

การใช้เทคนิคการวัดของไหลด้วยแสงเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทางอากาศพลศาสตร์ที่มีต่อใบพัดกังหันลมแนวแกนนอนในแนวกางใบ

ติณณภพ แพงผม^{1*}, จิระศักดิ์ พุกคำ²

^{1*}สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล

²สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Email : Tinnapob.phe@mahidol.ac.th

Received: May 7, 2021

Revised: Jun 13, 2021

Accepted: Jun 16, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาตัวแปรทางอากาศพลศาสตร์ต่อใบพัดกังหันลมในแนวกางใบ ตัวแปรที่สนใจในงานวิจัยนี้คือมุมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลมแนวแกนนอนในขณะที่ใบพัดหมุน กังหันลมแนวแกนนอนที่นำมาทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ 2.4 เมตร และมีจำนวนใบพัด 3 ใบ ใบพัดแต่ละใบจะประกอบไปด้วยแพนอากาศ 4 ชนิดประกอบไปด้วย DU91-W2-250 DU93-W-210 NACA63-618 และ NACA63-215 รายละเอียดของความเร็วลมจะถูกวัดด้วย Laser Doppler Velocimetry (LDV) ภายในอุโมงค์ลม หลังจากได้รายละเอียดของความเร็วลมบนพื้นผิวของใบพัดกังหันลมสามารถนำไปหาค่ามุมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลม ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้พบว่ามุมปะทะที่อัตราความเร็วปลายใบต่ำจะมีค่าสูงกว่ามุมปะทะที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสม (Optimum tip speed ratio) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎี BEM จะพบว่าค่ามุมปะทะใกล้เคียงกันในช่วงกลางใบถึงปลายใบ ส่วนบริเวณโคนใบพัดมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากความซับซ้อนของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) บริเวณโคนใบพัดซึ่งทฤษฎี BEM ไม่อาจที่คำนวณได้ การคำนวณการหมุนวนบนผิวใบพัด (Circulation) กังหันลมในแนวกางใบ (Spanwise direction) ให้ผลลัพธ์คือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่จะตกลงอย่างรวดเร็ว บริเวณปลายใบเนื่องจากการก่อตัวของ tip vortex

คำสำคัญ : กังหันลมแนวแกนนอน, มุมปะทะ, การไหลวน, อากาศพลศาสตร์

Sing Laser Doppler Velocimetry to Study the Effect of Aerodynamic Factors for Horizontal Axis Wind Turbine Blade in Spanwise Direction

Tinnapob Phengpom^{1*}, Jirasak Pukdum²

^{1*} Institute for Innovative Learning, Mahidol University

² Department of Facility Management, Faculty of Architecture and Design, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Email : Tinnapob.phe@mahidol.ac.th^{*}

Received: May 7, 2021

Revised: Jun 13, 2021

Accepted: Jun 16, 2021

Abstract

This research aimed to study aerodynamic factors for wind turbine blade in spanwise direction. This research focused on the angle of attack and circulation on the horizontal axis of the wind turbine (HAWT) near the blade surface during rotating condition. The horizontal axle wind turbine has a rotor diameter of 2.4 meters with 3 blades. Each blade comprises four airfoils (DU91-W2-250, DU93-W-210, NACA63-618, and NACA63-215). Detail measurements of velocity on the blade surface were measured in a wind tunnel by Laser Doppler Velocimetry (LDV). The detail measurements of velocity can be used to find the angle of attack and the circulation on the wind turbine blade surface. The results showed that the low tip speed ratio has a high angle of attack more than the optimum tip speed ratio. When comparing with BEM theory, the results show agreement from midspan to outboard, but the inboard is noticeably different. It corresponds to complicated flow at the inboard which BEM theory cannot be the calculation. The circulation increases when approaching outboard, but the circulation decreases rapidly at the tip of the blade. It corresponds to the effect of tip vortex.

Keywords : Horizontal axis wind turbine, Angle of attack, Circulation, Aerodynamic

บทนำ

ในอดีตพลังงานในการขับเคลื่อนด้านอุตสาหกรรมของแต่ละประเทศขึ้นอยู่กับพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก แต่ปัจจุบันได้มีการนำพลังงานทดแทนจากธรรมชาติมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลกันอย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากผลเสียจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล อาทิ เช่น ปัญหาปรากฏการณ์โลกร้อน ปัญหามลพิษ และปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิง เป็นต้น ประเทศไทยได้มีนโยบายนำพลังงานทดแทนมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี พ.ศ. 2551-2565 ประเทศไทยมีเป้าหมายการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายโดยการเพิ่มพลังงานทดแทนให้ถึง 20% ภายในปี พ.ศ. 2565 ซึ่งต้องการพลังงานจากลมถึง 800 เมกะวัตต์ [1] ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตพลังงานขั้นสุดท้ายจากพลังงานลมได้ไม่ถึงครึ่งหนึ่งที่ต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้จึงเป็นหนึ่งในงานวิจัยเพื่อค้นคว้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมและนำผลการศึกษาไปต่อยอดในการทำกังหันลมที่เหมาะสมกับประเทศไทย โดยปกติกังหันลมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันก็คือ กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) และกังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) [2] การศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมในประเทศไทยในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมอย่างจริงจังยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้ทำการพัฒนาและสาธิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วต่ำ ผลการวิจัยทำให้ประเทศไทยได้ต้นแบบกังหันลมแนวแกนนอนในการผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ที่เหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3-4 เมตรต่อวินาที [3] และ นอกจากนี้ยังมีโครงการวิจัยพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบขนาด 50 กิโลวัตต์ การทดสอบพบว่ากังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาทีและได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 50

กิโลวัตต์ที่ความเร็วลม 10.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะได้กังหันลมที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้ 30 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูงสุดสำหรับลมเฉลี่ยในประเทศไทย [4] การศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมในประเทศไทยต่างประเทศสำหรับกังหันลมแนวแกนนอนมีงานวิจัยที่โดดเด่น คือการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของอากาศโดยใช้อุปกรณ์ Laser Doppler velocimetry หรือ LDV [5, 6, 7] การวิจัยพบว่ากระแสลมที่กระทำกับใบพัดกังหันลมประกอบไปด้วยความเร็ว 3 ทิศทางอันได้แก่ Axial, Tangential และ Span-wise velocities นอกจากนี้การทดสอบยังค้นพบว่าความเร็วลมในแนวแกนใบ (Span-wise velocity) เกิดขึ้นมาจากแรงหนีศูนย์กลางขณะที่ใบพัดกังหันลมหมุน อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยพยายามพัฒนาโรเตอร์ของกังหันลมโดยการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงกระแสลม เปรียบเทียบกับการคำนวณทางด้านตัวเลขโดยใช้ทฤษฎี Blade Element Momentum (BEM) ผลการทดสอบและการคำนวณทางด้านตัวเลขมีความแตกต่างกันเนื่องจากความซับซ้อนของความเร็วลัพท์ 3 มิติที่เกิดจากการหมุนของใบพัด [8]

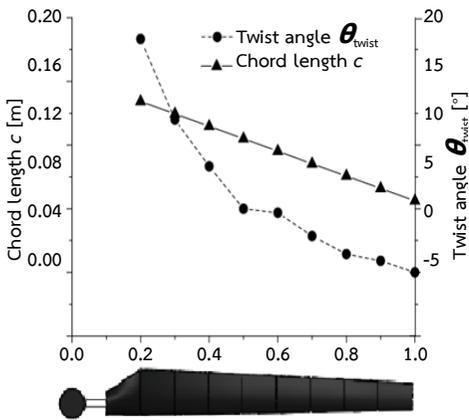
งานวิจัยที่นำเสนอใช้นำข้อมูลการไหลของอากาศที่ตรวจวัดได้จาก Laser Doppler velocimetry มาวิเคราะห์มุมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลมว่ามีพฤติกรรมอย่างไรตามตลอดแนวแกนใบจากบริเวณโคนใบถึงปลายใบ

อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นกังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) ชนิดแบบ 3 ใบพัด โรเตอร์ของกังหันลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตรติดตั้งในรูปที่ 1 ในแต่ละใบพัดจะประกอบไปด้วยแพนอากาศ 4 ชนิด (DU91-W2-250 DU93-W-210 NACA63-618 และ NACA63-215) แพนอากาศทั้ง 4 ชนิดทำมาจากโพลียูรีเทน รูปร่างของใบพัดออกแบบใช้

ทฤษฎี Blade Element Momentum (BEM) ตัวใบพัดมีการบิดและเร็วที่ละนิดจนถึงปลายใบ ตำแหน่งของโคนใบพัดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง $r/R = 0.1$ แพนอากาศทั้ง 4 ชนิดจะวางตำแหน่งตามแกนทางใบพัด ตำแหน่งของแพนอากาศซึ่งเริ่มต้นที่ตำแหน่ง $r/R = 0.2$ โดยใช้ DU91-W2-250 ($r/R = 0.2-0.3$) DU93 W-210 ($r/R = 0.4-0.5$) NACA63-618 ($r/R = 0.6-0.8$) และ NACA63-215 ($r/R = 0.9-1.0$) ตามลำดับ

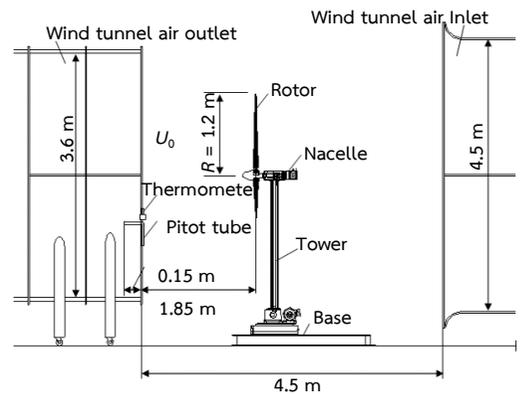
การกระจายมุมบิดและความยาวคอร์ดของใบพัดจะเห็นว่าลักษณะของใบพัดที่ใกล้โคนจะมีมุมบิดมากและมีขนาดความยาวคอร์ดมากด้วย มุมบิดของใบพัดจะค่อยๆ บิดน้อยลงและค่อยๆ ลดความยาวคอร์ดลงทำให้ใบพัดมีลักษณะเรียวปลาย



รูปที่ 1 การกระจายมุมบิดและความยาวคอร์ด

รูปที่ 2 แสดงลักษณะภายนอกและภายในของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ อุโมงค์ลมเป็นชนิดไหลวน (Circular Wind Tunnel) ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมิเอะ ประเทศญี่ปุ่น บริเวณด้านในอุโมงค์ลมจะมีพื้นที่ทดสอบซึ่งเป็นลักษณะเปิดโล่ง ช่องทางออกของกระแสลมมีลักษณะเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.6 เมตร และ ช่องทางเข้ากระแสลมมีลักษณะเป็น

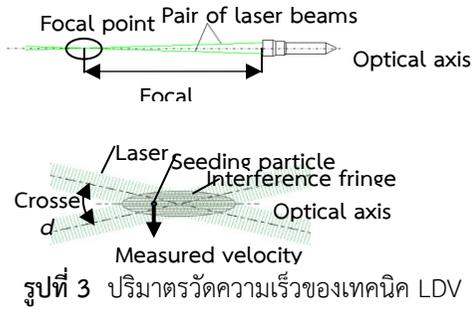
สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 4.5 เมตร x ยาว 4.5 เมตร อุโมงค์ลมใช้พัดลมกำลัง 400 กิโลวัตต์ในการผลิตกระแสลมโดยสามารถปรับความเร็วกระแสลมได้สูงสุดถึง 30 เมตรต่อวินาที โรเตอร์ถึงช่องทางออกของกระแสลมมีระยะ 1.8 เมตร ความเร็วสามารถวัดค่าได้ด้วยท่อปีโตต์ งานวิจัยในครั้งนี้ใช้กระแสลมคงที่ 7 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของความปั่นป่วนน้อยกว่า 0.5% การหมุนของใบพัดควบคุมด้วยเซอร์โวมอเตอร์



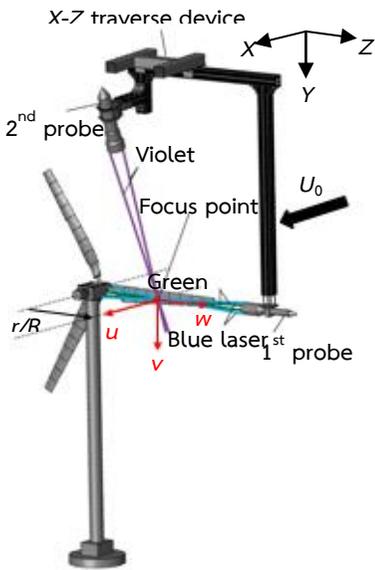
รูปที่ 2 แสดงภายนอกและภายในอุโมงค์ลม

สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมในอุโมงค์ลมจะใช้ Laser Doppler Velocimetry (LDV) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดความเร็วของลมชนิดหนึ่งที่ใช้ประโยชน์ธรรมชาติที่เรียกว่าปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect) ข้อดีของการวัดความเร็วด้วย LDV คือระบบสามารถสร้างปริมาตรที่ใช้ในการวัดความเร็ว (Measuring volume) โดยการตัดกันของเลเซอร์สองเส้นที่มีความยาวคลื่นเท่ากัน (Pair of laser beams) ที่ตำแหน่งโฟกัส (Focal length)

ระบบ LDV จะไม่มีการรบกวนการไหลในปริมาตรของ Measuring volume ในขณะที่วัด นอกจากนี้ อุณหภูมิ ความดัน และข้อจำกัดทางกายภาพไม่สามารถส่งผลกระทบต่อกรวัดด้วยวิธี LDV การสร้างปริมาตรกรวัดและลักษณะของปริมาตรกรวัดแสดงดังรูปที่ 3

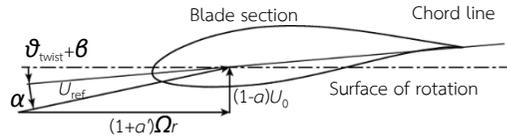


สำหรับระบบ LDV ที่จะใช้ในการวัดส่วนประกอบของความเร็วลม (Velocity components) ในแกน X Y และ Z บริเวณผิวของใบพัดนั้นต้องใช้หัวเลเซอร์ LDV 2 หัวติดตั้งในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้งดังรูปที่ 4 งานวิจัยนี้เพื่อที่จะสามารถวัดส่วนประกอบความเร็วใน 3 แกนพร้อม ๆ กันจึงประยุกต์ใช้หัวเลเซอร์ 2 หัวพร้อมกับใช้คู่ของแสงเลเซอร์ 3 คู่ ในการหาส่วนประกอบความเร็วในแต่ละแกนหัวเลเซอร์จะติดตั้งบนอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบ X-Z มุมหมุนของโรเตอร์ (Azimuth angle) สามารถตรวจวัดได้อย่างแม่นยำโดยใช้ single reset pulse



ผลการวิจัย

การคำนวณมุมปะทะทั้งจากวิธีการทดสอบจาก LDV และการคำนวณจากทฤษฎี BEM จะนำมาเปรียบเทียบที่สภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ ($\lambda = 3.7$) และสภาวะสภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสม ($\lambda = 5.2$) ซึ่งเป็นสภาวะความเร็วปลายใบที่กักหันลมให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด คือ 0.43 รูปที่ 5 แสดงแผนภาพภาคตัดขวางใบพัด จากรูปจะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและสามเหลี่ยมความเร็ว (Velocity triangle)



มุมปะทะ α สามารถหาจากสมการ

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{(1-a)U_0}{(1+a')\Omega r} \right] - (\theta_{\text{twist}} + \beta) \quad (1)$$

เมื่อ α = มุมปะทะ [°]

θ_{twist} = มุมบิดของใบพัดที่ตำแหน่งใดๆ [°]

β = มุมพิทช์ (= -2) [°]

a = Axial induced factor [-]

a' = Tangential induced factor [-]

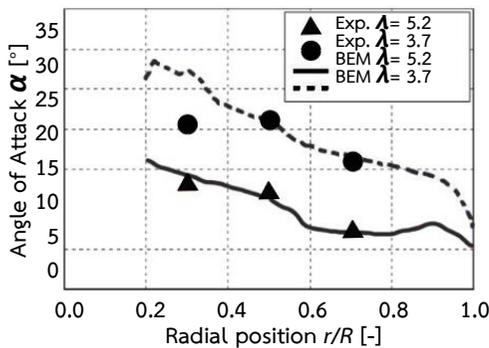
Ω = ความเร็วเชิงมุม (1/s)

r = รัศมี [m]

U_0 = กระแสลมหลัก (= 7) [m/s]

รูปที่ 6 แสดงมุมปะทะจากข้อมูลการวัดโดย LDV ที่ระยะ $r/R = 0.3$ 0.5 และ 0.7 และมุมปะทะจากทฤษฎี BEM ที่ระยะ $0.2 < r/R < 1.0$ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามุมปะทะในสภาวะทำงานที่สภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ ($\lambda = 3.7$) จะมีค่าสูงกว่าสภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสม

($\lambda = 5.2$) เนื่องจากมุมปะทะที่สูงทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศบนผิวใบพัดเป็นวงกลม (Vortex) ส่งผลให้เกิด stall อย่างรุนแรงในสภาวะนี้ เมื่อพิจารณา มุมปะทะที่ระยะ $r/R = 0.5$ และ 0.7 เกือบจะมีค่าเท่ากับค่าการคำนวณจากทฤษฎี BEM ซึ่งเราสามารถบอกได้ว่าทฤษฎี BEM สามารถพยากรณ์มุมปะทะได้อย่างคร่าวๆ จากช่วงกลางใบพัดถึงปลายใบพัด ระยะ $r/R = 0.3$ ทฤษฎี BEM ไม่สามารถคำนวณได้ถูกต้องเนื่องจากการไหลแบบซับซ้อน (Turbulent flow) ของความเร็วลัพท์ 3 มิติในสภาวะการหมุนจริงของกังหันลม และบริเวณโคนใบจะมีผลกระทบจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) โดยมีผลต่อกระแสลมในทิศทางแนวแกนใบพัด (Span-wise direction) ทฤษฎี BEM สามารถคำนวณความเร็วลัพท์ได้เพียง 2 มิติเท่านั้น



รูปที่ 6 มุมปะทะ

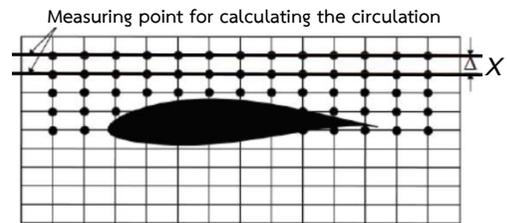
การไหลวนบนผิวใบพัดกัณฑ์ลมสามารถคำนวณได้จากสมการความเร็วเหนี่ยวนำดังสมการที่ 2

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{\partial(1/\Delta v)}{\partial x} \right)^{-1} \quad (2)$$

เมื่อ Γ = การไหลวนบนผิวใบพัด [m^2/s]
 v = ความเร็วสัมผัสเหนี่ยวนำ [m/s]
 X = ตำแหน่งในระนาบแนวแกน X [m]

ในการคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดจะใช้ข้อมูลจากการวัดความเร็วลมจาก LDV โดยการคำนวณจะต้องตั้งขอบเขตพื้นที่ควบคุม (Control volume) ดังรูปที่ 7

จุดสีดำในรูปแสดงถึงตำแหน่งการวัดจาก LDV ส่วนเส้นสีดำแสดงถึงตำแหน่งการวัดที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2 จะได้ผลของการคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดได้

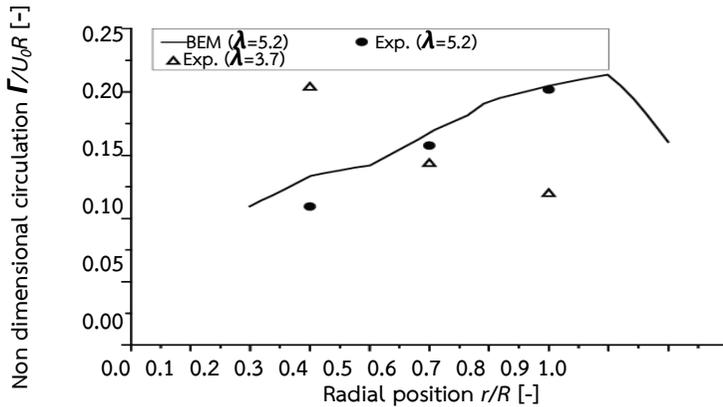


รูปที่ 7 พื้นที่ควบคุมในการคำนวณการไหลวน

จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าการทำนายการไหลวนบนผิวใบพัดที่สภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสม ($\lambda=5.2$) ด้วยทฤษฎี BEM จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามแนวแกนใบจนถึงที่ระยะ $r/R = 0.8$ จากนั้นจะลดลง ซึ่งเหตุผลของปรากฏการณ์นี้คือการก่อตัวของกระแสลมที่ปลายใบพัด (Tip vortex) การคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดที่สภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสม ($\lambda = 5.2$) จากข้อมูลจาก LDV จะพบว่าค่าของการไหลวนบนผิวใบพัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใกล้ปลายใบพัด สำหรับในการคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดที่สภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ ($\lambda=3.7$) จากข้อมูลจาก LDV จะพบว่าจะมีลักษณะคล้ายๆกับกรณีอัตราส่วนความเร็วปลายใบเหมาะสมแต่มีค่าต่ำกว่าบริเวณ $r/R = 0.3$ เหตุผลที่ตำแหน่ง $r/R = 0.5$ และ $r/R = 0.7$ มีค่าการไหลวนบนผิวใบพัดต่ำก็เพราะการที่มีมุมปะทะที่สูงทำให้เกิดการลดลงของแรงยกและเพิ่มแรงต้านทำให้เกิด Stall ส่วนเหตุผลที่ $r/R = 0.3$ มีค่าที่สูงสำหรับสภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ

($\lambda=3.7$) ข้อสันนิษฐานน่าจะมาจากรูปร่างใบพัดที่หนาพร้อมทั้งมีชายปีกหน้าที่แข็งเกร็งและการมีกระแสลมไหลในแนวทางใบจากอิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลางในตำแหน่งนี้ทำให้ช่วยลดการแยกชั้น

ขอบเขตของอากาศดังนั้นก็อาจทำให้ปรากฏการณ์สูญเสียแรงยก (Stall) ไม่เกิดขึ้นในตำแหน่งนี้จึงมีค่าการไหลวนบนพื้นผิวใบพัดสูง



รูปที่ 8 การไหลวนบนผิวใบพัดตามแนวทางใบ

สรุปและอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมพบว่าใบพัดต้นแบบให้ผลสรุปดังนี้

1. มุมปะทะที่สภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำจะมีค่ามุมปะทะที่สูงเนื่องจากเกิด stall ส่งผลให้กระแสลมบนพื้นผิวใบพัดมีความปั่นป่วนในทิศทางการไหลและกระแสลมไม่ยึดติดกับผิวใบพัดและไหลออกจากผิวใบพัด

2. การไหลวนบนผิวใบพัดในสภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสมมีค่าที่สูงกว่าสภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ

3. การไหลวนบนผิวใบพัดจะลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณปลายใบเนื่องจากการก่อตัวของกระแสลมที่ปลายใบพัด

4. ทฤษฎี BEM สามารถทำนายตัวแปรทางอากาศพลศาสตร์ได้คร่าว ๆ บริเวณกลางใบพัดถึงปลายใบพัด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ขอแสดงความขอบคุณ Prof. Dr. Takao Maeda จากห้องวิจัย Fluid Engineering for Energy and Environment Laboratory, Mie University, ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการทำวิจัยนี้ และขอแสดงความขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ของทางห้องวิจัยที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2020, October 10). Alternative Energy Development Plan AEDP2018 (1st ed.). [Online]. Available: https://www.dede.go.th/download/Plan_62/20201021_TIEB_AEDP2018.pdf

- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2021, January 19). Energy Situation 2021 (1st ed.). [Online]. Available: https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47349
- [3] W. Roynarin, "Studying of 100 KW Micro Wind Farm for Low Wind Speed Machines," in *Processing of 9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium*, Chiang Rai, Thailand, 2011, pp.1-4.
- [4] S. Chatthong and W. Roynarin, "Analysis on Maximum Rotational Speed of 20 kW Wind Turbine Blade Performance," in *Processing of 7th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT)*, Phuket, Thailand, 2011, pp.444-447.
- [5] T. Phengpom, Y. Kamada, T. Maeda, T. Matsuno and N. Sugimoto "Analysis of Wind Turbine Pressure Distribution and 3D Flows Visualization on Rotating Condition," *IOSR Journal of engineering*, Vol.6, No.2, pp. 18-30, Feb. 2016.
- [6] T. Phengpom, Y. Kamada, T. Maeda, J. Murata, S. Nishimura and T. Matsuno "Experimental investigation of the three-dimensional flow field in the vicinity of a rotating blade," *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.10, No.2, Paper No.15-00313, pp.1-16, Sep. 2015.
- [7] T. Phengpom, Y. Kamada, T. Maeda, J. Murata, S. Nishimura and T. Matsuno "Study on Blade Surface Flow around Wind Turbine by Using LDV Measurements," *Journal of Thermal Science*, Vol.24, No. 2, pp.131-139, Apr. 2015.
- [8] G. Ronsten "Static pressure measurements on a rotating and a non-rotating 2.375 m wind turbine blade. Comparison with 2D calculations." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.39, No.1, pp. 105–118. Feb. 1992.