

CST-01

คุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Numerical Investigation of Aerodynamic Characteristics of a Horizontal Axis Wind Turbine

Using CFD

วิโรจน์ แบบพิมาย^{1*} และ ทวีช จิตรสมบุญ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: wirojpimai@gmail.com, โทรศัพท์: 083-7999-939

บทคัดย่อ

บทความนำเสนอการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของใบพัดกังหันลมแกนนอนขนาดเล็ก โดยบทความนี้จะศึกษากังหันลม NREL (National Renewable Energy Laboratory) Phase VI ผลการคำนวณ CFD ได้สอบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องและน่าเชื่อถือ และได้ทำการประเมินหาค่ามุมปะทะจากความเร็วลมแนวแกนที่ลดลง และหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของแผนอากาศตลอดความยาวใบพัด ข้อมูลแผนอากาศใบพัดที่ได้จะนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรมเชิงทฤษฎี Blade Element Momentum (BEM) โดยที่ไม่ใช้แบบจำลองการปรับแก้ใดๆ เพิ่มเติม ผลที่ได้พบว่าการคำนวณด้วยทฤษฎี BEM ร่วมกับข้อมูลแผนอากาศใบพัด ทำนายค่ากำลังเชิงกลของกังหันลมได้สอดคล้องกับค่าจาก CFD เป็นอย่างดี ซึ่งผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของแผนอากาศ 2 มิติ ให้เป็นค่าในระบบ 3 มิติ สำหรับใช้ร่วมกับทฤษฎี BEM ต่อไปในอนาคต

คำหลัก: กังหันลม, CFD, Blade Element Momentum, ข้อมูลแผนอากาศ, NREL Phase VI

Abstract

This paper presents a numerical investigation of flow fields and aerodynamic characteristics of a small horizontal axis wind turbine blades using Computational Fluid Dynamics (CFD) code. In this article, we consider the NREL (National Renewable Energy Laboratory) Phase VI wind turbine rotors. The computational results were compared with the experimental datasets in order to verify the reliability and validity of the analytical results. Moreover, the reduced axial velocity method was used to determine the angle of attack and the coefficient of lift and drag were determined by the forces on the blade. The extracted airfoil data were put into a standard Blade Element Momentum (BEM) code without further corrections. The comparisons showed that the recalculated mechanical power by using BEM with 3D airfoil data extracted from CFD had good agreements with the CFD simulation. This study's results could be also used as a guidance in developing a new model for 3D correction of airfoil characteristics from 2D wind tunnel measurements for using with BEM codes in the future.

Keywords: Wind turbine, CFD, Blade Element Momentum, Airfoil data, NREL Phase VI

CST-01

1. บทนำ

การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพกังหันลมด้วยด้วยทฤษฎี BEM (Blade Element Momentum) นั้น ยังคงเป็นที่นิยมใช้กันอยู่มาก เนื่องจากสามารถให้ผลการคำนวณที่รวดเร็วและสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้ง่าย ทฤษฎี BEM จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้ประเมินประสิทธิภาพและใช้ออกแบบใบพัดกังหันลมเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ในขั้นต้น หลังจากได้แบบใบพัดที่ต้องการแล้ว สามารถใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) เพื่อตรวจสอบหรือยืนยันผลที่ได้ออกแบบไว้ หากจำเป็นก็อาจทำการทดลองเพื่อตรวจสอบเป็นขั้นสุดท้าย การทำเช่นนี้จะช่วยลดเวลาในการวิจัย พัฒนา และออกแบบกังหันลมลงได้มาก เพราะไม่ต้องเสียเวลาในการลองผิดลองถูกด้วยการใช้ CFD และการทดลอง ซึ่งมีราคาสูง

โดยทั่วไปแล้วทฤษฎี BEM จะใช้ข้อมูลคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศที่ทดลองในอุโมงค์ลมแบบ 2 มิติ ในการคำนวณ แต่เนื่องจากผลกระทบของการไหลแบบ 3 มิติ ของใบพัดที่กำลังหมุน (3D rotational effect) ทำให้ค่าคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดแตกต่างไปจากแพนอากาศ 2 มิติ ดังนั้น การคำนวณโดยใช้ค่าข้อมูลแพนอากาศ 2 มิติ จึงให้ผลการคำนวณที่ไม่สอดคล้องกับการทดลอง ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองการปรับแก้ค่าข้อมูลแพนอากาศ 2 มิติ ให้เป็นข้อมูลแพนอากาศใบพัดในระบบ 3 มิติ เพื่อจำลองผลกระทบของการไหลใน 3 มิติ เข้าไปในการคำนวณ

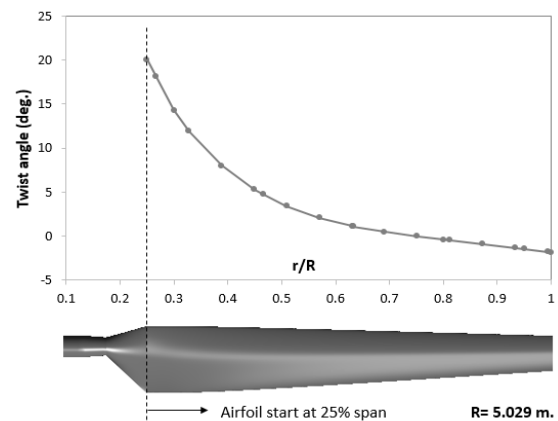
สำหรับบทความนี้จะใช้ CFD จำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กรุ่น NREL Phase VI เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับใบพัดกังหันลม รวมทั้งจะทำการประเมินหาค่ามุมปะทะ และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของแต่ละหน้าตัดใบพัดตลอดความยาวใบ ข้อมูลคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดที่ได้จาก CFD นี้จะนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรมเชิงทฤษฎี BEM เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะของกังหันลม และเพื่อใช้ศึกษาหาแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองการปรับแก้ค่าข้อมูลแพนอากาศจาก 2 มิติ ให้เป็นค่าข้อมูลแพนอากาศใบพัดใน 3 มิติ เพื่อปรับปรุงการคำนวณด้วยทฤษฎี BEM ให้มีความถูกต้องต่อไป

2. การคำนวณเชิงตัวเลข

2.1 ข้อมูลการทดลอง

การคำนวณ CFD จำลองการไหลผ่านกังหันลม จะทำการสอบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลการทดลองกังหันลมของ NREL (National Renewable Energy Laboratory) Phase VI ซึ่งทดลองในอุโมงค์ลมขนาดใหญ่ของ NASA Ames [1] กังหันลมตัวนี้ออกแบบโดย Giguere and Selig [2] เป็นกังหันลมขนาดเล็กชนิด 2 ใบพัด มีขนาดกำลังผลิต 19.8 kW โรเตอร์ (Rotor) เป็นแบบ Stall-regulated หน้าตัดใบพัดใช้แพนอากาศรุ่น S809 ตลอดความยาวใบ มีความสอบใบเชิงเส้น (Linear taper) รัศมีโรเตอร์ 5.029 เมตร รูปที่ 1 แสดงลักษณะรูปทรงและมุมบิด (twist angle) ตลอดความยาวใบพัด ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน [3]

สำหรับบทความนี้จะใช้ชุดข้อมูลการทดลองกังหันลมที่ทดสอบกังหันแบบ Upwind ใบพัดทำมุมเอนปลายใบ (tip pitch angle) 3 องศา ไม่ทำมุมโคน (0° cone angle) โรเตอร์ไม่ทำมุมสาย (0° yaw angle) และหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 72 RPM รายละเอียดต่างๆ ของการทดลองอยู่ใน Hand et al. [3] ส่วนข้อมูลการทดลองแพนอากาศรุ่น S809 ในระบบ 2 มิติแบบสถิตย์ จะใช้ข้อมูลการทดลองในอุโมงค์ลมของ Ohio State University (OSU) ที่เลขเรย์โนลด์ 1×10^6 [4]



รูปที่ 1 รูปทรงใบและมุมบิดตลอดความยาวใบพัดของกังหันลม NREL Phase VI

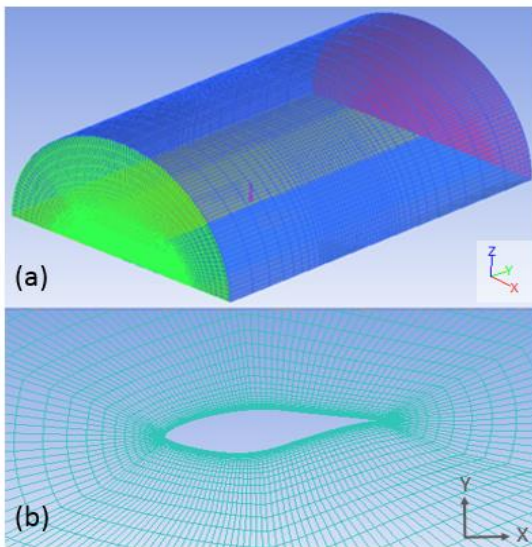
2.2 กริดการคำนวณ

ลักษณะโดเมนและกริดการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 2 เนื่องจากเป็นกังหันลมชนิด 2 ใบพัดที่สมมาตรกัน การคำนวณจึงลดเหลือเพียง 1 ใบ โดยกำหนดค่าที่ผิวสมมาตรเป็น periodic condition ปริมาตรคำนวณเป็นรูปครึ่งทรงกระบอก การสร้างกริดรอบแพนอากาศใบพัดกังหัน

CST-01

กริดที่ cell แรกควบคุมให้มีค่า $y^+ < 1$ สำหรับโดเมนการคำนวณกำหนดให้มีระยะห่างจากโรเตอร์ (ด้านหน้า x ด้านหลัง x ด้านข้าง) เป็น $6 \times 8 \times 5$ เท่าของรัศมีใบ จำนวนเอลิเมนต์ (element) ของปริมาตรการคำนวณทั้งหมด 2.2 ล้านเอลิเมนต์ กริดเอลิเมนต์ทั้งหมดเป็นแบบ Hexahedral สร้างด้วยโปรแกรม ANSYS ICEM

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังด้านหน้ากั้นเป็นความเร็วลมเข้า (velocity inlet) ผนังด้านหลังกั้นลมความดันออก (pressure outlet) ผนังโค้งด้านข้างกำหนดเป็น symmetry (หรือ Slip conditions) ส่วนโรเตอร์กั้นลมกำหนดให้ไม่มีการลื่นไถลที่ผนัง (no-slip wall)



รูปที่ 2 (a) โดเมนและกริดการคำนวณ (b) กริดรอบหน้าตัดแพนอากาศใบพัด

2.3 การคำนวณ CFD และแบบจำลองความปั่นป่วน

การคำนวณ CFD ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS Fluent ใช้กรรมวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE algorithm สมการโมเมนตัมและสมการแบบจำลองความปั่นป่วนประมาณค่าด้วยวิธี QUICK การไหลเป็นแบบไม่อัดตัว จำลองการไหลผ่านใบพัดกั้นลมที่กำลังหมุน ด้วยระบบ Rotating Reference Frame แบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) ที่ใช้ คือ $k - \omega$ SST [5] เนื่องจากให้ผลการทำนายการไหลที่มีการไหลแยกและการไหลภายใต้แรงดันต้าน (adverse pressure gradient) ได้ดี ด้วยเหตุที่แบบจำลองนี้ได้มีการจำกัดระดับค่าความเค้นเฉือนปั่นป่วน (turbulence shear stresses) ด้วยวิธีการจำกัดค่า eddy viscosity นั้นเอง

สำหรับสมการค่าความหนืดวนพา (eddy viscosity) ของแบบจำลอง $k - \omega$ SST [5] คือ

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho k}{\max(c_\mu \omega; SF_2)} \quad (1)$$

แฟคเตอร์ค่าคงที่ $c_\mu = 0.31$ เป็นค่ากำหนดมาตรฐานของแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่นี้สามารถปรับค่าได้ ซึ่งจากการศึกษาในบทความ [6] พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ตัวจำกัดความหนืดวนพาหรือค่าแฟคเตอร์ c_μ นี้ มีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์ที่ได้ สำหรับกรณีการไหลผ่านแพนอากาศนั้น ค่า c_μ อยู่ในช่วง $0.29 - 0.305$ สามารถให้ผลการคำนวณที่ดี ในการคำนวณนี้จะใช้ $c_\mu = 0.30$

3. ทฤษฎี Blade Element Momentum (BEM)

ทฤษฎี BEM ประกอบด้วย 2 ทฤษฎีย่อย คือ Momentum theory (MT) และ Blade Element Theory (BET) โดยเป็นการแบ่งระนาบการหมุนของใบพัดกั้นออกเป็นส่วนย่อยพื้นที่วงแหวนในแนวรัศมี (Annular Streamtubes) แล้วทำการวิเคราะห์การถ่ายเทมวลและโมเมนตัมในแต่ละพื้นที่วงแหวนนี้ ผนวกกับการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดใบพัดในแต่ละพื้นที่วงแหวนในลักษณะระนาบสองมิติ

พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดแพนอากาศใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถคำนวณแรงในแนวแกน (Thrust) dT และ แรงบิด (Torque) dQ ในแต่ละเอลิเมนต์ย่อยของใบ (Blade element) ที่มีความยาว dr ได้จากสมการ

$$dT = \frac{\rho V_0^2 (1-a)^2}{2 \sin^2 \phi} N_b (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c dr \quad (2)$$

$$dQ = \frac{\rho V_0 (1-a) \Omega r (1+a')}{2 \sin \phi \cos \phi} N_b (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) c r dr \quad (3)$$

เมื่อ C_l คือ สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift coefficient) และ C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) ของแพนอากาศ โดยส่วนใหญ่จะใช้ค่าที่ได้จากการทดลองแพนอากาศ 2 มิติ แบบสถิตย์ในอุโมงค์ลม ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันกับมุมปะทะและค่าเลขเรย์โนลด์ส ส่วน ϕ เป็นมุมลมเข้า (Inflow angle) คำนวณจากสมการ

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(1-a)V_0}{(1+a')r\Omega} \quad (4)$$

เมื่อ V_0 เป็นความเร็วลมที่ทางเข้า และ Ω เป็นความเร็วการหมุนของโรเตอร์

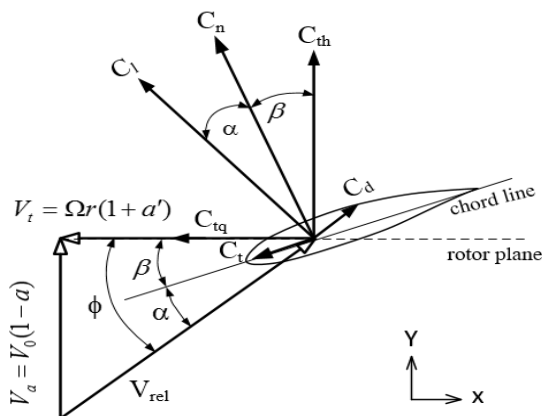
CST-01

เพื่อที่จะหาผลเฉลย จำเป็นต้องทราบค่า a และ a' เมื่อนำแรงในแนวแกน dT และแรงบิด dQ ที่ได้จากสอง ทฤษฎีมาเทียบค่ากัน กล่าวคือ $dT|_{BET} = dT|_{MT}$ และ $dQ|_{BET} = dQ|_{MT}$ จะได้ความสัมพันธ์

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\frac{cN_b}{2\pi r} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi)} + 1} \quad (5)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\frac{cN_b}{2\pi r} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)} - 1} \quad (6)$$

ค่า a คือ ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวแกน (Axial induction factor) และ a' คือ ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำเชิงมุม (Angular induction factor) ซึ่งจะใช้กระบวนการทำซ้ำ (iteration) ในการหาค่า

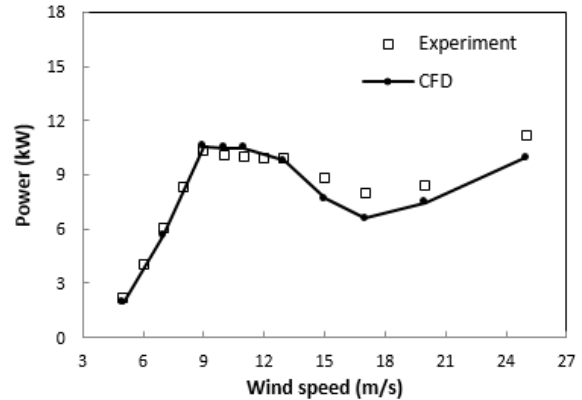


รูปที่ 3 แรงที่เกิดบนแผนอากาศใบพัด

4. ผลลัพธ์และการวิจารณ์

4.1 กำลังของกังหันลม

เพื่อให้แน่ใจว่าการคำนวณ CFD มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ จึงทำการสอบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลการทดลองกังหันลมที่ได้มาตรฐาน รูปที่ 4 แสดงผลการคำนวณกำลังเชิงกล (Mechanical power) ของโรเตอร์กังหันลม ที่ความเร็วลมต่างๆ ด้วย CFD เปรียบกับข้อมูลการทดลองของ NREL พบว่า ผลการคำนวณกำลังเชิงกลที่ได้มีความแม่นยำสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ช่วงความเร็วลมสูงตั้งแต่ 15 m/s ขึ้นไป การคำนวณ CFD ทำนายค่ากำลังได้ต่ำกว่าผลการทดลองเล็กน้อย



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังของกังหันลม

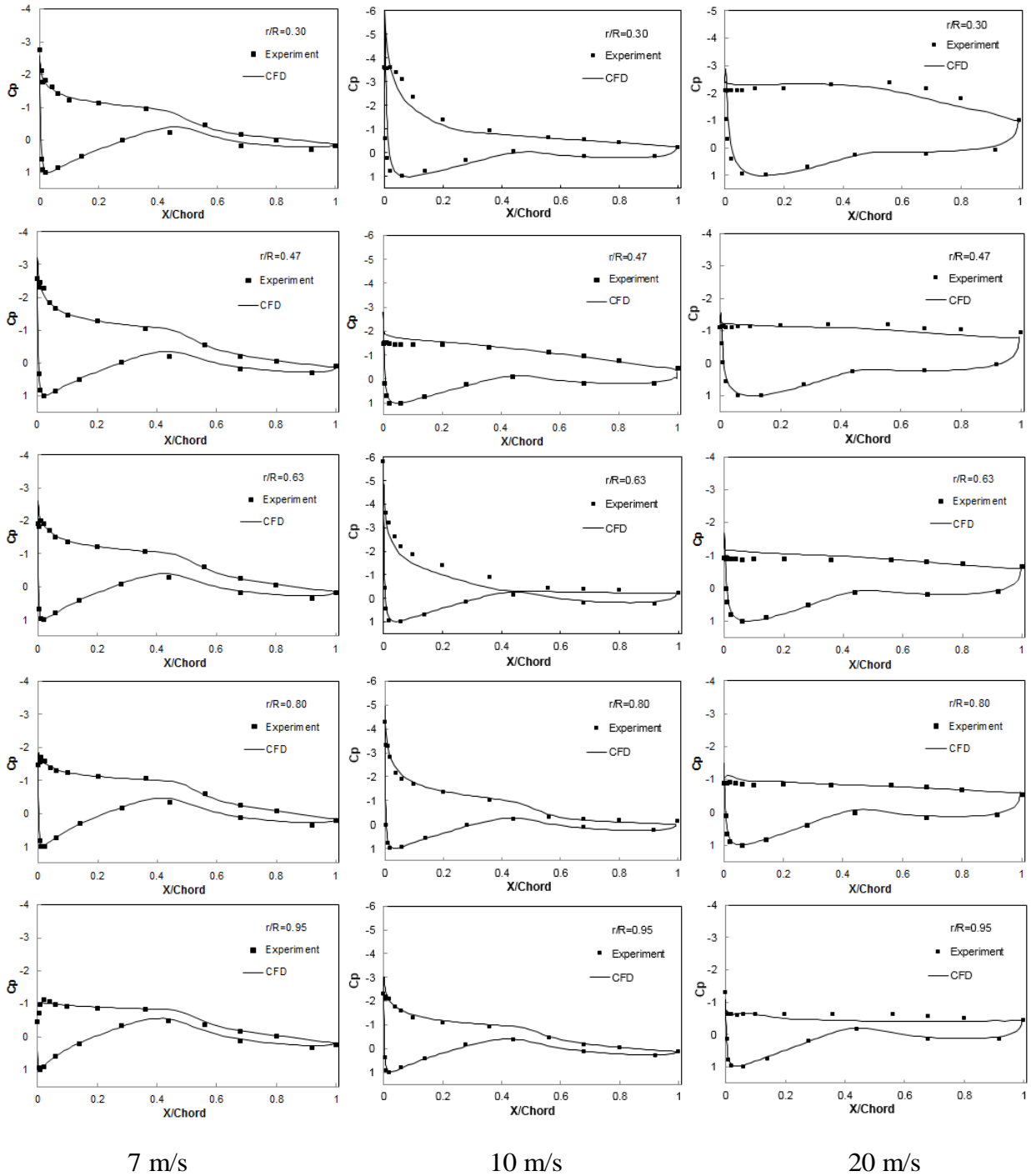
4.2 การแจกแจงความดัน (Pressure Distribution)

เพื่อที่จะสอบเทียบผลการจำลองการไหลด้วย CFD ที่ละเอียดขึ้น รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบความดัน C_p (Pressure coefficient) ในแต่ละแผนอากาศใบพัดที่ระยะ 30%, 47%, 63%, 80% และ 95% ของความยาวใบพัด (ระยะวัดอ้างอิงจากจุดหมุน) ที่ความเร็วลม 7 m/s, 10 m/s และ 20 m/s จะเห็นว่า การคำนวณ CFD สามารถทำนายลักษณะการแจกแจงความดันรอบแผนอากาศตลอดความยาวใบพัดสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองเป็นอย่างดี

4.3 ลักษณะเส้น Limiting streamline บนใบพัด

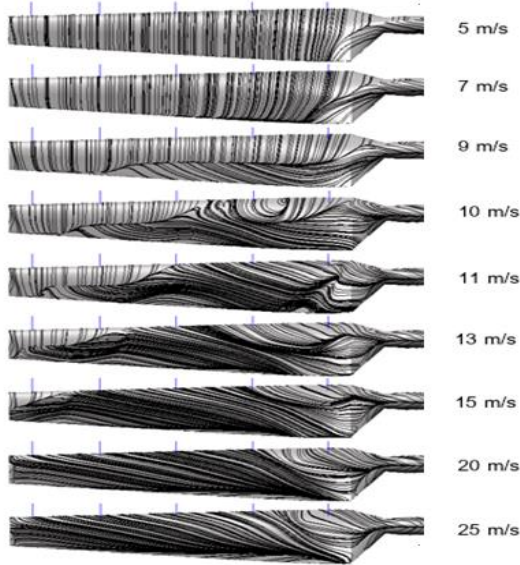
ลักษณะการไหลบนใบกังหันสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6 แสดงเส้น Limiting streamline ที่ผิวด้านบน (suction side) ของใบพัด โดยที่ความเร็วลม 5-7 m/s การไหลผ่านผิวด้านบนใบพัดจะเป็นลักษณะการไหลชิดผิว (attached flow) ไหลขนานในทิศจาก Leading edge ไป Trailing edge ตลอดความยาวใบพัด และมีการไหลในแนวรัศมี (radial flow) เล็กน้อยที่โคนใบ ที่ความเร็วลม 9 m/s เกิดการไหลแยกตัวจากผิว (separated flow) และการไหลแยกมีทิศทางการไหลไปในแนวรัศมีเนื่องจากอิทธิพลของแรงเหวี่ยง (centrifugal force) จากการหมุนของใบพัด และที่ช่วงระยะประมาณ 80% ของความยาวใบ ($r/R=0.8$) ขึ้นไปยังคงมีการไหลแบบชิดผิวตลอดหน้าตัดใบพัดอยู่ เมื่อความเร็วลมสูงขึ้น (10 m/s – 25 m/s) ตำแหน่งการไหลแยกจะคืบไปสู่อำนาจ Leading edge มากขึ้นเนื่องจากมุมปะทะที่สูงขึ้นตามความเร็วลม และบริเวณใกล้โคนใบจะเกิดการไหลแยกครอบคลุมทั่วแผนอากาศก่อนปลายใบ สำหรับที่ความเร็วลม 20 m/s ขึ้นไป จะเห็นว่า การไหลแยกได้ครอบคลุมตลอดทั้งความยาวใบพัด

CST-01



รูปที่ 5 เปรียบเทียบการแจกแจงความดันรอบแพนอากาศใบพัดที่ความเร็วลม 7 m/s, 10 m/s และ 20 m/s

CST-01



รูปที่ 6 เส้น Limiting streamline ที่ผิวด้านบนใบพัด

4.4 ค่าแรงยก แรงต้าน และมุมปะทะของแพนอากาศใบพัดจากการคำนวณ CFD

ผลเฉลยจากการจำลองการไหลผ่านกังหันลมด้วย CFD จะทำให้ได้ค่าแรงที่เกิดขึ้นตลอดความยาวใบในแต่ละความเร็วลม ดังนั้น ในแต่ละระยษะหน้าตัดใบพัดสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d) ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$C_l = C_{th} \cos(\phi) + C_{tq} \sin(\phi) \quad (7)$$

$$C_d = C_{th} \sin(\phi) - C_{tq} \cos(\phi) \quad (8)$$

C_{th} คือ สัมประสิทธิ์แรงในแนวแกน (Thrust force coefficient) และ C_{tq} คือ สัมประสิทธิ์แรงในทิศสัมผัสกับระนาบการหมุนของโรเตอร์ (Torque force coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนค่ามุมปะทะ (Angle of attack) α หาได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \phi - \beta = \tan^{-1}\left(\frac{V_a}{V_t}\right) - \beta \quad (9)$$

เมื่อ β เป็นมุมบิดใบ (local twist angle) รวมกับมุมเฝิน (global pitch angle) ส่วนมุมลมเข้า ϕ ประเมินหาจากความสัมพันธ์ของค่าความเร็วลมในแนวแกน (axial velocity; V_a) และความเร็วลมในแนวเส้นสัมผัสการหมุนของโรเตอร์ (tangential velocity; V_t)

ค่าความเร็วลมในแนวแกน (V_a) ขณะผ่านโรเตอร์ในแต่ละหน้าตัดใบพัด คำนวณหาด้วยวิธีการหาค่าความเร็วแนวแกนเฉลี่ยรอบพื้นที่วงแหวนในแนวรัศมี ความเร็วลม

ที่อ่านค่าได้จะเป็นฟังก์ชันกับระยะห่างจากโรเตอร์ในแนวแกน จากนั้นใช้การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ก็จะทำให้ได้ค่าความเร็วขณะผ่านโรเตอร์ ดูรายละเอียดใน [7] ส่วนค่าความเร็วลมในแนวเส้นสัมผัสการหมุน (V_t) ในแต่ละระยษะหน้าตัดใบพัด ใช้ $V_t = \Omega r$

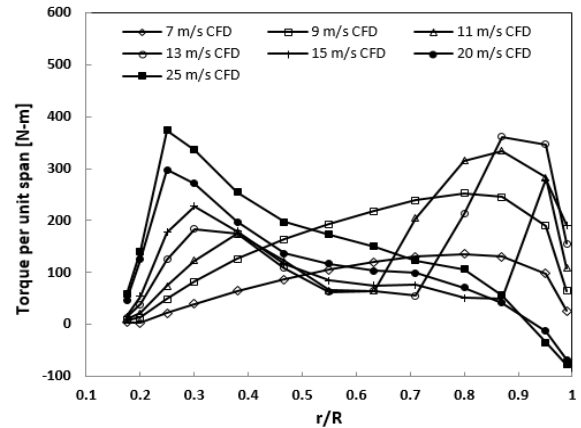
รูปที่ 7 และ 8 แสดงการเปรียบเทียบแรงทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศใบพัดจากการจำลองด้วย CFD เทียบกับข้อมูลการทดลองแพนอากาศ 2 มิติ แบบสถิตย์ โดยแสดงข้อมูลค่าแรงยกและแรงต้านที่เป็นฟังก์ชันกับมุมปะทะ ในแต่ละระยษะรัศมีใบ ในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าแพนอากาศใบพัดที่ระยษะต่ำกว่า 55% ของความยาวใบ ($r/R = 55\%$) นั้น ค่าแรงยกที่ได้มีความแตกต่างจากแรงยกจากแพนอากาศ 2 มิติ ก่อนข้างชัดเจน ซึ่งในกรณีแพนอากาศ 2 มิติ ที่มุมปะทะสูงกว่า 15 องศา จะเกิดการ stall และค่าแรงยกจะลดลงเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของแพนอากาศใบพัดนั้นแรงยกยังคงมีค่าสูงได้อีก และจะเกิดการ stall ที่มุมปะทะสูงกว่าอีกด้วย (หรือที่เรียกว่า เกิดพฤติกรรม Stall delay) สำหรับแพนอากาศใบพัดที่ระยษะ 80% (รวมทั้งระยษะใกล้เคียง) ทั้งแรงยกและแรงต้านจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแพนอากาศ 2 มิติ ส่วนที่บริเวณปลายใบที่ระยษะ $r/R = 95\%$ ขึ้นไปนั้น จะมีค่าแรงยกน้อยกว่าค่าแพนอากาศ 2 มิติ เนื่องจากอิทธิพลผลการหมุนวนของอากาศที่ปลายใบ (tip vortex) เช่นเดียวกับที่บริเวณระยษะ 25% และ 30% ซึ่งได้รับอิทธิพลของการไหลหมุนวนของอากาศที่บริเวณช่วงต่อโคนใบกับตามยี่ด (root vortex) ทำให้แรงยกช่วงมุมปะทะต่ำจะน้อยกว่าค่าแรงยกจาก 2 มิติ และจะสังเกตเห็นว่าความชันกราฟช่วง Linear lift จะต่ำกว่าความชันกราฟของหน้าตัดใบพัดที่ห่างจากระยษะดังกล่าวออกไปอีกด้วย โดยภาพรวมแล้วจะเห็นว่า ค่าแรงยกของแพนอากาศใบพัดจะมีค่าสูงที่ระยษะใกล้โคนใบ และมีค่าลดลงตามระยษะรัศมีที่ห่างออกไป ส่วนกรณีของแรงต้าน ในรูปที่ 8 ค่าแรงต้านของแพนอากาศใบพัดที่บริเวณใกล้โคนใบจะมีค่าสูงกว่าค่าของแพนอากาศ 2 มิติ

4.5 ลักษณะการกระจายแรงบิดตลอดความยาวใบ

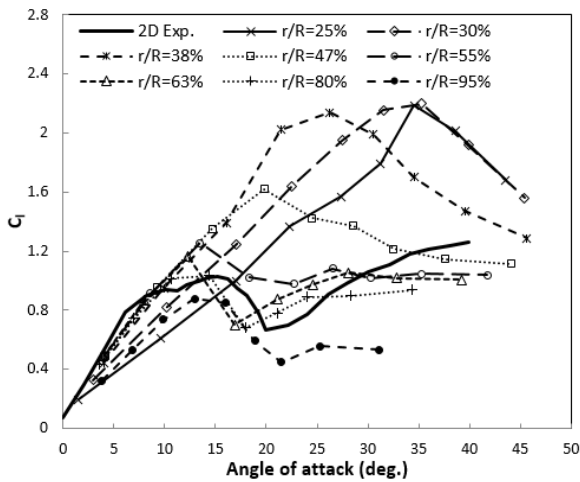
พิจารณาการกระจายแรงบิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในแนวยาวใบที่ความเร็วลมต่างๆ ในรูปที่ 9 พบว่า ที่ความเร็วลม 7-9 m/s ซึ่งการไหลยังคงชนิดผิวและแรงยกส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสัมพันธ์เชิงเส้นกับมุมปะทะ (ช่วง linear lift) การกระจายแรงบิดมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามระยษะ

CST-01

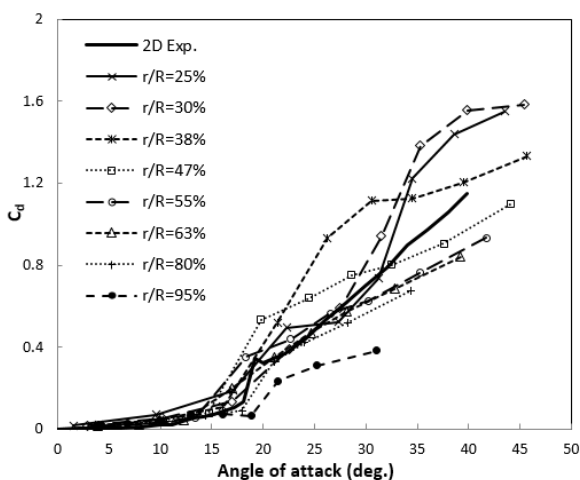
รัศมีที่เพิ่มขึ้นจากโคนใบสู่ปลายใบจนถึงระยะประมาณ $r/R=87\%$ จากนั้นแรงบิดจะมีแนวโน้มลดลงเข้าหาศูนย์ที่ปลายสุดใบ เมื่อความเร็วลม 11-15 m/s แรงบิดในช่วงระยะบริเวณกลางใบจะลดลง เนื่องจากแรงยกที่ลดลงจากการ stall ซึ่งเกิดการไหลแยกตั้งแต่ leading edge ของแพนอากาศ ในขณะที่แรงบิดจะมีค่าสูงในบริเวณพื้นที่ที่ยังคงเป็นการไหลชนิดผิวอยู่ ที่ความเร็วสูง 20-25 m/s แรงบิดจะสูงบริเวณ $r/R=25\%$, $r/R=30\%$ และมีค่าลดลงตามระยะรัศมีจนกระทั่งมีค่าติดลบในช่วงระยะ $r/R=90\%$ ขึ้นไป ซึ่งที่ความเร็วสูงนี้ การไหลแยกครอบคลุมตลอดความยาวใบ แต่ละหน้าตัดใบเกิดการ stall และการไหลแยกที่สูงมาก กำลังของกังหันลมจะลดลง ซึ่งเป็นลักษณะของกังหันลม Stall-regulated นั้นเอง



รูปที่ 9 แสดงแรงบิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในแนวยาวใบ



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศใบพัดที่ระยะต่างๆ ตามแนวยาวใบเปรียบเทียบกับแพนอากาศ 2 มิติ



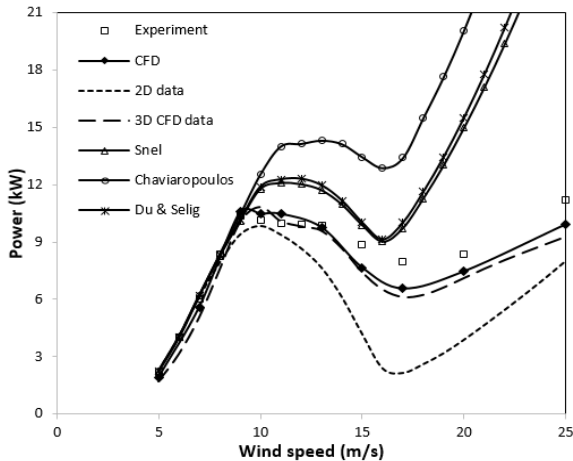
รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแพนอากาศใบพัดที่ระยะต่างๆ ตามแนวยาวใบเทียบกับแพนอากาศ 2 มิติ

4.6 การทำนายประสิทธิภาพกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM ร่วมกับข้อมูลแพนอากาศใบพัด 3 มิติ จาก CFD

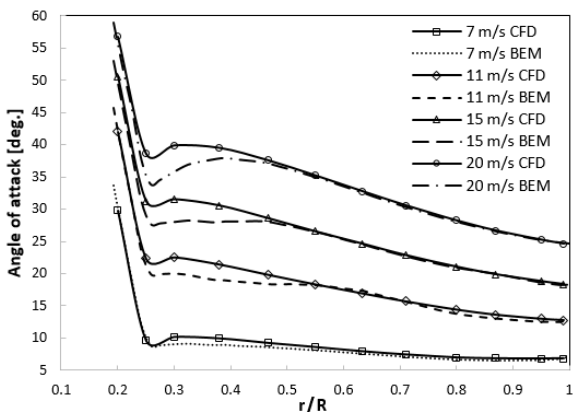
ข้อมูลมุมปะทะ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ($C_{L,3D}$) และแรงต้าน ($C_{d,3D}$) ของแพนอากาศใบพัดที่ได้จากการคำนวณ CFD (ในหัวข้อ 4.4) จะถูกนำมาใช้ร่วมกับทฤษฎี BEM โดยที่ไม่ใช่แบบจำลองการปรับแก้ tip loss หรือแบบจำลอง stall delay เพิ่มเติมในการคำนวณ เนื่องจากข้อมูล $C_{L,3D}$ และ $C_{d,3D}$ ของแพนอากาศใบพัด เป็นค่าจากพฤติกรรมกรไหลแบบ 3 มิติ ในตัวอยู่แล้ว ซึ่งข้อมูลแพนอากาศใบพัดที่ทำการประเมินจาก CFD จะมี 12 หน้าตัดแพนอากาศใบ คือ ที่ระยะ $r/R=0.20, 0.25, 0.30, 0.38, 0.47, 0.55, 0.63, 0.71, 0.80, 0.87, 0.95$ และ 0.99 แต่ในการคำนวณด้วยโปรแกรมเชิงทฤษฎี BEM จะแบ่งใบพัดออกเป็น 50 หน้าตัด ดังนั้นข้อมูลแพนอากาศใบพัดที่ระยะรัศมีใดๆ จะใช้การประมาณค่าด้วย Cubic spline interpolation สำหรับโปรแกรมเชิงทฤษฎี BEM นี้จะเขียนการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

ผลการคำนวณกำลังเชิงกลของโรเตอร์กังหันลมโดยทฤษฎี BEM ที่ใช้ข้อมูลแพนอากาศใบพัด 3 มิติ จาก CFD แสดงดังรูปที่ 10 (ป้ายชื่อ 3D CFD data) จะเห็นว่าทำนายค่ากำลังกังหันลมได้ใกล้เคียงสอดคล้องกับค่าจากการคำนวณด้วย CFD เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้ น่าจะมาจากการที่ทฤษฎี BEM คำนวณมุมปะทะได้แตกต่างจากค่ามุมปะทะจาก CFD ที่ความเร็วเดียวกัน โดยเฉพาะในช่วงระยะโคนใบ $r/R=25\%$ ถึง $r/R=47\%$ ดังรูปที่ 11 เมื่อมุมปะทะต่างกันจึงมีผลต่อแรงยกและแรงต้านที่อ่านค่าได้ ส่งผลให้คำนวณค่ากำลังโรเตอร์ได้ไม่เท่ากับค่าจาก CFD

CST-01



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังของกังหันลมด้วยทฤษฎี BEM



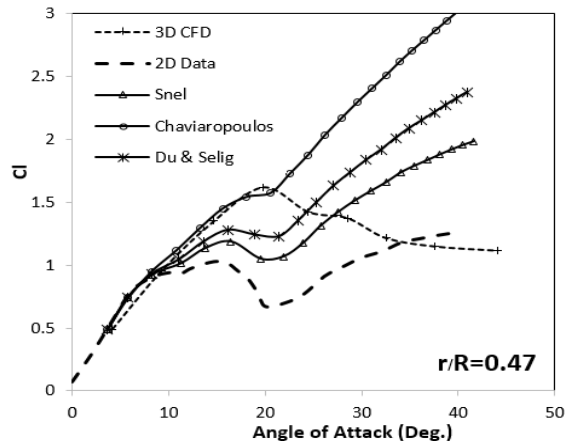
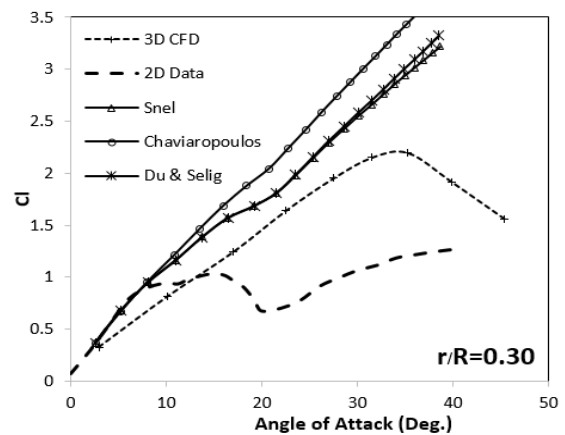
รูปที่ 11 มุมปะทะที่เกิดขึ้นบนใบกังหันจากการคำนวณด้วย BEM เปรียบเทียบกับการคำนวณจาก CFD

4.7 การทดสอบแบบจำลอง Stall delay

การคำนวณด้วยทฤษฎี BEM เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องขึ้น จำเป็นต้องปรับแก้ค่าข้อมูลแพนอากาศ 2 มิติ ให้เป็นค่าข้อมูลแพนอากาศใบพัด 3 มิติ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบโปรแกรมเชิงทฤษฎี BEM ที่มี การปรับแก้ค่าข้อมูลแพนอากาศ 2 มิติ ด้วยแบบจำลองการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip loss correction) เพื่อใช้ปรับแก้ผลกระทบอันเนื่องมาจากรูปทรงใบที่มีความยาวจำกัด (finite blade) และแบบจำลอง Stall delay จำลองผลกระทบจากการไหลใน 3 มิติ ของใบพัดที่กำลังหมุน

ในการคำนวณจะใช้แบบจำลอง Tip loss ที่นำเสนอโดย Shen et al. [8] ร่วมกับแบบจำลอง stall delay ซึ่ง จะทำการทดสอบทั้งหมด 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลอง Snel et al. [9], Chaviaropoulos and Hansen [10] และ Du and Selig [11] รวมทั้งกรณีไม่ใช้แบบจำลอง stall delay (กล่าวคือ ใช้ข้อมูลแพนอากาศ 2 มิติ)

ผลการคำนวณกำลังกังหันลม แสดงในรูปที่ 10 ซึ่งพบว่า ที่ความเร็วลมต่ำ 5-9 m/s แบบจำลองทั้ง 3 รวมทั้ง การคำนวณโดยไม่ใช้แบบจำลอง stall delay (ป้ายชื่อ 2D data) ให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับการทดลองได้ดี เนื่องจากเป็นช่วงที่มุมปะทะตลอดความยาวใบพัดยังไม่สูงนัก (มุมปะทะส่วนใหญ่อยู่ในช่วง linear lift) ที่ความเร็วลมสูงกว่า 9 m/s ขึ้นไป การคำนวณด้วยค่าข้อมูลแพนอากาศ 2 มิติ ให้กำลังโรเตอร์ที่ต่ำกว่าการทดลอง ส่วนแบบจำลองทั้ง 3 ทำนายค่ากำลังโรเตอร์กังหันได้สูงกว่าการทดลอง โดยเฉพาะเมื่อความเร็วลมสูงกว่า 17 m/s ขึ้นไป สังเกตว่า เส้นกราฟมีลักษณะพุ่งสูงขึ้น สาเหตุมาจากการที่แบบจำลองจำลองแรงยกในแต่ละระยะหน้าตัดใบพัดสูงเกินไป โดยเฉพาะในช่วงบริเวณใกล้โคนใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศใบพัดที่ระยะ 30% และ 47% ของความยาวใบ สังเกตว่า ที่มุมปะทะสูง ค่าแรงยกจากแบบจำลองต่างๆ มีลักษณะสูงขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่แรงยกจาก CFD มีลักษณะลู่เข้าหาค่าแรงยก 2 มิติ ด้วยเหตุนี้ทำให้คำนวณกำลังกังหันลมได้สูงเกินไปในช่วงความเร็วลมสูง



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศใบพัดที่ระยะ 30% และ 47% ของความยาวใบ

CST-01

5. สรุปผล

วิธีการจำลองการไหลของอากาศผ่านใบพัดกังหันลมที่กำลังหมุน ด้วย CFD ที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลและคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับใบพัดได้เป็นอย่างดี ข้อมูลจากการจำลอง CFD เมื่อทำการประเมินค่ามุมปะทะ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของแพนอากาศใบพัดในแต่ละระยะรัศมีตลอดความยาวใบ แล้วนำข้อมูลแพนอากาศใบพัดที่ได้ไปใช้ร่วมกับโปรแกรมเชิงทฤษฎี BEM เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะของกังหันลม พบว่า ทำนายค่ากำลังของกังหันลมได้สอดคล้องใกล้เคียงกับค่าที่ทำนายได้จาก CFD เป็นอย่างดี แสดงให้เห็นว่า การคำนวณด้วยทฤษฎี BEM มีศักยภาพที่ดี หากสามารถพัฒนาแบบจำลองการปรับแก้ค่าข้อมูลแพนอากาศ 2 มิติ ให้เป็นค่าข้อมูลแพนอากาศใบพัดใน 3 มิติ ที่ถูกต้องได้ ก็จะช่วยให้การคำนวณมีความแม่นยำขึ้น ซึ่งงานวิจัยต่อไปจะนำข้อมูลจากการคำนวณ CFD ที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงแบบจำลอง stall delay ต่อไป เนื่องจากแบบจำลองบางส่วนที่ได้ทำการทดสอบในบทความนี้ยังให้ผลการจำลองแรงยกและแรงต้านที่ไม่สอดคล้องกับผลจากการคำนวณ CFD เท่าที่ควร

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Schreck S. (2002). The NREL Full-Scale Wind Tunnel Experiment, Wind Energ. 2002; Vol.5, pp. 77–84 (DOI: 10.1002/we.72)
- [2] Giguere P, Selig MS. (1999). Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor. NREL/SR-500-26173, Colorado.
- [3] M. M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh et al. (2001). Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns, NREL/TP-500-29955. NREL.
- [4] Reuss Ramsay, R.; Hoffman, M.J.; Gregorek, G.M. (1995). Effects of Grit Roughness and Pitch

Oscillations on the S809 Airfoil. NREL/TP-442-7817. Golden, CO: NREL.

[5] Menter, F. R., Kuntz, M., Langtry, R., (2003). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. In: Hanjali_c, K., Nagano, Y., Tummers, M. (Eds.), Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, pp. 625-632.

[6] วิโรจน์ แบบพิมาย และ ทวีช จิตรสมบุญ (2554) การเพิ่มความแม่นยำของการคำนวณการไหลผ่านแพนอากาศกังหันลม ด้วยการปรับระดับความหนืดวนพา การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกระบี่

[7] Guntur, S.; Sørensen, N.N. (2014a). An evaluation of several methods of determining the local angle of attack on wind turbine blades. Journal of Physics: Conference Series 555(1); p.012,045.

[8] Shen WZ, Mikkelsen NR, Sørensen JN, Bak C. (2005). Tip loss corrections for wind turbine computations. Wind Energy; 8(4):457e75.

[9] Snel H, Houwink B, Bosschers J, Piers WJ, van Bussel GJW, Bruining A. (1993). Sectional prediction of 3-D effects for stalled flow on rotating blades and comparison with measurements. EWEC 1993, Travemunde, Germany, 395–399.

[10] Du Z, Selig M. A3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance predictions. (1998). AIAA-98-0021.

[11] Chaviaropoulos PK, Hansen MOL. (2000) Investigating three-dimensional and rotational effects on wind turbine blades by means of a quasi-3D Navier–Stokes solver. Journal of Fluids Engineering, Vol. 122: 330–336.