TSF-196

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสมรรถนะของกังหันลมแบบไจโรมิลล์ที่ใช้แพนอากาศชนิดสมมาตรและชนิดไม่สมมาตร

Mathematical Model for Performances of a Gyro-mill Wind Turbine with Symmetrical and Non-Symmetrical Airfoils

ศุภอัฐ เกียรติโสภณ, ชนะชาติ คำวีระ, ปฏิภาณ ยืนยง, วีรภัทร์ มาลัยกฤษณะชาลี, กุลธิดา แก้วมณี, จุฑาวิชญ์ กลิ่นโลกัย และวรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดิ์*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131
*ติดต่อ: worapiro@gmail.com, 0818048996

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนดิ่งที่ใช้แพนอากาศชนิดสมมาตร NACA0006, NACA0012, NACA0015, NACA0025 และแพนอากาศชนิดไม่สมมาตร NACA2312, NACA2412, NACA4318, NACA4412, NACA4415, NACA4518 เป็นใบพัด จำนวน 3 ใบ โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะอาศัยข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงต้านและแรงยกจากงานวิจัยที่ตีพิมพ์ไปแล้วในอดีต แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลที่เผยแพร่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น จึงต้องอาศัยเทคนิคในการประมาณซึ่งถูกนำเสนอในงานวิจัยในอดีตเช่นกัน จากแบบจำลองที่ได้ จะทำให้สามารถทำนายแรงที่ใช้ฉุดกังหันให้หมุน โมเมนต์บิด และกำลังที่ได้รับจากกังหันได้ นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ ยังได้ศึกษาถึง อิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อสมรรถนะของกังหันอีกด้วย

คำหลัก: กังหันลม, แพนอากาศ, สมรรถนะของกังหันลม

Abstract

The present study investigated the mathematical model for performance of gyro-mill wind turbine with four symmetrical airfoils of NACA0006, NACA0012, NACA0015, NACA0025 and six non-symmetrical airfoils of NACA2312, NACA2412, NACA4318, NACA4412, NACA4415, NACA4518. The drag and lift coefficients that were the needed data were obtained from published literature. Nevertheless, the experimental data depended on attack angle were limited. Then, the technique of approximation from published literature was applied. From the mathematical model, the tangential force, torque and power were investigated and presented. Moreover, the effect of wind velocity was also studied.

Keywords: airfoil, gyro-mill wind turbine, performance of wind turbine

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ความต้องการพลังงานของมนุษย์เพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยพลังงานกว่าร้อยละ 80 เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน อีกทั้ง ปริมาณพลังงานดังกล่าวก็ลดน้อยลงอยู่เรื่อยๆ ดังนั้น ในหลายๆ องค์กรจึงมีความพยายามที่จะค้นคว้าและพัฒนาเพื่อสรรหาพลังงานที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิล เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานคลื่นทะเล พลังงานน้ำ พลังงานใต้พิภพ พลังงานชีวมวล พลังงานเซลเชื้อเพลิง พลังงานสาหร่าย เป็นต้น กังหันลมเป็นเครื่องจักรกลประเภทหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่สนับสนุนให้ใช้พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทน โดยคาดการณ์ว่าการใช้พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนจะมีศักยภาพประมาณ 1,600 เมกะวัตต์ และได้บรรจุอยู่ในแผนพลังงานทดแทน 15 ปี พ.ศ. 2551-2565 ของกระทรวงพลังงาน โดยกำหนดการใช้พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้าจากในปีเริ่มโครงการ 1 เมกะวัตต์ เป็น 800 เมกะวัตต์เมื่อสิ้นสุดอายุโครงการ พลังงานลมที่ใช้เป็นพลังงานทดแทนสำหรับการผลิตไฟฟ้านี้ ถูกกำหนดให้มีปริมาณพลังงานมากกว่าที่ได้จากพลังงานน้ำ ที่เมื่อสิ้นสุดโครงการจะมีเพียง 324 เมกะวัตต์ [1,2]

กังหันลมที่มีแกนเพลาอยู่ในแนวตั้ง (Vertical-Axis Type Wind Turbine ,VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของลม ซึ่งมีข้อดีคือสามารถรับลมได้ทุกทิศทางและสามารถติดตั้งอยู่ที่พื้นด้านล่างได้ นอกจากนี้ ตัวเสาของกันหันลมยังไม่จำเป็นที่จะต้องอยู่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพต่ำ เมื่อเทียบกับกังหันลมที่มีแกนเพลาแบบแกนนอน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้งานอยู่น้อย

ในปี พ.ศ. 2555 ชนะชาติและคณะ [3] ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนดิ่งที่ใช้แพนอากาศชนิด NACA0015 เป็นใบพัดจำนวน 3 ใบ โดยชนะชาติและคณะ [3] ได้อาศัยข้อมูลจากงานวิจัยในหลายๆ บทความ [4-7] ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำนายสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่มุมของการหมุนต่างๆ กัน อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนไปพอสมควร อีกทั้งแบบจำลองดังกล่าวนี้ ก็ไม่สามารถประยุกต์ใช้กับแพนอากาศชนิดไม่สมมาตรได้อีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2556 Deshpande and Li [8] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายสมรรถนะของกังหันลมที่ใช้แพนอากาศชนิดต่างๆ เป็นใบพัด โดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ในการแก้สมการอนุพันธ์ที่อธิบายปรากฏการณ์การไหลของอากาศผ่านแพนอากาศชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของ Deshpande and Li [8] ไม่ได้อาศัยข้อมูลจากการทดลองแต่อย่างใด

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนดิ่งที่ใช้แพนอากาศทั้งชนิดสมมาตรและไม่สมมาตร เป็นใบพัดสำหรับขับเคลื่อน

2. วัตถุประสงค์

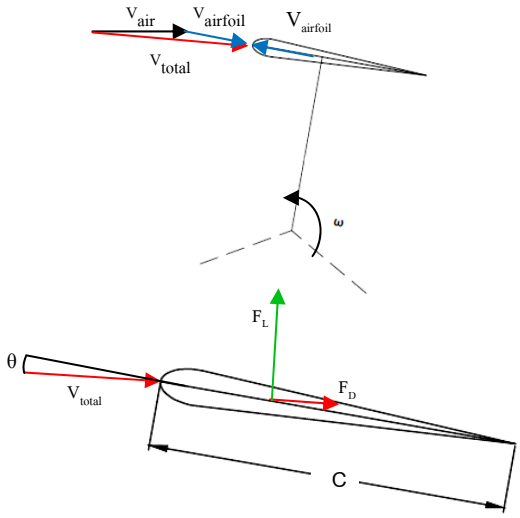
2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนดิ่งที่ใช้ใบพัดเป็นแพนอากาศ จำนวน 3 ใบ

2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะของแพนอากาศชนิดต่างๆ ได้แก่ NACA0006, NACA0012, NACA0015, NACA0025, NACA2312, NACA2412, NACA4318, NACA4412, NACA4415, NACA4518 ที่มีต่อสมรรถนะของกังหันลม

2.3 เพื่อศึกษาอิทธิผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของกังหันลม

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนดิ่งที่ใช้แพนอากาศเป็นใบพัดนั้น จะเริ่มจากการพิจารณาแรงที่อากาศกระทำกับแพนอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แรงที่อากาศกระทำกับแพนอากาศ

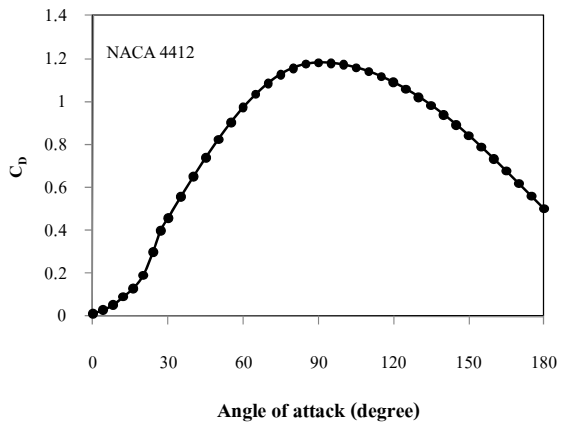
จากรูปที่ 1 กังหันลมหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ทำให้แพนอากาศมีความเร็วเท่ากับ $V_{airfoil}$ ในขณะที่อากาศไหลด้วยความเร็ว V_{air} ทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ที่อากาศไหลเข้าปะทะกับกังหันลมมีค่าเท่ากับ V_{total} นอกจากนี้ ความเร็วดังกล่าวนี้ ก่อให้เกิดแรงยก F_L ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับ V_{total} และ แรงต้าน F_D ซึ่งมีทิศทางอยู่ในแนวเดียวกันกับ V_{total} โดยแรงยกและแรงต้านที่อากาศกระทำต่อแพนอากาศ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{F_L}{l} = C_L \times 0.5 \times \rho \times V_{total}^2 \times c \qquad (1)$$

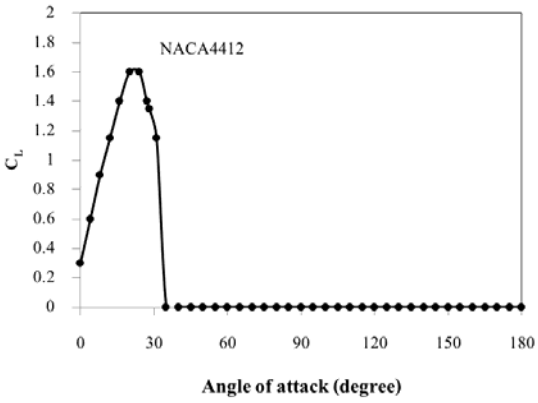
$$\frac{F_D}{l} = C_d \times 0.5 \times \rho \times V_{total}^2 \times c \qquad (2)$$

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

อย่างไรก็ตาม C_L และ C_D ที่สืบค้นได้จากฐานข้อมูลงานวิจัยนั้น จะถูกแสดงสำหรับมุมปะทะ (θ) เพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น โดย NASA [9] ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า เมื่อ θ มีค่ามากขึ้น ก็จะเกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณส่วนท้ายของแพนอากาศมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้แพนอากาศสูญเสียเสถียรภาพ โดยการทดลองเพื่อหาค่า C_L และ C_D ของแพนอากาศที่อยู่ในสภาพนี้ จะทำได้ยากมาก และโดยปกติแล้วแพนอากาศจะไม่ได้ถูกใช้งานในช่วงดังกล่าวนี้ จึงไม่ปรากฏข้อมูล C_L และ C_D สำหรับแพนอากาศที่อยู่ในสภาพดังกล่าว อย่างไรก็ตาม NASA [9] ได้ให้คำแนะนำไว้ว่า แนวโน้มของ C_D สำหรับแพนอากาศที่อยู่ในสภาพดังกล่าว จะมีลักษณะเป็นกราฟไซน์ (Sine) เพราะฉะนั้น C_D จะถูกคำนวณตามสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2 การสร้างกราฟ C_D สำหรับ NACA4412



รูปที่ 3 การสร้างกราฟ C_L สำหรับ NACA4412

- สำหรับ $\theta \leq 90^\circ$

$$C_{D,\theta} = C_{D,end} + \left\{ \sin\left[(\theta - \theta_{end}) \times \left(\frac{90^\circ}{90^\circ - \theta_{end}}\right)\right] \times (C_{D,90^\circ} - C_{D,end}) \right\} \quad (3)$$

- สำหรับ $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$

$$C_{D,\theta} = C_{D,180^\circ} + \left[(C_{D,90^\circ} - C_{D,180^\circ}) \times \sin\theta\right] \quad (4)$$

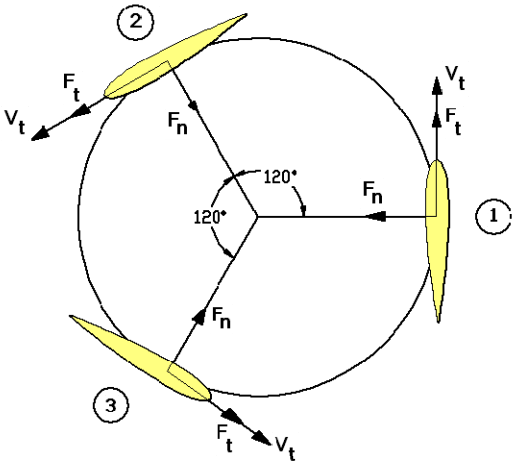
โดยที่ $C_{D,end}$ คือ C_D ของแพนอากาศที่มี θ มากที่สุดที่สามารถสืบค้นได้จากฐานข้อมูล จากรูปที่ 2 และ 3 เป็นตัวอย่างของการสร้างกราฟ C_D และ C_L โดยอาศัยสมการที่ 3 และ 4 เพื่อใช้ในการคำนวณหา F_D และ F_L ตามลำดับ

นอกจากนี้ สำหรับสมการที่สำคัญบางส่วน ที่ใช้ในการคำนวณสมรรถนะของกังหันลมนั้น สามารถแสดงได้ ดังต่อไปนี้

- แรงในแนวแกน normal และ tangent สามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

$$F_t = F_L \sin\theta - F_D \cos\theta \quad (5)$$

$$F_n = -F_L \cos\theta - F_D \sin\theta \quad (6)$$



รูปที่ 4 กังหันลมที่ใช้แพนอากาศ 3 ใบพัด

- โมเมนต์บิดและกำลังของแพนอากาศ 1 ใบพัด สามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

$$T = F_t \times r \quad (7)$$

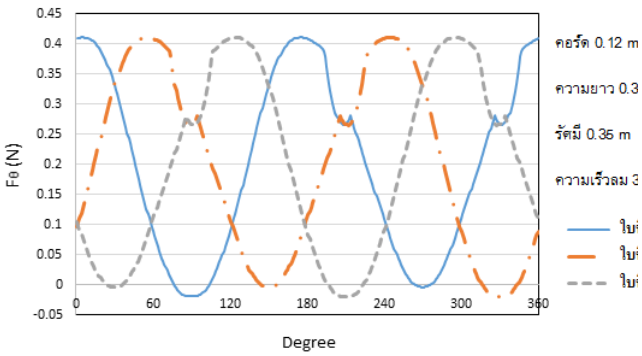
$$P = \frac{2\pi T n}{60} \quad (8)$$

โดยในการศึกษาครั้งนี้ กังหันลมจะประกอบไปด้วยใบพัด 3 ใบ ซึ่งใช้แพนอากาศชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4

4. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

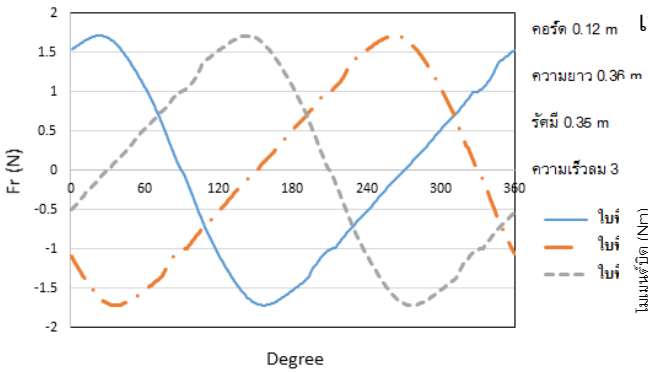
จากรูปที่ 5 จะพบว่า แรงในแนวการเคลื่อนที่ของแพนอากาศ NACA0015 จะมีลักษณะคล้ายกราฟไซน์ โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -0.02 ถึง 0.41 N ซึ่งเป็นผลมาจากแรงยกและแรงต้านที่เกิดขึ้นที่มุมปะทะที่แตกต่างกันนั่นเอง นอกจากนี้ แรงในแนวการเคลื่อนที่สำหรับใบพัดที่ 2 และ 3 ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแรงในแนวการเคลื่อนที่สำหรับใบพัดที่ 1 แต่มีเฟสที่แตกต่างกันอยู่ 240 และ 120 องศา ตามลำดับ

TSF-196



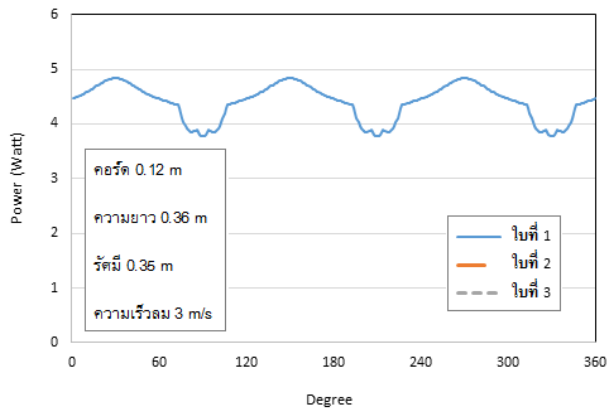
รูปที่ 5 แรงในแนวการเคลื่อนที่ของ NACA0015

จากรูปที่ 6 จะแสดงแรงในแนวรัศมีสำหรับ NACA0015 ทั้ง 3 ใบพัด โดยจะพบว่า แรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.7 ถึง 1.7 N



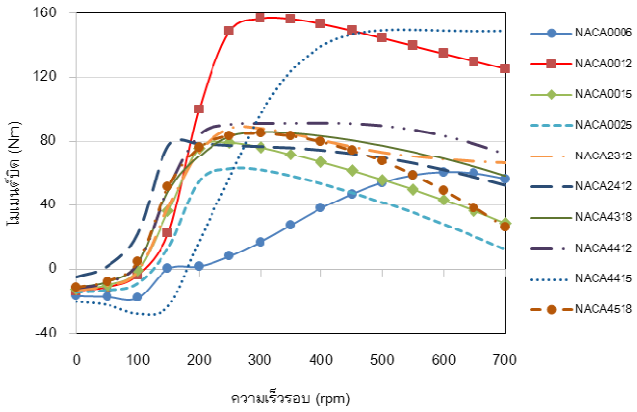
รูปที่ 6 แรงในแนวรัศมีของ NACA0015

จากรูปที่ 7 ซึ่งแสดงกำลังที่ได้จากกังหันลมที่ใช้ NACA0015 จะพบว่า กำลังที่ได้จากกังหันลมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.8 ถึง 4.9 วัตต์ โดยกำลังที่ได้จะค่อนข้างมีค่าคงที่ ทั้งนี้ เนื่องมาจาก แรงในแนวการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 5 ของใบพัดแต่ละใบ จะช่วยเสริมแรงในช่วงที่ขาดหายไปของใบพัดอื่นๆ จึงทำให้โมเมนต์บิดและกำลังที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างคงที่นั่นเอง



รูปที่ 7 กำลังที่ได้จากกังหันลมที่ใช้ NACA0015

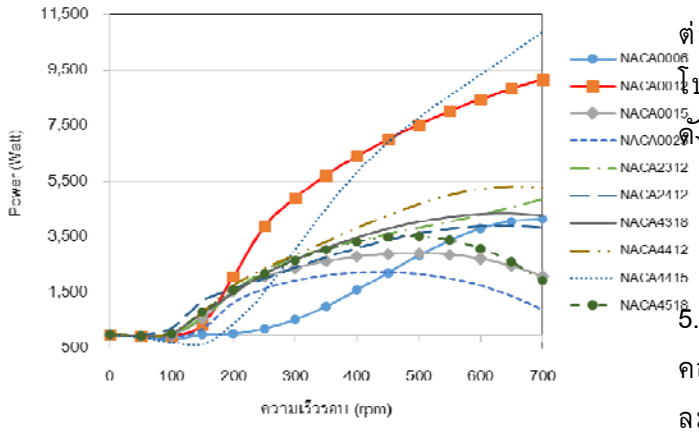
อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 5-7 เป็นผลลัพธ์สำหรับกังหันลมที่ใช้ NACA0015 ที่ได้จากการกำหนดให้ความเร็วลมมีค่าเท่ากับ 3 m/s เท่านั้น



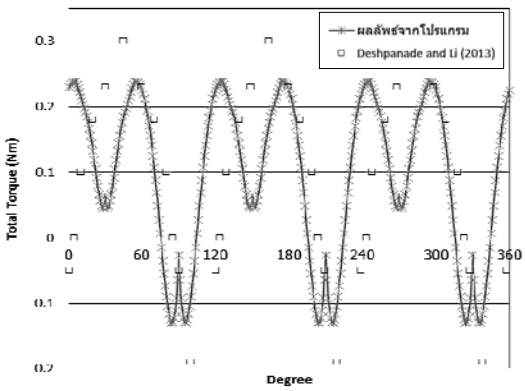
รูปที่ 8 โมเมนต์บิดที่ความเร็วรอบต่างๆ

รูปที่ 8 และ 9 แสดงโมเมนต์บิดและกำลังที่ได้จากกังหันที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยจะพบว่า ที่ความเร็วรอบประมาณ 100-180 rpm (ความเร็วลมประมาณ 1.5-3 m/s) แพนอากาศ NACA2412 จะให้กำลังสูงที่สุด ส่วนที่ความเร็วรอบ 180-450 rpm (ความเร็วลมประมาณ 3-6 m/s) แพนอากาศ NACA0012 จะให้กำลังสูงที่สุด และที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 450 rpm ขึ้นไป (ความเร็วลมตั้งแต่ 6 m/s ขึ้นไป) แพนอากาศ NACA4415 จะให้กำลังสูงที่สุด นอกจากนี้ จะพบว่า ที่ความเร็วรอบต่ำๆ กำลังที่ได้จากแพนอากาศบางชนิด จะมีค่าเป็นลบ

นั่นแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วลมต่ำๆ กังหันบางชนิดจะไม่สามารถฉุดให้ตัวเองเกิดการหมุนได้นั่นเอง



รูปที่ 9 กำลังที่ความเร็วรอบต่างๆ



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของ Deshpande and Li [8]

ในรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ กับผลลัพธ์จากงานวิจัยของ Deshpande and Li [8] โดยจะพบว่า ในช่วง 45-75, 165-205, 285-315 องศา โมเมนต์บิดที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของ Deshpande and Li [8] ทั้งนี้ ก็เนื่องมาจาก มุมปะทะของใบพัดแต่ละใบจะอยู่ในช่วงที่สามารถหาค่า C_D และ C_L ได้จากกราฟการทดลองในอดีต และที่สำคัญ ใบพัดแต่ละใบอยู่ในตำแหน่งที่ค่อนข้างเป็นอิสระต่อกัน สำหรับมุมของการหมุนอื่นๆ นั้น จะพบว่า กำลังที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปพอสมควร อีกทั้งแนวโน้มที่ได้ในบางช่วงก็ไม่เป็นไปในทำนองเดียวกัน ทั้งนี้ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้ ไม่ได้คำนึงถึงการหมุนวน (Wake) ที่ใบพัดแต่ละใบจะส่งผลถึงกัน

อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจะดำเนินการวิจัยต่อเนื่อง โดยจะสร้างแบบจำลองขึ้นเอง และจะใช้โปรแกรมฟรีแวร์ที่สามารถวิเคราะห์การหมุนวนดังกล่าว เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้

5. สรุป

5.1 ในงานวิจัย ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนดิ่งที่ใช้แพนอากาศชนิดต่างๆ เป็นใบพัดจำนวน 3 ใบ

5.2 แพนอากาศ NACA2412 จะให้กำลังสูงสุดที่ความเร็วรอบประมาณ 100-180 rpm (ความเร็วลมประมาณ 1.5-3 m/s)

5.3 แพนอากาศ NACA0012 จะให้กำลังสูงที่สุดที่ความเร็วรอบ 180-450 rpm (ความเร็วลมประมาณ 3-6 m/s)

5.4 แพนอากาศ NACA4415 จะให้กำลังสูงที่สุดที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 450 rpm ขึ้นไป (ความเร็วลมตั้งแต่ 6 m/s ขึ้นไป)

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ จนสามารถพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาได้

7. รายการสัญลักษณ์

C	ระยะคอร์ด (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] BP Statistical Review of World Energy 2011, http://www.bp.com/bodycopyarticle.do?categoryId=1&contentId=7052055, ตุลาคม 2554

[2] แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี พ.ศ. 2551-2565, http:// www.dede.go.th/dede/fileadmin/upload/.../REDP_15_yrs_3pages.pdf, ตุลาคม 2554

[3] ชนะชาติ คำวิระ, ชัยทัศ โพธิ์พล, ขจรศักดิ์ ศรีทอง, วิภาวี สุวรรณกนก, อิสระ วิภาตะวณิช, ปฏิภาณ ยืนยง, วีรภัทร์ มาลัยกฤษณะชาลี, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดิ์, การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับสมรรถนะของกังหันลมแบบไจโรมิลล์ที่ใช้แพนอากาศชนิดสมมาตร, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม 2556, มหาวิทยาลัยบูรพา, จังหวัดชลบุรี.

[4] J.F. Manwell, J.G. McGowen, A.L. Rogers, USA wind energy explained theory: design and application, University of Massachusetts 2002

[5] A.M. Kuethe, C.Y. Chow, Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design, 5th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York (NY), USA.

[6] K. W. McAlister and R. K. Takahashi, NACA 0015 Wing Pressure and Trailing Vortex Measurements, http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/ casi.ntrs.nasa.gov/ 19920001763.pdf, February, 2013

[7] กิจจา ภัทรทิพากร, ณัฐวุฒิ ม่วงศรีจันทร์, ณัฐวุฒิ วิทยานุกรณ์, วีระชาติ ไทยเสถียร, ธนกฤต กิจแสงภักดี, นฤรงค์ โตอัจฉริยะวงศ์, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดิ์, วิธีซอร์สและวอร์เท็กพาเนลสำหรับการไหลศักย์อัดตัวไม่ได้ผ่านวัตถุ 2 มิติ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม 2556, มหาวิทยาลัยบูรพา, จังหวัดชลบุรี.

[8] P. Deshpande and X. Li, Numerical study of Giromill-Type Wind Turbines with Symmetrical and Non-symmetrical airfoils, European International Journal of Science and Technology 2(8), 2013

[9] E.N. Jacobs, K.E. Ward, R.M. Pinkerton, The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel, T.R. No. 460, N.A.C.A. 1933.

[10] NASA (National Aeronautics and Space Administration), www.grc.naca.gov/WWW/k-12/airplane/kiteincl.html, กันยายน 2556.