที่จุดรองรับ เป็นต้น ซึ่งถ้าหากใช้งานไปนานๆ จะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้น และทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเร็วรอบกับความเร็วลมคลาดเคลื่อนไปจากสมการดังกล่าว

จากรูปที่ 6-11 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม โดยรูปที่ 6 แสดงโมเมนต์บิดของใบพัด 1 ใบ และโมเมนต์บิดที่ได้จากกังหัน (ใบพัด 3 ใบ) ที่มุมของการหมุน (θ) ต่างๆ ที่ความเร็วลม 5.45 m/s โดยจะพบว่า ลักษณะของโมเมนต์บิดที่ได้สำหรับ NACA0015 และ NACA4412 จะมีความคล้ายคลึงกันมาก โดยสำหรับกังหันลมที่ใช้ NACA0015 จำนวน 3 ใบ จะมีโมเมนต์บิดเฉลี่ยเท่ากับ 1.4634 Nm ส่วนกังหันลมที่ใช้ NACA4412 จำนวน 3 ใบ จะมีโมเมนต์บิดเฉลี่ย 1.5212 Nm



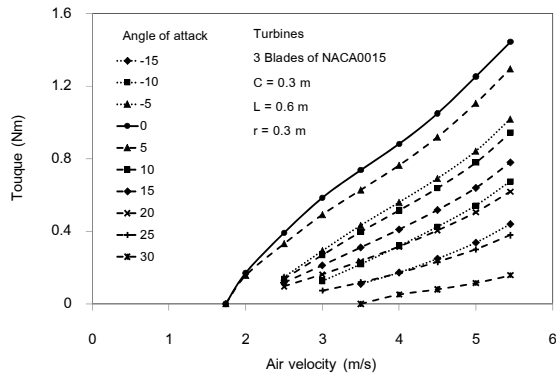
รูปที่ 6 โมเมนต์บิดที่มุมของการหมุนต่างๆ



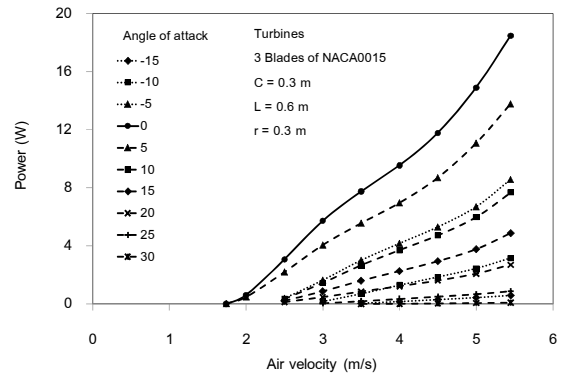
รูปที่ 7 กำลังที่มุมของการหมุนต่างๆ

รูปที่ 7 แสดงกำลังที่ได้จากใบพัด 1 ใบ และกำลังที่ได้จากกังหัน (ใบพัด 3 ใบ) ที่มุมของการหมุน (θ) ต่างๆ ที่ความเร็วลม 5.45 m/s โดยสำหรับกังหันลมที่ใช้ NACA0015 จำนวน 3 ใบ จะมีกำลังเฉลี่ยเท่ากับ 18.4771 W ส่วนกังหันลมที่ใช้ NACA4412 จำนวน 3 ใบ จะมีกำลังเฉลี่ย 20.4128 W

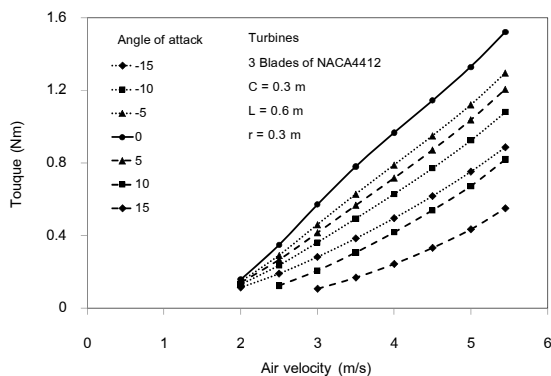
TSF-40



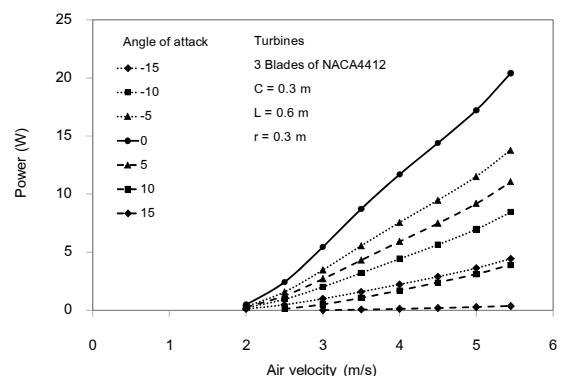
รูปที่ 8 โมเมนต์บิดเฉลี่ยที่ความเร็วลมต่างๆ
สำหรับ NACA0015



รูปที่ 10 กำลังที่ความเร็วลมต่างๆ
สำหรับ NACA0015



รูปที่ 9 โมเมนต์บิดเฉลี่ยที่ความเร็วลมต่างๆ
สำหรับ NACA4412



รูปที่ 11 กำลังที่ความเร็วลมต่างๆ
สำหรับ NACA4412

รูปที่ 8 และ รูปที่ 9 แสดงโมเมนต์ที่ได้จากกังหันลมที่ใช้แพนอากาศ NACA0015 และ NACA4412 ตามลำดับ โดยจากรูปจะพบว่า NACA4412 จะให้โมเมนต์บิดที่มากกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ สำหรับ NACA0015 เมื่อมุม ϕ มีค่าน้อยกว่า -15 องศา หรือมากกว่า 30 องศาแล้ว กังหันจะหมุนที่ความเร็ว 4.5 m/s ขึ้นไปเท่านั้น และการหมุนก็จะเริ่มไม่สม่ำเสมอขึ้นเรื่อยๆ ตามมุม ϕ ที่ลดลงหรือเพิ่มมากขึ้น สำหรับ NACA4412 เมื่อมุม ϕ มีค่าน้อยกว่า -25 องศา หรือมากกว่า 20 องศาแล้ว กังหันจะหมุนที่ความเร็ว 4.5 m/s ขึ้นไปเท่านั้น และการหมุนก็จะเริ่มไม่สม่ำเสมอขึ้นเรื่อยๆ ตามมุม ϕ ที่ลดลงหรือเพิ่มมากขึ้น

ในรูปที่ 10 และ 11 แสดงกำลังที่ได้จากกังหันลมที่ใช้แพนอากาศ NACA0015 และ NACA4412 ตามลำดับ โดยจากการทดสอบกังหันลมที่สร้างขึ้น จะพบว่า กังหันลมทั้งสองชนิดจะสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตนเอง โดยไม่ต้องอาศัยแรงอื่นๆ เข้าช่วย โดยเฉพาะที่มุม ϕ เท่ากับศูนย์ กังหันจะหมุนได้เร็วที่สุด ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5

จากรูป จะพบว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น กังหันจะผลิตกำลังได้มากขึ้นตามไปด้วย โดยที่มุม ϕ เท่ากับศูนย์ กังหันจะกำลังมากที่สุด โดยกังหันลมที่ใช้แพนอากาศทั้ง 3 ใบเป็น NACA0015 จะให้กำลัง 18.4771 W ส่วนกังหันลมที่ใช้แพนอากาศทั้ง 3 ใบเป็น NACA4412 จำนวน 3 ใบ จะมีกำลังเฉลี่ย 20.4128 W แต่ถ้าใช้มุม ϕ ที่เปลี่ยนไป กำลังที่ได้จะลดลงอย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบกังหันลมที่ถูกสร้างขึ้นด้วยขนาดและมีสภาวะการทำงานดังกล่าวนี้ พบว่า กังหันลมที่ใช้ใบพัด NACA0015 จะให้กำลังไฟฟ้าเพียง 3.04 W ในขณะที่กังหันลมที่ใช้ใบพัด NACA4412 จะให้กำลังไฟฟ้า 3.74 W ซึ่งมีค่าเป็น 16.45% และ 18.32% ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องมาจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่ได้คำนึงถึงการทับซ้อนหรือการบังทิศทางลมระหว่างใบพัดทั้งสามใบพัด ดังนั้น แบบจำลองดังกล่าวนี้ จะให้ค่าโมเมนต์บิดและกำลังสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องอีก เช่น จูตรองรับ เป็นต้น

TSF-40

5. สรุป

5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งอาศัยข้อมูลจากการทดลองเป็นสำคัญ สามารถทำนายสมรรถนะของกังหันลมขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 กังหันลมที่ใช้แพนอากาศชนิด NACA0015 และ NACA4412 จะให้โมเมนต์บิดและกำลังดีที่สุด เมื่อทำมุม 0 องศา กับแนวสัมผัส โดยโมเมนต์บิดและกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้ามุมดังกล่าวมีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้น

5.3 กังหันลมที่ใช้แพนอากาศชนิด NACA4412 จะให้โมเมนต์บิดและกำลังมากกว่ากังหันลมที่ใช้ แพนอากาศชนิด NACA0015

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ จนสามารถพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาได้

7. รายการสัญลักษณ์

C	ระยะคอรัด์ (m)
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
F_D	แรงต้าน (N)
F_L	แรงยก (N)
F_n, F_r	แรงในแนวตั้งฉากกับเส้นทางการหมุน (N)
F_t, F_θ	แรงในแนวเส้นทางการหมุน (N)
L	ความยาวของแพนอากาศ (m)
r	ระยะในแนวรัศมี (m)
v_{air}	ความเร็วของลม ($m\ s^{-1}$)
$v_{airfoil}$	ความเร็วของแพนอากาศ ($m\ s^{-1}$)
v_{total}	ความเร็วสัมพัทธ์ที่ลมไหลเข้าปะทะกับแพนอากาศ ($m\ s^{-1}$)
θ	มุมระหว่าง v_{total} กับแนวการเคลื่อนที่ของแพนอากาศ
ρ	ความหนาแน่น ($kg\ m^{-3}$)

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนะชาติ คำวาระ, ชัยทัต โพธิ์พล, ขจรศักดิ์ ศรีทอง, วิภาวี สุวรรณกนก, อิศระ วิภาตะวานิช, ปฏิภาณ ยืนยง, วีรภัทร์ มัลลิกษณะชาลี, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี, การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับสมรรถนะของกังหันลมแบบโจโรมิลล์ที่ใช้แพนอากาศชนิดสมมาตร, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม 2556, มหาวิทยาลัยบูรพา, จังหวัดชลบุรี.
- [2] Manwell, J.F., McGowen, J.G., Rogers, A.L., 2002, USA wind energy explained theory: design and application, University of Massachusetts.
- [3] Kuethe, A.M., Chow, C.Y., Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design, 5th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York (NY), USA.
- [4] McAlister, K.W., Takahashi, R.K., NACA 0015 Wing Pressure and Trailing Vortex Measurements, <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19920001763.pdf>, February, 2013.
- [5] กิจจา ภัทรทิพากร, ณัฐวุฒิ ม่วงศรีจันทร์, ณัฐวุฒิ วิทยานุกรณ์, วีระชาติ ไทยเสถียร, ธนกฤต กิจแสงภักดี, นฤรงค์ โตอัจฉริยะวงศ์, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี, วิชีซอร์สและเวอร์เทกพาเนลสำหรับการไหลศักย์อัดตัวไม่ได้ผ่านวัตถุ 2 มิติ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม 2556, มหาวิทยาลัยบูรพา, จังหวัดชลบุรี.
- [6] Deshpande, P., Li, X., 2013, Numerical study of Giromill-Type Wind Turbines with Symmetrical and Non-symmetrical airfoils, European International Journal of Science and Technology 2(8).
- [7] สุภอัฐ เกียรติโสภณ, ชนะชาติ คำวาระ, ปฏิภาณ ยืนยง, วีรภัทร์ มัลลิกษณะชาลี, กุลธิดา แก้วมณี, จุฑาวิชญ์ กลิ่นโลภัย, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายสมรรถนะของกังหันลมแบบโจโรมิลล์ที่ใช้แพน

TSF-40

อากาศชนิดสมมาตรและชนิดไม่สมมาตร,
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง
ประเทศไทย ครั้งที่ 28, 15-17 ตุลาคม 2557,
โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น, ขอนแก่น.

- [8] Jacobs, E.N., Ward, K.E., Pinkerton, R.M., 1933,
The characteristics of 78 related airfoil sections
from tests in the variable-density wind tunnel,
T.R. No. 460, N.A.C.A.
- [9] Claessens, M.C., 2006, The design and testing
of airfoils for application in small vertical
axis wind turbines, Master of science thesis,
Faculty of aerospace engineering, Delft
university of technology.