



## การศึกษาสมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ของใบพัดกังหันลมที่ถูกปรับเปลี่ยนมุมบิดช่วงต้นใบพัด

### Performance Prediction of Wind Turbine Blade with Inboard Blade Twist Modifications

วิโรจน์ แบบพิมาย<sup>1\*</sup> และ ทวีช จิตรสมบูรณ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

\*ติดต่อ: E-mail: wirojpimai@gmail.com โทรศัพท์: 0-4422-4410

#### บทคัดย่อ

บทความนำเสนอการศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนมุมบิดช่วงต้นใบพัด (inboard) ต่อสมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยใช้สมการแบบ Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) และแบบจำลองความปั่นป่วน SST k- $\omega$  จำลองการไหลผ่านกังหันลมที่ช่วงความเร็วลม 5-20 เมตรต่อวินาที กังหันลม NREL (National Renewable Energy Laboratory) Phase VI ถูกเลือกนำมาใช้สำหรับสอบเทียบผลการคำนวณ CFD และใช้เป็นกังหันลมต้นแบบ โดยได้ทำการออกแบบมุมบิดใบพัดต้นแบบใหม่เฉพาะในช่วงระยะรัศมี  $r/R=0.30-0.60$  ของความยาวใบ โดยใบพัดจะมีมุมบิดเปลี่ยนแปลงไปจากมุมบิดเดิมมากที่สุด 3 และ 5 องศา ในลักษณะเส้นโค้งสมมาตร ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกำลังงาน แรงผลัก และงานรายปี (AEP) กับใบพัดต้นแบบ นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลผ่านใบพัดและเปรียบเทียบการกระจายแรงตลอดความยาวใบด้วยเช่นกัน

**คำหลัก:** ใบพัดกังหันลม, NREL Phase VI, CFD, มุมบิด, กังหันลมแกนนอน

#### Abstract

This paper presents a numerical investigation of the aerodynamics around a wind turbine blade with different inboard twist distributions using Computational Fluid Dynamics (CFD). The steady incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations with the SST k- $\omega$  turbulence model have been applied for all calculations at different wind speeds from 5-20 m/s. The NREL Phase VI wind turbine rotor blade was used for validation and as a baseline. The original blade geometry was then modified by increasing/decreasing the twist angles in the segment  $r/R=0.30-0.60$  of the blade span. The inboard twist angles were varied in form of symmetrical curve with maximum angle of 3° and 5° from the baseline twist distribution. The computational results of the modified blades were compared with those of the baseline blade, in terms of rotor power, thrust and annual energy production (AEP). Flow field around the rotor and comparison of spanwise loading are also presented.

**Keywords:** Wind turbine blade, NREL Phase VI, CFD, Blade twist, HAWT



## 1. บทนำ

ปัจจุบันการออกแบบและวิเคราะห์ทางอากาศพลศาสตร์เกี่ยวกับกังหันลมมีการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) กันมากขึ้น เนื่องจากทำการแก้ปัญหาโดยไม่ใช้สมมุติฐานมากนัก สามารถให้ผลเฉลยในสามมิติและรายละเอียดการไหลได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะต่อการใช้ศึกษาการไหลผ่านใบพัดกังหันลมซึ่งเป็นการไหลหนึ่งที่มีความซับซ้อน โดยเฉพาะเมื่อเกิดการไหลแยกตัวจากผิว (separated flow) ที่ยากต่อการทำนายพฤติกรรมได้อย่างแม่นยำ

ในการออกแบบรูปร่างใบพัดนั้น มุมบิดใบ (twist angle) ของแพนอากาศใบพัดในแต่ละระยะรัศมี ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกำลังงานของโรเตอร์กังหันลม มุมบิดที่เปลี่ยนไปย่อมส่งผลให้มุมปะทะของแพนอากาศเปลี่ยนไปด้วย ส่งผลต่อค่าแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ใบพัดกังหันลมโดยทั่วไปมักมีการแจกแจงมุมบิด (twist distribution) ในลักษณะมุมบิดสูงที่โคนใบและลดลงแบบไม่เชิงเส้นตามระยะรัศมีที่เพิ่มขึ้น จนถึงปลายใบ (ลักษณะ hyperbolic curve) ซึ่งการแจกแจงมุมบิดดังกล่าวให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าใบพัดที่มีมุมบิดคงที่ค่าเดียว (untwisted blade) หรือมุมบิดที่ลดลงแบบเชิงเส้นตามความยาวใบ (linear twist) [1] อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ใบพัดทำมุมบิดที่แปลกออกไป เช่น มีการแจกแจงมุมบิดในลักษณะโค้งตัวสูงขึ้นหรือต่ำลงที่ช่วงใดช่วงหนึ่งของใบพัด เป็นต้น ใบพัดที่ทำมุมบิดในลักษณะเช่นนี้จะมีสมรรถนะและคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์อย่างไรนั้นยังไม่ทราบอย่างแน่ชัดและมีการศึกษาวิจัยไม่มากนัก อาทิเช่น Guntur [2], Chow and van Dam [3] เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลกระทบการปรับปรุงมุมบิดในช่วงระยะ inboard ของใบพัด ซึ่งกังหันลม (โดยเฉพาะกับกังหันลมชนิด Stall-regulated) มักจะเกิดพฤติกรรมที่เรียกว่า การหน่วงการป้อ (Stall delay)

เกิดขึ้นในช่วงระยะรัศมีดังกล่าว โดยอิทธิพลจากการหมุน (rotational effect) ของใบพัดจะทำให้คุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดแตกต่างไปจากสภาพที่ไม่หมุนหรือการไหลผ่านแพนอากาศในลักษณะ 2 มิติ แบบสถิต (static) โดยแพนอากาศใบพัดที่กำลังหมุน จะเกิดการป้อ (Stall) ที่ล่าช้ากว่า และสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกได้สูงกว่าแพนอากาศใน 2 มิติ ใดๆก็ตาม แม้มีความพยายามจากนักวิจัยหลายกลุ่มเพื่ออธิบายความเชิงฟิสิกส์ของปรากฏการณ์หน่วงการป้อนี้ แต่ยังคงคลุมเครือและไม่ทราบกลไกของการเกิดอย่างแน่ชัด จึงยังคงเป็นประเด็นที่เปิดกว้างและน่าสนใจของนักวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ความเข้าใจที่มากขึ้นต่อไป

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) และแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\omega$  SST โดยใช้กังหันลม NREL (National Renewable Energy Laboratory) Phase VI [4] เป็นกังหันลมต้นแบบ จากนั้นทำการออกแบบมุมบิดของใบพัดต้นแบบใหม่เฉพาะในช่วงระยะรัศมี 0.30–0.60R ของความยาวใบ ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับกำลังงาน แรงผลัก และงานรายปีที่ผลิตได้ รวมทั้งวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและการกระจายแรงตลอดความยาวใบ

## 2. วิธีการ

### 2.1 กังหันลม NREL Phase VI

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลการทดลองกังหันลม NREL Phase VI ที่ทดลองในอุโมงค์ลมขนาดใหญ่ของ NASA Ames [4] สำหรับการสอบเทียบผลการคำนวณ CFD และใช้เป็นกังหันลมต้นแบบ ซึ่งกังหันลม Phase VI (ดังแสดงในรูปที่ 1) เป็นกังหันลมแกนนอนแบบ Stall-regulated ชนิด 2 ใบพัด รัศมีโรเตอร์ 5.029 เมตร ขนาดกำลังผลิต 19.8 kW ใบพัดของกังหันลมออกแบบโดย Giguere and Selig [5] หน้าตัดใบพัดใช้แพนอากาศรุ่น S809 ตลอดความยาวใบ ใบพัดมีความเร็วใบเชิงเส้น

(Linear taper) และ ทำมุมบิด (nonlinear twist) รายละเอียดต่างๆ ของรูปทรงใบพัดและการทดลองกังหันลมมีอยู่ใน Hand et al. [4] โดยในงานวิจัยจะใช้ชุดข้อมูลการทดลองกังหันลมที่ทดสอบแบบ Upwind ใบพัดทำมุมเอนปลายใบ (tip pitch) 3 องศา โรเตอร์ไม่ทำมุมโคน (0° cone angle) ไม่ทำมุมสาย (0° yaw angle) และหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 72 RPM

**2.2. การกำหนดลักษณะการแจกแจงมุมบิดใบ**

ความกว้างคอर्डของใบพัดจะเหมือนกับใบพัดต้นแบบทุกประการ โดยใบพัดที่ออกแบบมุมบิดใหม่นี้จะทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะมุมบิดในช่วงระยะรัศมี  $r/R = 0.30$  ถึง  $r/R = 0.60$  เท่านั้น มุมบิดที่รัศมีนอกช่วงดังกล่าวจะเท่ากับใบพัดต้นแบบ สำหรับการแจกแจงมุมบิดที่เปลี่ยนแปลงไปจากใบพัดต้นแบบนั้นเป็นลักษณะเส้นโค้งสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2 สร้างด้วยสมการของฟังก์ชันพหุนามเส้นโค้ง (Cubic spline function) ผ่านจุดควบคุม (Control points) จำนวน 5 จุด ซึ่งจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดกำหนดให้มุมบิดมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนอีก 3 จุด

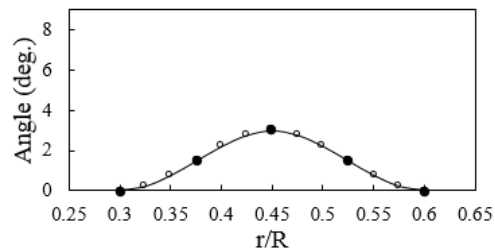
ควบคุมที่เหลือ กำหนดด้วยฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian functions) ดังสมการที่ 1

$$f(x) = a \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right) \tag{1}$$

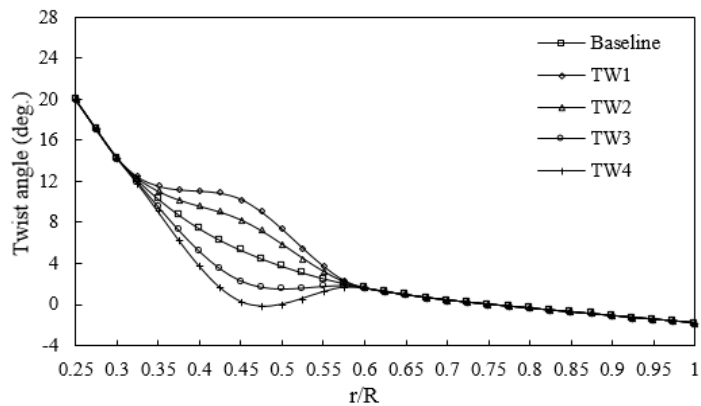
โดยค่าคงที่ a กำหนดจุดสูงสุด b กำหนดตำแหน่งในแนวแกนอนของจุดสูงสุด ส่วน c กำหนดช่วงความกว้าง เมื่อนำฟังก์ชันการแจกแจงมุมบิดนี้บวกเข้าหรือลบออกกับมุมบิดของใบพัดต้นแบบในช่วงระยะรัศมี  $r/R = 0.30-0.60$  จะได้การแจกแจงมุมบิดของใบพัด TW1 และ TW2 (กรณีเพิ่มมุมบิด) กับใบพัด TW3 และ TW4 (กรณีลดมุมบิด) ดังรูปที่ 3 แสดงการแจกแจงมุมบิดตลอดความยาวใบของใบพัดต้นแบบ (Baseline blade) เทียบกับใบพัดที่ปรับมุมบิดใหม่ ซึ่งมีมุมบิดเปลี่ยนไปมากที่สุดที่กึ่งกลางช่วง (ที่รัศมี  $r/R = 0.45$ ) โดยมีมุมบิดที่เปลี่ยนไปจากใบพัดต้นแบบมากที่สุด 3 องศา (ใบพัด TW2 และ TW3) และ 5 องศา (ใบพัด TW1 และ TW4) และความยาวของช่วงที่ปรับมุมบิดคิดเป็นร้อยละ 30%R



รูปที่ 1 กังหันลม NREL Phase VI [4]



รูปที่ 2 ลักษณะมุมบิดที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 3 มุมบิดของใบพัดต้นแบบและใบพัดที่ปรับมุมบิดใหม่

### 2.3 การคำนวณเชิงตัวเลข

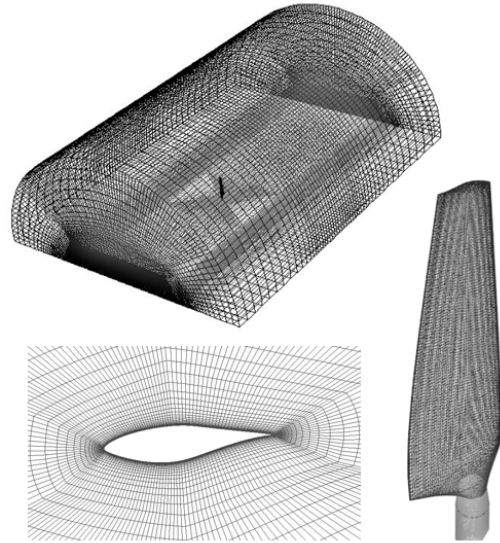
ลักษณะของโดเมนและกริดการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 4 มีปริมาตรการคำนวณเป็นรูปครึ่งทรงกระบอก เนื่องจากเป็นกังหันลมชนิด 2 ใบพัดที่สมมาตร การคำนวณจึงลดเหลือเพียง 1 ใบพัด แล้วใช้การกำหนดค่าที่ผิวสมมาตรเป็น periodic condition โดยขอบของโดเมนกำหนดให้มีระยะห่างจากตัวใบพัดกังหันลม (ด้านหน้า x ด้านหลัง x ด้านข้าง) เป็น  $6 \times 8 \times 5$  เท่าของความยาวรัศมีใบพัด มีจำนวนกริดทั้งหมด 2.74 ล้านกริด กริดทั้งหมดเป็นทรงสี่เหลี่ยม (Hexahedral mesh) สำหรับกริดรอบหน้าตัดใบพัดเป็นลักษณะแบบ O-type grid โดยมีจำนวน 185 กริดรอบแพนอากาศ กริดจุดแรกสูงจากผนังแพนอากาศถูกสร้างให้มีค่า  $y^+ < 2$  และมีอัตราการขยายกริดในทิศตั้งฉากเป็น 1.2

กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) ที่ผนังด้านหน้ากังหันเป็นความเร็วลมเข้า (velocity inlet) ผนังด้านหลังกังหันลมเป็นความดันออก (pressure outlet) ผนังโค้งด้านข้างกำหนดเป็น symmetry ส่วนโรเตอร์กังหันลมกำหนดให้ไม่มีการลื่นไถลที่ผนัง (no-slip wall) ทำการจำลองการไหลที่ความเร็วลม 5, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 17, และ 20 m/s กำหนดให้กระแสดังกล่าวมีความหนาแน่น  $1.23 \text{ kg/m}^3$  และความหนืด  $1.78 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(ms)}$  ในทุกการคำนวณ

ทำการคำนวณ CFD ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Ansys Fluent ซึ่งใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด จำลองการไหลผ่านใบพัดกังหันลมที่กำลังหมุนด้วยระบบ Rotating Reference Frame ใช้กรรมวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE algorithm สมการมวลและโมเมนตัมประมาณค่าด้วยวิธี QUICK สมการที่เกี่ยวข้องทั้งหมดกำหนดการลู่เข้าที่ค่า residual เท่ากับ  $10^{-6}$

ในการคำนวณใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST-k $\omega$  พัฒนาโดย [6, 7] เนื่องจากให้ผลการทำนายการไหลภายใต้เกรเดียนต์ความดันย้อนกลับ (adverse pressure gradient) ได้ดี เนื่องด้วยการที่แบบจำลองนี้สามารถใช้วิธีการ

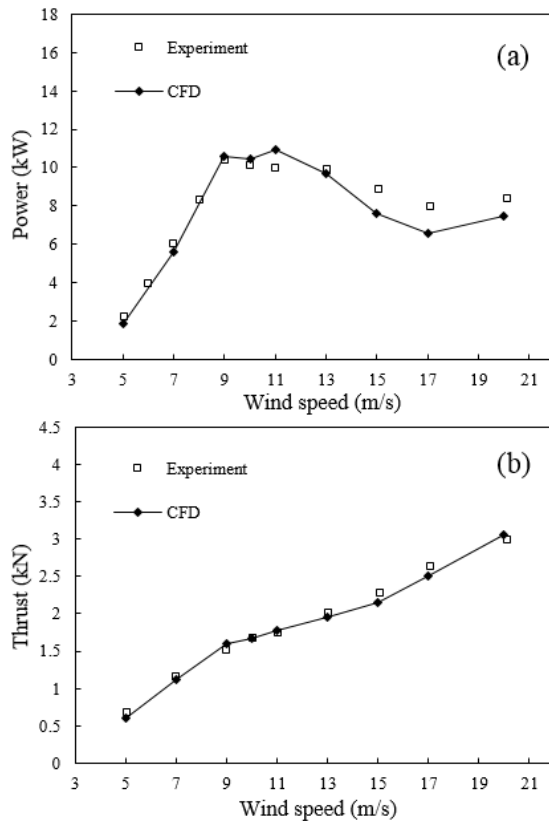
จำกัดระดับค่าความหนืดปั่นป่วน (eddy viscosity limiter) กับสมการความหนืดปั่นป่วน ซึ่งในการคำนวณครั้งนี้ใช้ค่าคงที่  $a_1 = 0.30$



รูปที่ 4 โดเมนและกริดการคำนวณ

### 3. การสอบเทียบผลการคำนวณ CFD

เพื่อที่จะสอบเทียบความแม่นยำและน่าเชื่อถือของการคำนวณ CFD จึงได้ทำการสอบเทียบผลการคำนวณ CFD ของใบพัดกังหันลมต้นแบบ (ใบพัดกังหันลม NREL Phase VI) กับข้อมูลการทดลองกังหันลมของ NREL [4] ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 5 เปรียบเทียบค่ากำลังงานเชิงกล (Rotor power) และแรงผลัก (Thrust) ของโรเตอร์กังหันลมต้นแบบ (Baseline rotor) ที่ความเร็วลมต่างๆ จากวิธี CFD เทียบกับข้อมูลการทดลอง จะพบว่าโดยรวมแล้ว เส้นกราฟกำลังงานและแรงผลักที่ได้มีความแม่นยำสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ในช่วงความเร็วลมตั้งแต่ 15 m/s ขึ้นไป ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการไหลแยกตัวจากผิว (separated flow) สูงตลอดความยาวใบพัด การคำนวณ CFD ทำนายค่ากำลังงานได้ต่ำกว่าข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 5 ผลการคำนวณกำลังงาน (a) และแรงผลัก (b) ของใบพัดกังหันลมต้นแบบด้วย CFD

#### 4. ผลลัพธ์และการวิจารณ์

##### 4.1 กำลังงานและแรงผลักของกังหันลม

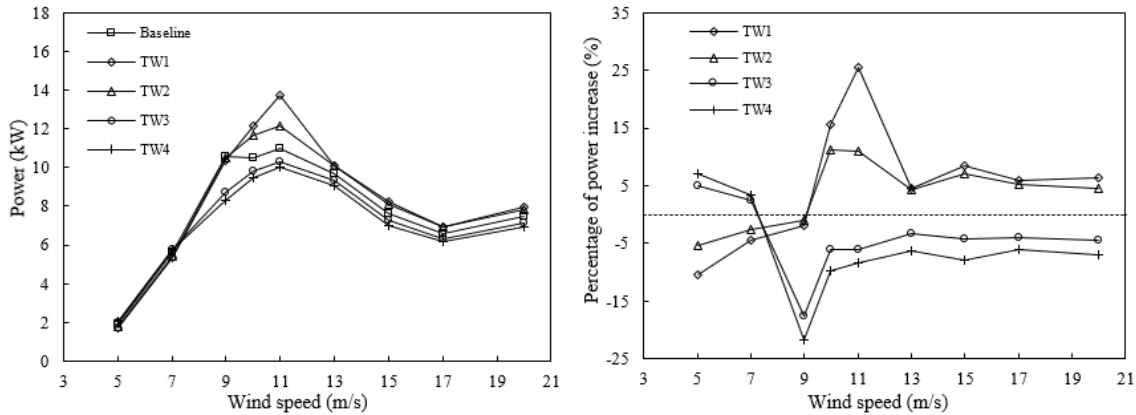
การเปรียบเทียบกำลังงานและแรงผลักของใบพัดที่ความเร็วลมต่างๆ รวมทั้งเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังงานและแรงผลักของใบพัดที่ปรับเปลี่ยนมุมบิดใหม่เทียบกับใบพัดต้นแบบ (Baseline blade) แสดงอยู่ในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

ในรูปที่ 6 จะพบว่า ใบพัด TW1 และ TW2 (ซึ่งเป็นใบพัดที่ทำมุมบิดสูงขึ้นจากใบพัดต้นแบบ) ผลิตกำลังงานได้ต่ำกว่าใบพัดต้นแบบในช่วงความเร็วลม 5-9 m/s โดยมีค่ากำลังงานลดลงมากที่สุดที่ความเร็วลม 5 m/s ส่วนในช่วงความเร็วลม 10-20 m/s มีค่ากำลังงานที่สูงกว่าใบพัดต้นแบบ ซึ่งที่ความเร็วลม 10 และ 11 m/s เป็น

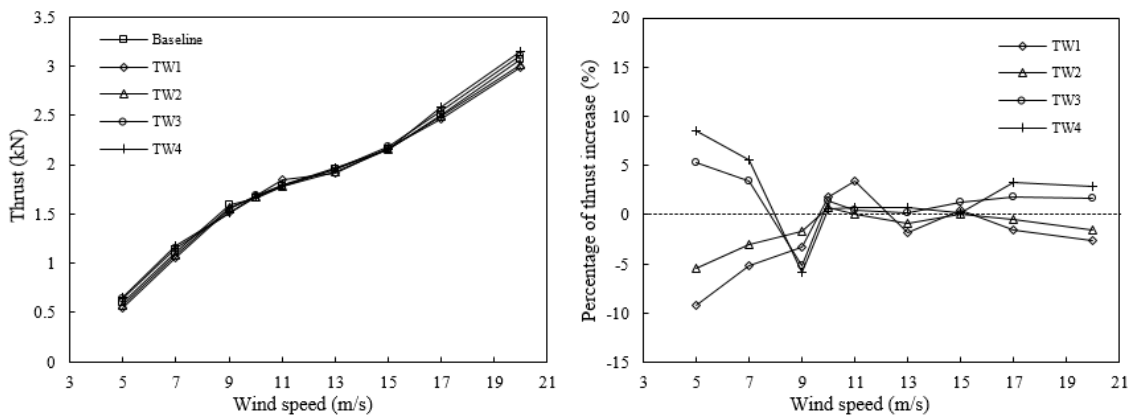
ช่วงที่ใบพัด TW1 และ TW2 มีค่ากำลังงานเพิ่มขึ้นจากใบพัดต้นแบบมากที่สุด โดยใบพัด TW1 มีกำลังงานเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 15.6% และ 25.4% ตามลำดับ ส่วนใบพัด TW2 มีกำลังงานเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 11.2% และ 11% ตามลำดับ และที่ความเร็วลมตั้งแต่ 13 m/s ขึ้นไปนั้น ใบพัด TW1 มีกำลังงานมากกว่าใบพัด TW2 ไม่นัก ส่วนในกรณีใบพัด TW3 และ TW4 ซึ่งเป็นใบพัดที่ทำมุมบิดต่ำลงจากใบพัดต้นแบบ มีค่ากำลังงานสูงกว่าใบพัดต้นแบบในช่วงความเร็วลม 5-7 m/s แต่ที่ความเร็วลม 9-20 m/s มีค่ากำลังงานต่ำกว่าใบพัดต้นแบบ โดยที่ความเร็วลม 9 m/s ใบพัดทั้ง 2 มีค่ากำลังงานต่ำลงจากใบพัดต้นแบบค่อนข้างมาก

ในรูปที่ 7 เปรียบเทียบแรงผลักแนวแกนของใบพัดกังหันลม จะพบว่า ใบพัด TW1 และ TW2 มีค่าแรงผลักสูงขึ้นกว่าใบพัดต้นแบบเฉพาะที่ความเร็วลม 10 m/s, 11 m/s และ 15 m/s โดยใบพัด TW2 มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงผลักจากใบพัดต้นแบบเพียงเล็กน้อยไม่ถึง 1% ส่วนใบพัด TW1 มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงผลักมากที่สุดที่ความเร็วลม 11 m/s อยู่ที่ 3.4% ส่วนกรณีใบพัด TW3 และ TW4 มีค่าแรงผลักสูงกว่าใบพัดต้นแบบในทุกความเร็วลม ยกเว้นที่ความเร็วลม 9 m/s ที่มีค่าแรงผลักต่ำกว่าใบพัดต้นแบบ

การออกแบบใบพัดกังหันลมใดๆ ย่อมต้องการให้เกิดแรงผลักที่กระทำกับใบพัดน้อย (เกิดภาระงาน (load) ที่กระทำกับใบพัดน้อยลง) เพราะจะส่งผลดีต่อใบพัดกังหันลมในแง่โครงสร้างและความแข็งแรงของใบพัด จากรูปที่ 6 และ 7 จะเห็นว่า แม้ว่าใบพัด TW1 และ TW2 (ใบพัดที่เพิ่มมุมบิดจากใบพัดต้นแบบ) จะมีค่าแรงผลักที่สูงขึ้นจากใบพัดต้นแบบในบางความเร็วลม แต่เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงผลักมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังงานที่ผลิตได้สูงกว่าใบพัดต้นแบบค่อนข้างมาก



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกำลังงาน (ซ้าย) และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังงานเทียบกับใบพัดต้นแบบ (ขวา)



รูปที่ 7 เปรียบเทียบแรงผลัก (ซ้าย) และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแรงผลักเทียบกับใบพัดต้นแบบ (ขวา)

#### 4.2 พฤติกรรมการไหลผ่านใบพัด

รูปที่ 8 แสดงเส้น Limiting streamline ของการไหลที่ผิวด้านดูด (suction surface) ของใบพัดทั้ง 5 แบบ จะพบว่า ที่ความเร็วลมต่ำ 7 m/s การไหลตลอดความยาวใบพัดเป็นการไหลแบบชิดเกาะผิว (attached flow) มีทิศการไหลขนานจากหัวแพนอากาศ (Leading edge) ไปทางแพนอากาศ (Trailing edge) โดยจะมีการไหลแยกตัวจากผิวและการไหลไปในทิศทางรัศมี (radial flow) เกิดขึ้นในช่วงบริเวณใกล้โคนใบ ทั้งนี้ใบพัด TW4 ที่บริเวณระยะรัศมีประมาณ  $r/R=0.50$  เริ่มเกิดการไหลแยกที่ใกล้หางแพนอากาศและมีการเลี้ยวเบนของการไหลในทิศทางรัศมีมากกว่าใบพัดอื่น เนื่องจากการที่ใบพัด TW4 ทำมุมบิดต่ำกว่าอื่น ผนวกกับใบพัดทั้งหมดหมุนด้วย

ความเร็วรอบคงที่เท่ากัน ดังนั้น เมื่อพิจารณาที่ความเร็วลมเดียวกันใดๆ การไหลผ่านหน้าตัดใบพัด (แพนอากาศใบพัด) ในช่วงระยะ  $0.30R > r < 0.60R$  ของใบพัด แพนอากาศใบพัด TW4 ย่อมจะเกิดมุมปะทะสูงกว่าใบพัด TW3, ใบพัดต้นแบบ, ใบพัด TW2 และ TW1 ตามลำดับ ทำให้เกิดการไหลแยกตัวก่อนใบพัดอื่น

เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะเกิดการไหลแยกตัวจากผิวมากขึ้น เนื่องจากกัณฑ์ลมหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ มุมปะทะจึงเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม สำหรับที่ความเร็วลม 9 m/s พื้นที่ส่วนใหญ่ของใบพัดทั้ง 5 เกิดการไหลแยกตัวจากผิวสืบมาทางด้านหัวแพนมากขึ้นและมีการไหลในทิศทางรัศมีมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยพื้นที่รอบบริเวณระยะรัศมีประมาณ  $r/R = 0.50$  ของใบพัด TW3 และ TW4 เกิด

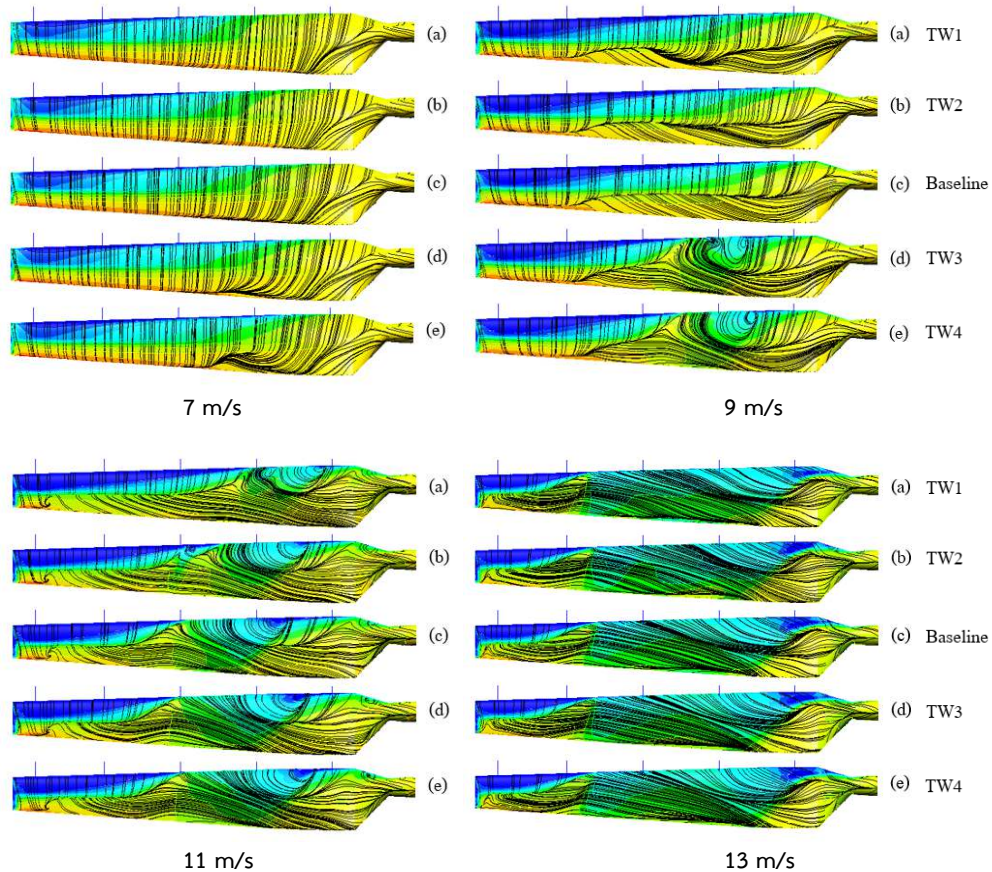


การไหลแยกตัวตั้งแต่หัวแพนและเกิดการไหลควงของ กระแสการไหลแยกตัว (separated vortex) ในทิศรัศมี ซึ่งลักษณะของการไหลผ่านหน้าตัดใบพัดที่บริเวณพื้นที่ ดังกล่าวนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 9 ส่วนการไหลที่ช่วงบริเวณ outboard ของใบ (ช่วงปลายใบ) ยังคงเป็นการไหลแบบ ขิดเกาะผิวตลอดหน้าตัดใบในทุกใบพัด

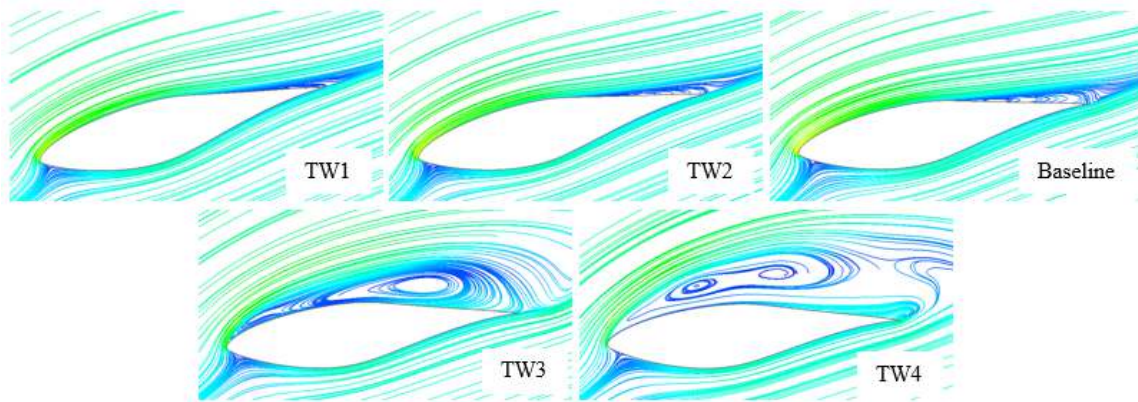
ที่ความเร็วลม 11 m/s เกิดการไหลแยกตัวมากขึ้น ตลอดทั้งความยาวใบพัด โดยในช่วง inboard ของทุก ใบพัดมีการไหลควงของกระแสการไหลแยกตัว ส่วนการ ไหลที่ช่วง outboard ของใบเป็นการไหลแบบขิดเกาะผิว ที่ระยะกึ่งหน้าของคอร์ดแพนอากาศ ส่วนที่ระยะรัศมี  $r =$

0.95R ขึ้นไป ยังคงเป็นการไหลแบบขิดผิวตลอดหน้าตัด ใบ (ตลอดคอร์ดแพนอากาศ) โดยที่ความเร็วลมนี้ ใบพัด TW1 มีพื้นที่ของการไหลขิดผิวมากกว่าใบพัด TW2 และ ใบพัดต้นแบบ ตามลำดับ นั่นคือ การทำมุมบิดในลักษณะ โกร่งตัวสูงขึ้นของใบพัด TW1 และ TW2 ช่วยลดการไหล แยกตัวในทิศรัศมีลง

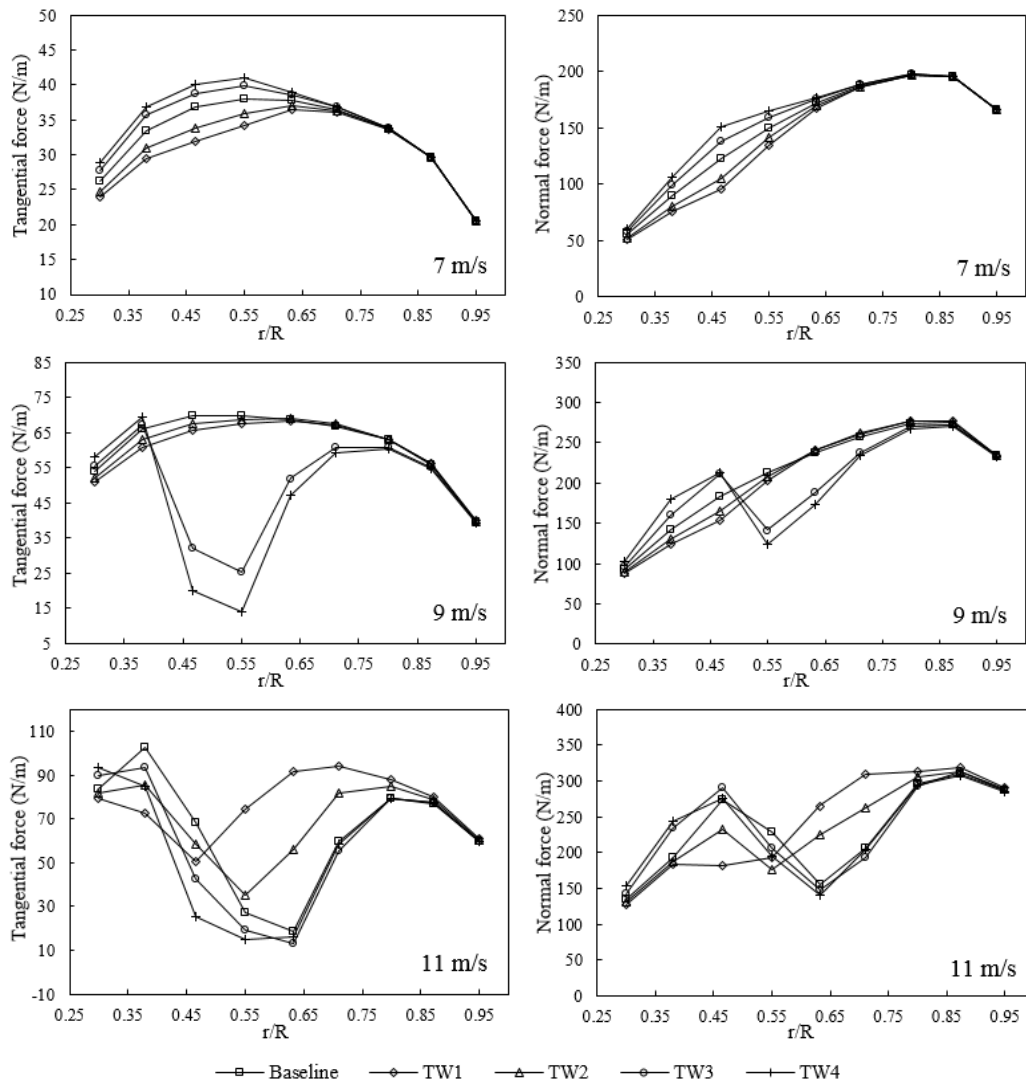
ที่ความเร็วลม 13 m/s พื้นที่ส่วนใหญ่ของใบพัดเกิด การไหลแยกตั้งแต่หัวแพนปกคลุมตลอดหน้าตัดใบพัด มี การไหลขิดผิวที่ระยะกึ่งหน้าของคอร์ดแพนอากาศที่ช่วง ปลายใบ โดยในทุกใบพัดเหลือพื้นที่ของการไหลขิดผิวที่ ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 8 เส้น Limiting streamlines ของการไหลบนผิวด้านดูดของใบพัดที่ความเร็วลมต่างๆ



รูปที่ 9 การไหลผ่านแพนอากาศใบพัดที่ระยะรัศมี  $r/R=0.47$  ที่ความเร็วลม 9 m/s



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแรงที่สัมผัสผิวและแรงดัดงอของใบพัดที่ความเร็วลม 7 m/s, 9 m/s, และ 11 m/s.



### 4.3 การกระจายแรงตลอดความยาวใบพัด

ในรูปที่ 10 แสดงการกระจายแรงตลอดความยาวใบพัดของการไหลที่ความเร็วลม 7, 9 และ 11 m/s โดยเป็นแรงในทิศสัมผัส (Tangential force) และแรงในทิศตั้งฉาก (Normal force) กับระนาบการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งแรงในทิศสัมผัสเป็นแรงที่ทำให้เกิดแรงบิด ส่วนแรงในทิศตั้งฉากทำให้เกิดแรงผลัก จะพบว่า ที่ความเร็วลม 7 m/s ซึ่งมุมปะทะของแพนอากาศตลอดความยาวใบยังคงต่ำอยู่และอยู่ในช่วงแรงยกแปรผันเชิงเส้นกับมุมปะทะ (ช่วง linear lift) ใบพัด TW1 ซึ่งทำมุมบิดสูงกว่า (เกิดมุมปะทะที่ต่ำกว่า) จึงได้ค่าแรงยกที่ต่ำกว่า ทำให้มีค่าแรงแนวสัมผัสและแรงแนวตั้งฉากที่ต่ำกว่าใบพัดอื่นในช่วงระยะรัศมีตั้งแต่โคนใบจนถึงระยะประมาณ  $r=0.70R$  ส่วนที่รัศมีสูงกว่า 0.70R ขึ้นไปนั้น ใบพัดทั้งหมดมีค่าแรงแนวสัมผัสและแรงตั้งฉากเข้าใกล้ค่าจากใบพัดต้นแบบ

ที่ความเร็วลม 9 m/s ใบพัด TW3 และ TW4 มีค่าแรงแนวสัมผัสต่ำกว่าใบพัดต้นแบบค่อนข้างมากในช่วงรัศมี 0.40-0.70R เมื่อพิจารณา Limiting streamline ในรูปที่ 8 จะเห็นว่า ช่วงบริเวณระยะดังกล่าว เกิดการไหลแยกจากผิวตั้งแต่หัวแพนและเกิดการไหลควงของกระแสการไหลแยกตัว เป็นเหตุทำให้สัมประสิทธิ์แรงยกลดลง (แรงแนวสัมผัสจึงลดลง) ส่งผลให้มีค่าแรงบิดและกำลังงานที่ต่ำกว่าใบพัดต้นแบบค่อนข้างมาก ส่วนที่ความเร็วลม 11 m/s ใบพัด TW1 และ TW2 มีค่าแรงแนวสัมผัสสูงกว่าใบพัดต้นแบบมากในช่วงรัศมี  $r > 0.5R$  ส่งผลให้ที่ความเร็วลมนี้ ใบพัด TW1 และ TW2 ผลิตกำลังงานได้สูงกว่าใบพัดต้นแบบค่อนข้างมาก

จากรูปที่ 8 และ 10 สังเกตว่า มุมบิดที่ทำการเปลี่ยนแปลงนั้นมีผลกระทบต่อ การไหลและค่าแรงทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดไม่เฉพาะในช่วงระยะรัศมีที่ปรับเปลี่ยนมุมบิด (ช่วง  $r/R = 0.30-0.60$  ของใบ) แต่ส่งผลต่อการไหลและแรงทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศที่บริเวณรอบข้างนอกช่วงรัศมีดังกล่าวด้วยเช่นกัน (นอกช่วง  $r/R = 0.30-0.60$ )

### 4.4 เปรียบเทียบงานรายปี

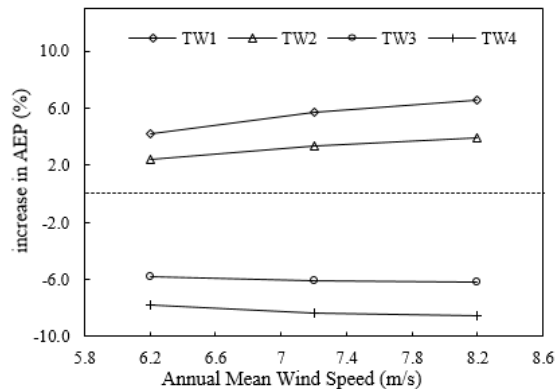
งานรายปี (Annual Energy Production, AEP) นิยมนำมาใช้เปรียบเทียบศักยภาพของกังหันลม การคำนวณ AEP จำเป็นต้องผนวกค่ากำลังงานของกังหันลมเข้ากับสถิติลม (การแจกแจงความถี่ลม) เช่น Weibull distribution เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะใช้การแจกแจงสถิติลมแบบ Rayleigh distribution มีสมการเป็นดังนี้

$$f(V) = \frac{\pi V}{2 \bar{V}^2} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^2\right) \quad (2)$$

เมื่อ  $V$  เป็นความเร็วลมใดๆ และ  $\bar{V}$  เป็นความเร็วลมเฉลี่ย (หน่วยเมตรต่อวินาที, m/s)

สำหรับความเร็วลมรายปีเฉลี่ย (Annual mean wind speed, AMWS) ที่ทำการศึกษานี้คือ 6.2-8.2 m/s เพื่อให้ครอบคลุมความเร็วลมรายปีเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบใบพัดต้นแบบโดย Giguere and Selig [5] ซึ่งออกแบบด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 7.2 m/s

ในรูปที่ 11 แสดงจำนวนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของงานรายปี (AEP) ของใบพัดที่ปรับมุมบิดเทียบกับใบพัดต้นแบบ (Baseline blade) จะพบว่า ใบพัด TW1 และใบพัด TW2 สามารถผลิตงานรายปีได้สูงกว่าใบพัดต้นแบบในทุกความเร็วลมรายปีเฉลี่ยตั้งแต่ 6.2-8.2 m/s อันเป็นผลจากการมีค่ากำลังงานที่สูงกว่าใบพัดต้นแบบค่อนข้างมากในช่วงความเร็วลม 10-11 m/s (รูปที่ 6) ซึ่งเป็นช่วงที่มีความถี่ของพลังงานลม (Wind power density) สูง ส่วนกรณีใบพัด TW3 และ TW4 ซึ่งมีค่ากำลังงานที่ต่ำกว่าใบพัดต้นแบบค่อนข้างมากที่ความเร็วลม 9 m/s ส่งผลให้ได้งานรายปีที่ต่ำกว่าใบพัดต้นแบบในทุกความเร็วลมรายปีเฉลี่ย



รูปที่ 11 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของงานรายปีของใบพัดที่ปรับปรุงมุมบิดเทียบกับใบพัดต้นแบบ

### 5. สรุปผล

บทความนี้ได้จำลองการไหลของอากาศผ่านใบพัดกึ่งหันลมที่กำลังหมุนด้วยวิธี CFD เพื่อศึกษาสมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ของใบพัดที่ถูกปรับเปลี่ยนมุมบิดในช่วง inboard ของใบพัด โดยก่อนอื่นได้ทำการสอบเทียบความแม่นยำของการคำนวณ CFD กับใบพัดต้นแบบ (ใบพัด NREL Phase VI) พบว่า แบบจำลอง  $k - \omega$  SST ให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองกึ่งหันลมได้ดี จากนั้นได้ทำการออกแบบมุมบิดใบพัดต้นแบบใหม่ในช่วงรัศมี  $r/R = 0.30-0.60$  ในลักษณะเส้นโค้งสมมาตรรอบมุมบิดเดิม ผลที่ได้พบว่าใบพัดที่ทำการเพิ่มมุมบิด (ใบพัด TW1 และ TW2) แสดงศักยภาพที่ดี แม้จะมีกำลังงานต่ำกว่าใบพัดต้นแบบในช่วงความเร็วลมต่ำ 5-9 m/s แต่ได้กำลังงานที่มากกว่าใบพัดต้นแบบในช่วงความเร็วลม 10-20 m/s ส่งผลให้สามารถผลิตงานรายปี (AEP) ได้สูงกว่าใบพัดต้นแบบ ขณะที่มีความแรงผลึกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในบางความเร็วลม ส่วนกรณีใบพัดที่ทำมุมบิดลดลง (ใบพัด TW3 และ TW4) การที่มีกำลังงานต่ำกว่าใบพัดต้นแบบในช่วงความเร็วลม 9-20 m/s ส่งผลให้ผลิตงานรายปีได้ต่ำกว่าใบพัดต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะการไหลที่มากขึ้น และพฤติกรรม Stall delay ของใบพัดจะได้นำเสนอในโอกาสต่อไป

### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Erich Hau. (2006). *Wind Turbines*, 2nd Edition, Springer.
- [2] Guntur, S. (2013). A Detailed Study of the Rotational Augmentation and Dynamic Stall Phenomena for Wind Turbines. PhD thesis, DTU Vindenergi. 2013.
- [3] Chow, R. and van Dam, C.P. (2012). Computational investigations of blunt trailing-edge and twist modifications to the inboard region of the NREL 5 MW rotor. *Wind Energy*. 16, 445–458
- [4] Hand MM, Simms DA, Fingersh LJ, Jager DW, Cotrell JR, Schreck S, Larwood SM. (2001). Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns. *NREL/TP-500-29955*; 2001.
- [5] Giguere, P. and Selig, M. (1999). Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor. *NREL/SR. 500-26173*.
- [6] F. R. Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity model for engineering applications. *AIAA-Journal* 32(8):1598-1605.
- [7] Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R. (2003). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Heat and Mass Transfer*, 2003; 4, 625–632.