

การศึกษาแรงทางด้านอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวแกนตั้ง

ชนิดใบตรงด้วยการวัดความดัน

ดิณณภาพ แพงผม^{1*}, จิระศักดิ์ พุกดำ²

¹สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล

²สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email : Tinnapob.phe@mahidol.ac.th

Received: March 30, 2021

Revised: May 18, 2021

Accepted: June 4, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงทางด้านอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวแกนตั้ง (VAWT) การกระจายของความดันบนพื้นผิวใบพัดกังหันลมใช้เซ็นเซอร์ความดัน 32 ตัว วัดในสภาวะที่ใบพัดกังหันลมหมุนในอุโมงค์ลม การทดสอบทั้งหมดดำเนินการในสภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังมากที่สุด กังหันลมที่ใช้ในการทดสอบมีใบพัด 2 ใบ ทำจากแผ่นอากาศ NACA0021 ที่มีรัศมี 1,000 มม. ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของกังหันลมเท่ากับ 0.22 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.37 มีการชี้แจงว่าการเคลื่อนที่หมุนเป็นวัฏจักรของใบกังหันลมทำให้เกิดการกระจายความดันที่แตกต่างกันไปรอบ ๆ พื้นผิวของส่วนใบพัดกังหันลม ค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากและแรงในแนวสัมผัสมีค่าสูงสุดในบริเวณความเร็วต้นกระแส (Upstream region) ซึ่งเกี่ยวข้องกับมุมปะทะที่สูงในบริเวณนี้ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านลดลงตามมุมปะทะที่ลดลงในบริเวณความเร็วต้นกระแสเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์สูญเสียแรงยก (Stall)

คำสำคัญ : กังหันลมแนวแกนตั้ง, พลังงานลม, การวัดความดัน, อากาศพลศาสตร์, แผ่นอากาศ

Study on Aerodynamic Forces of Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine by using Pressure Measurement

Tinnapob Phengpom^{1*}, Jirasak Pukdum²

¹Institute 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: March 30, 2021

Revised: May 18, 2021

Accepted: June 4, 2021

Abstract

This research aimed to study aerodynamic forces for a vertical axis wind turbine (VAWT). Surface pressure distributions on the blade surface were detected using 32 pressure sensors for the rotating condition in the wind tunnel. All experiments were conducted for the optimum tip speed ratio. The test wind turbine has a two-bladed rotor made from NACA0021 airfoil with a radius of 1,000 mm. The maximum power coefficient of the test wind turbine is 0.22 at the tip speed ratio of 2.37. As a result, it is clarified that the cyclic motion of the wind blade induces variations of pressure distribution around the blade section surface. The normal and tangential coefficients take a maximum value in the upstream region where the high angle of attack. While lift and drag coefficients decrease with decreased angle of attack in the upstream region due to stall phenomenon.

Keywords : VAWT, Wind Energy, Pressure Measurement, Aerodynamic, Airfoil

บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานทั่วโลกเพิ่มขึ้นและยังคงต้องเผชิญกับปัญหาต่าง ๆ เช่นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม การขาดแคลนพลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นักวิจัยหลายคนพยายามใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานทางเลือกและพลังงานลมก็เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพพลังงานจลน์จากลมสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้กังหันลม [1] กังหันลมมี 2 ชนิดหลัก ๆ คือ กังหันลมแนวแกนนอน (HAWT) และกังหันลมแนวแกนตั้ง (VAWT) กังหันลมแนวแกนนอนเหมาะสำหรับการสร้างพลังงานขนาดใหญ่ (Large scale) บนภูมิประเทศเช่นพื้นที่ราบและภูเขา ส่วนกังหันลมแนวแกนตั้งเหมาะสำหรับการผลิตพลังงานขนาดเล็ก (Small scale) ในเขตเมือง

มีการคิดค้นกังหันลมแกนตั้งหลายชนิดในปัจจุบัน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่กังหันลมแกนตั้งชนิดใบตรง (Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine) และมีมุมเอน (Pitch angle) คงที่ โรเตอร์ของกังหันลมแนวแกนตั้งชนิดใบตรงมีรูปทรงที่เรียบง่ายและใบพัดง่ายต่อการขึ้นรูป ซึ่งแตกต่างจากใบพัดของกังหันลมแนวแกนนอนซึ่งควรบิดและเรียวเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด [2] กังหันลมแนวแกนตั้งชนิดใบตรงมีความโดดเด่นด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำและรูปแบบที่เรียบง่าย ในเขตเมืองทิศทางการไหลของลมเปลี่ยนไปอย่างไม่แน่นอนและการไหลแบบปั่นป่วน [3] ดังนั้นกังหันลมแนวแกนตั้งอาจทำงานได้ดีกว่ากังหันลมแนวแกนนอนในเขตเมือง เนื่องจากกังหันลมแนวแกนตั้งสามารถใช้งานได้ในทุกพื้นที่ที่มีลมเพียงพอ และไม่จำเป็นต้องใช้กลไกการหันเหใบพัด (Yaw mechanism) [4] แม้ว่าจะกังหันลมแนวแกนตั้งชนิดใบตรงถือว่าเป็นกังหันลมที่ออกแบบและสร้างได้ง่ายที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ตามหลัก

อากาศพลศาสตร์ก็ถือว่าค่อนข้างมีความซับซ้อน นักวิจัยหลายคนพยายามศึกษาประเด็นเกี่ยวกับการประมาณค่าแรงทางด้านอากาศพลศาสตร์ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับกังหันลมแนวแกนตั้งที่โดดเด่นเช่น Eboibi et al. [5] และ Peng et al. [10] ได้นำเสนออิทธิพลของความตันใบ (Solidity) ต่อประสิทธิภาพของกังหันลมแนวแกนตั้ง ผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับ ความตันใบ อัตราส่วนความเร็วปลายใบ และเรย์โนลด์นัมเบอร์ Armstrong et al. [6] ประดิษฐ์ fence ขนาดเล็กเสริมบนใบพัดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันลม ผลลัพธ์ที่ติดตั้ง fence สามารถเพิ่มค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient) และลดอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) งานวิจัยในอดีตยังกล่าวถึงผลกระทบของมุมเอน Fiedler et al. [7] พยายามศึกษาผลของมุมเอนและผลลัพธ์สามารถสังเกตได้ว่าความผันผวนของค่าสัมประสิทธิ์กำลังแสดงให้เห็นว่าขึ้นอยู่กับมุมเอนเพียงเล็กน้อย ซึ่งในงานวิจัยของ Gao et al. [11] ก็มีการทดสอบการวิเคราะห์ทางอากาศพลศาสตร์ที่สัมพันธ์กับมุมเอนเช่นเดียวกับโดยการปรับมุมเอนที่เหมาะสมสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_{power}) ได้มากถึง 12% Staelens et al. [8] เสนอให้มีการปรับมุมเอนเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในแง่ของกำลังขับโดยการค่อย ๆ ทดสอบปรับมุมเอน โดยการปรับจะมีประสิทธิภาพเมื่อในขณะที่ใบพัดกังหันลมหมุน การปรับมุมเอนไม่ทำให้ขนาดของมุมปะทะ (Angle of attack) มากเกินไปจนก่อให้เกิดการสูญเสียแรงยก (Stall)

ผลกระทบจากความเร็วลมก็เป็นปัจจัยสำคัญเช่นกันต่อการเปลี่ยนแปลงของด้วยสัมประสิทธิ์กำลัง Song et al. [9] และ Islam et al. [2] ได้ทำการรายงานผลที่คล้ายกันว่าค่าสัมประสิทธิ์

กำลังสูงสุดของกังหันลมแนวแกนตั้งมีผลดีกว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น

งานวิจัยที่นำเสนอฉบับนี้ต้องศึกษาสัมประสิทธิ์กำลังและแรงทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวตั้งชนิดใบตรง โดยกังหันลมชนิดใบตรงทำจากแพนอากาศ NACA0021 ที่ทำการทดสอบได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยและออกแบบจาก New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) in Japan การศึกษาได้ทำการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลมร่วมกับเครื่องวัดความดัน

ระเบียบวิธีวิจัย

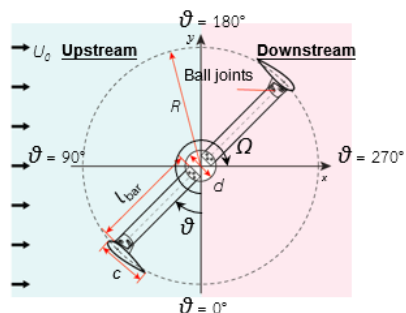
รูปที่ 1 แสดงคุณลักษณะของกังหันลมทดสอบที่สร้างขึ้น และโครงสร้างทางเรขาคณิตหลักของกังหันลมนี้แสดงในตารางที่ 1 กังหันลมแนวตั้งชนิดใบตรงมีโรเตอร์แบบ H-Darrieus และสร้างจากโพลียูรีเทน กังหันลมทดสอบประกอบด้วยใบพัดสองใบและเพลาลูกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 85$ มม. กังหันลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 2,000$ มม. รูปทรงของใบพัดกังหันลมสร้างขึ้นจากแพนอากาศ NACA 0021 ที่มีความยาวคอร์ด $c = 200$ มม. รูปร่างใบพัดตรงมีความยาว $H = 1,200$ มม. กังหันลมมีความตันใบ (Solidity) $\sigma = 0.064$ โดยมีอัตราส่วนภาพ (Aspect ratio) $AR = 6$

กังหันลมแนวตั้งชนิดใบตรงได้รับการติดตั้งและทดสอบในอุโมงค์ลมที่มีความปั่นป่วนต่ำของคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมิเอะประเทศญี่ปุ่น รูปที่ 2 แสดงมุมมองด้านบนของกังหันลมแนวตั้งที่ทำการทดสอบมีการเชื่อมต่อกับเพลารโรเตอร์หลักที่มีความยาว $l_{bar} = 897.5$ มม. ตำแหน่งที่เชื่อมต่อกันระหว่างบาร์และใบพัดของกังหันลมสามารถเปลี่ยนมุมเดินได้โดยใช้ข้อต่อบอลแบบปรับได้ จากที่สังเกตในรูปที่ 2 θ คือ

มุมทิศของกังหันลม (Azimuth angle) Ω คือความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ที่หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Rotational speed) U_0 คือความเร็วลม (Mainstream velocity) ที่สร้างจากอุโมงค์ลมมีทิศทางการไหลจากความเร็วต้นกระแส (Upstream) ไปยังความเร็วปลายกระแส (Downstream) θ คือมุมเดินของใบกังหันลมที่เป็นมุมระหว่างเส้นคอร์ดและตำแหน่งของการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ปรับค่ามุมเดินคองที่ $\theta = 5^\circ$



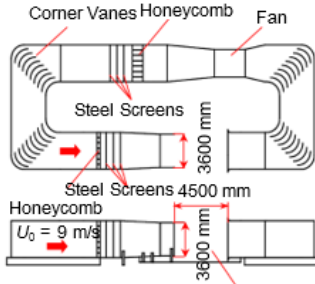
รูปที่ 1 กังหันลมแนวตั้งทดสอบ



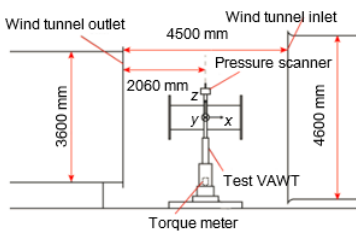
รูปที่ 2 มุมด้านบนของกังหันลมแนวแกนตั้ง

รูปที่ 3 และ 4 แสดงถึงลักษณะของอุโมงค์ลมที่ใช้เป็นแบบ Göttingen type มีทางออกของลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3,600 มม. พื้นที่ทดสอบเป็นแบบเปิดมีขนาด $4,500 \times 4,600$ มม. ความเร็ว

ลมสูงสุดสามารถทำได้ในความเร็วสูงสุดที่ 30 m/s สำหรับการทดสอบครั้งนี้ใช้ความเร็วคงที่ของกระแสลมหลัก $U_0 = 9$ m/s



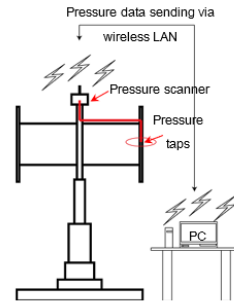
รูปที่ 3 อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4 แผนผังการติดตั้งการทดสอบ

เครื่องสแกนความดันแบบหลายจุด (Multipoint pressure scanner) ถูกนำไปใช้เพื่อตรวจจับการกระจายความดันพื้นผิวในส่วนของใบพัด ข้อมูลที่วัดได้มาจากเครื่องสแกนความดันขณะที่กังหันลมหมุนอยู่ในอุโมงค์ลม โดยเครื่องที่ใช้ ZOC22b miniature pressure scanner จากบริษัท Scanivalve Corporation เพื่อที่จะทำการวัดความดันสถิตยศาสตร์ หรือ Static Pressure ซึ่งเป็นความดันที่เกิดขึ้นกระทำตั้งฉากกับพื้นผิวใบพัด จะต้องเจาะรูเพื่อวัดความดัน (Pressure Taps) จำนวน 32 รู รอบบริเวณส่วนของใบที่ต้องการวัด ข้อมูลความดันสถิตยศาสตร์ถูกส่งผ่านท่อทองแดงเป็นสัญญาณอนาล็อกไปสู่เครื่องสแกนแรงดันที่ใช้พลังงานจาก

$\pm 15V$ DC สัญญาณแรงดันที่วัดได้ในการทดสอบจะถูกส่งไปยัง PC ผ่านระบบสัญญาณแบบไร้สาย ในขณะที่กังหันลมหมุนข้อมูลการวัดความดันจะถูกเก็บเป็นค่าเฉลี่ยโดยจะเฉลี่ยค่าความดันทุก 5 องศาที่กังหันลมหมุน



รูปที่ 5 แผนผังการวัดความดัน

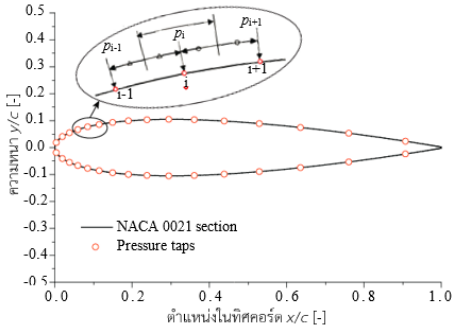
รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งส่วนใบพัดกังหันลม (Blade section) ที่ทำการวัด เส้นสีแดงแสดงถึงตำแหน่งที่ทำการวัดความดันซึ่งในการทดสอบนี้สนใจในการวัดความดัน 5 ส่วนใบพัดกังหันลมตามแนวความยาวใบพัด (Blade span) $z/(H/2) = -0.8, -0.4, 0, 0.7$ และ 0.9



รูปที่ 6 ส่วนใบพัดกังหันลมที่ทำการวัดความดัน

ซึ่งแต่ละส่วนของใบพัดที่วัดความดันจะมีการเจาะรูเพื่อวัดความดัน (Pressure Taps) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มม. ตั้งฉากกับพื้นผิวใบพัด การเจาะท่อความดันมีความถี่มากบริเวณ

ชายปีกหน้า (Leading edge) แล้วค่อยๆลดลง บริเวณชายปีกหลัง (Trailing edge) การวัดความดันที่ส่วนใบพัดกังหันลมแต่ละส่วนมีพอร์ตวัดความดัน 32 พอร์ตและพอร์ตอ้างอิง 1 พอร์ต



รูปที่ 7 แผนอากาศ NACA0021 และตำแหน่งวัดความดัน

แรงตั้งฉาก (Normal force, F_N) และแรงในแนวสัมผัส (Tangential force, F_T) สามารถคำนวณด้วยผลของการวัดความดันในอุโมงค์ลมได้ ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$F_N = \int_{i=1}^{32} (p_i - p_0) \sin \gamma_i ds_i \quad (1)$$

$$F_T = \int_{i=1}^{32} (p_i - p_0) \cos \gamma_i ds_i \quad (2)$$

เมื่อ F_N คือ แรงตั้งฉาก

F_T คือ แรงในแนวสัมผัส

p_i คือ ความดันที่วัดได้จากรูเจาะ

p_0 คือ ความดันที่พอร์ตอ้างอิง

γ_i คือ มุมระหว่างรูเจาะกับเส้นคอร์ด

s_i คือ ระยะห่างระหว่างรูเจาะ

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถคำนวณหาแรงยก (F_L) และแรงต้าน (F_D) ที่กระทำบนส่วนของใบพัดกังหันได้ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4)

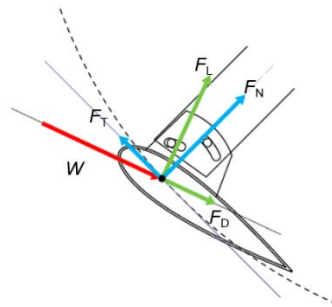
$$F_L = F_N \cos \theta + F_T \sin \theta \quad (3)$$

$$F_D = F_N \sin \theta - F_T \cos \theta \quad (4)$$

เมื่อ F_L คือ แรงยก

F_D คือ แรงต้าน

ความสัมพันธ์ของแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่นำเสนอประกอบไปด้วย แรงตั้งฉาก (F_N) แรงในแนวสัมผัส (F_T) แรงยก (F_L) และแรงต้าน (F_D) สามารถเขียนความสัมพันธ์ร่วมกับความเร็วสัมพัทธ์ (W) บนส่วนของใบพัดกังหันลมดังรูปที่ 8



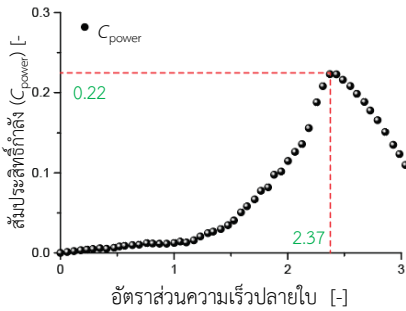
รูปที่ 8 แรงทางอากาศพลศาสตร์

ในงานวิจัยนี้การทดสอบแรงทางด้านอากาศพลศาสตร์จะแสดงในรูปค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรไร้มิติ (Non-dimensional)

ผลการวิจัย

การหาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_{power}) ของกังหันลมแกนตั้งชนิดใบตรงเป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากกระแสลมมาเป็นพลังงานกล การหาค่าจากการทดสอบในอุโมงค์ลมสามารถวัดได้จากเครื่องวัดแรงบิด (Torque meter) จะเห็นว่าในสถานะอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำจะได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำเนื่องจากความเร็วของใบพัดยังมีความเร็วต่ำในการสกัดพลังงานจลน์จากกระแสลม สำหรับ

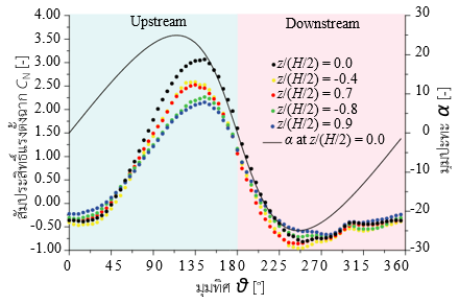
ในสภาวะอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงมากเกินไปก็ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำเช่นกัน เนื่องจากถ้าใบพัดทำงานในอัตราความเร็วสูงจะทำให้ใบพัดเปรียบเสมือนกำแพงขนาดใหญ่มาบังกันกระแสลมไม่ให้ไหลผ่าน ดังนั้นในการสกัดพลังงานควรจะมีจุดที่ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ “Optimum point” กังหันลมหมุนทำงาน ประสิทธิภาพดีที่สุด (Optimum point) ซึ่งที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.37 (Optimum tip speed ratio) จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด 0.22



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์กำลัง

รูปที่ 10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก (C_N) เทียบกับมุมทิศ θ ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.37 รูปคลื่นของแรงตั้งฉากมีค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากใกล้เคียง 0 ในช่วงมุมทิศ $0^\circ < \theta < 45^\circ$ จากนั้นค่าของแรง C_N สำหรับแต่ละส่วนของใบพัดกังหันลมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าบวกสูงสุดและลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งค่าลบต่ำสุดในช่วงมุมทิศ $45^\circ < \theta < 225^\circ$ เมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากจะสอดคล้องกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมปะทะ มุมปะทะที่สูงขึ้นจะเหนี่ยวนำให้ค่าของสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก

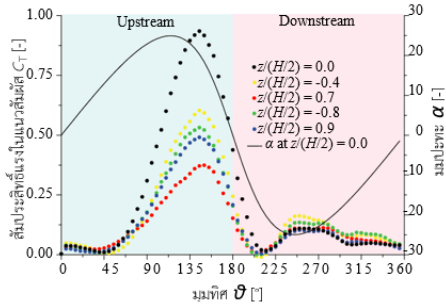
จะลดลงและสลับเป็นค่าลบที่ค่อนข้างคงที่ใกล้เคียง 0 ในช่วงมุมทิศ $225^\circ < \theta < 360^\circ$ ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากคือประมาณ 3.07, 2.58, 2.52, 2.26 และ 2.15 สำหรับตำแหน่งส่วนใบพัดกังหันลม $z/(H/2) = 0, -0.4, 0.7, -0.8$ และ 0.9 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ความผันผวนของสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับมุมทิศ (ตำแหน่ง $z/(H/2) = -0.8, -0.4, 0.0, 0.7$ และ 0.9 , ที่ $\lambda=2.37$)

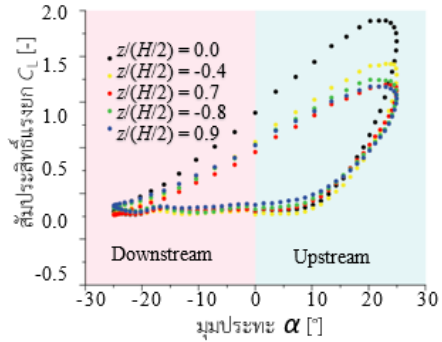
รูปที่ 11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัส (C_T) เทียบกับมุมทิศ θ ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.37 รูปคลื่นของค่า C_T สำหรับแต่ละส่วนของใบพัดกังหันลมมีค่าใกล้เคียงกับ 0 ในช่วงมุมทิศ $0^\circ < \theta < 45^\circ$ และมีค่า C_T เพิ่มขึ้นเร็วในช่วงมุมทิศ $45^\circ < \theta < 135^\circ$ เนื่องจากการเหนี่ยวนำจากการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะ เมื่อพิจารณาแล้วค่า C_T ที่ตำแหน่งกึ่งกลางใบพัด $z/(H/2) = 0$ จะถูกเหนี่ยวนำได้ค่าสูงสุดแตกต่างจากตำแหน่งอื่นได้อย่างชัดเจนเนื่องจากค่าแรงไม่ได้ถูกลดลงจากหลายปัจจัยเช่นผลกระทบระหว่างส่วนของใบกังหันในแนวทางใบ (Spanwise direction) หรือการเกิดกระแสมวน (Vortex) บริเวณปลายใบ (Tip blade) ใดๆก็ตามตามค่า C_T จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมุมปะทะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงมุมทิศ $135^\circ < \theta < 270^\circ$ โดยค่าจะลดลงกลับมาใกล้เคียง 0 อีกครั้ง

ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัสคือ 0.94, 0.60, 0.37, 0.53 และ 0.50 สำหรับ ตำแหน่งส่วนใบพัดกึ่งหันลม $z/(H/2) = 0, -0.4, 0.7, -0.8$ และ 0.9 ตามลำดับ



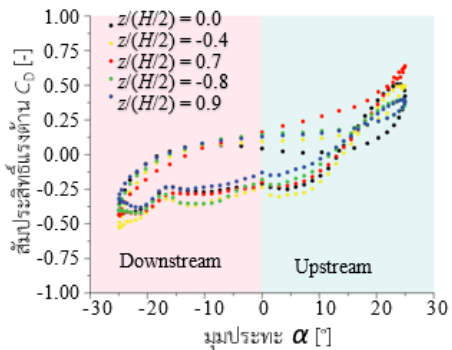
รูปที่ 11 ความผันผวนของสัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัสกับมุมทิศ (ตำแหน่ง $z/(H/2) = -0.8, -0.4, 0.0, 0.7$ และ 0.9, ที่ $\lambda=2.37$)

รูปที่ 12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงยก C_L เทียบกับมุมปะทะ α ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.37 จากรูปจะเห็นว่าความสัมพันธ์คล้ายกับ Asymmetric hysteresis loops พิจารณาที่ความเร็วต้นกระแส (Upstream) มุม $\alpha \approx 25^\circ$ จะทำให้เกิดสูญเสียแรงยก (Stall) ค่า C_L ลดลงอย่างรวดเร็วและมีการเกิดการไหลแยก (Separated flow) จากพื้นผิวใบพัดกึ่งหันลม ค่าของ C_L ที่ตำแหน่งส่วนของใบพัดกึ่งหันลมที่สนใจทั้งห้าตำแหน่งมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมุมโจมตี $\alpha \approx 10^\circ$ ($\theta \approx 35^\circ$) เมื่อใบพัดของกึ่งหันลมกำลังเคลื่อนที่ไปในความเร็วปลายกระแสค่า C_L จะมีค่าใกล้เคียง 0 และคงที่ แต่ค่า C_L จะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อใบพัดกึ่งหันลมกลับมาสู่ความเร็วต้นกระแส สัมประสิทธิ์แรงยกคือประมาณ 1.89, 1.42, 1.19, 1.24 และ 1.17 สำหรับตำแหน่งส่วนใบพัดกึ่งหันลม $z/(H/2) = 0, -0.4, 0.7, -0.8$ และ 0.9 ตามลำดับ



รูปที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะ (ตำแหน่ง $z/(H/2) = -0.8, -0.4, 0.0, 0.7$ และ 0.9, ที่ $\lambda=2.37$)

รูปที่ 13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงยก C_D เทียบกับมุมปะทะ α สังเกตได้ว่าเส้นโค้งลักษณะคล้ายกับสัมประสิทธิ์การยก C_L เมื่อสูญเสียแรงยก (Stall) เกิดขึ้นประมาณ มุม $\alpha \approx 25^\circ$ ค่า C_D จะลดลงจนกระทั่งมุม $\alpha \approx 10^\circ$ สัมประสิทธิ์แรงต้านคือประมาณ 0.51, 0.49, 0.64, 0.40 และ 0.39 สำหรับตำแหน่งส่วนใบพัดกึ่งหันลม $z/(H/2) = 0, -0.4, 0.7, -0.8$ และ 0.9 ตามลำดับ



รูปที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับมุมปะทะ (ตำแหน่ง $z/(H/2) = -0.8, -0.4, 0.0, 0.7$ และ 0.9, ที่ $\lambda=2.37$)

สรุปและอภิปรายผล

1. กังหันลมต้นแบบชนิดใบตรงมีค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสม (Optimum tip speed ratio) เท่ากับ 2.37 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดประมาณ 0.22
2. ค่า C_N และ C_T ที่ตำแหน่งกึ่งกางใบพัด ($z(H/2) = 0$) แสดงความผันผวนของแรงเหล่านี้ค่อนข้างสูงมากกว่าตำแหน่งอื่น
3. ค่า C_N และค่า C_T เพิ่มขึ้นตามมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น
4. ค่า C_L และค่า C_D ลดลงเมื่อเกิดสูญเสียแรงยก (Stall) ค่า C_L จะมีค่าสูงในความเร็วต้นกระแสน ส่วนค่า C_D มีค่าสูงทั้งความเร็วต้นกระแสนและความเร็วปลายกระแสนแต่ทิศทางตรงกันข้าม

กิตติกรรมประกาศ

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

References

- [1] M.H. Mohamed, "Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance," *Energy*, Vol.57, No.1, pp. 495-504, Aug. 2013.
- [2] M. Islam, D.S.K. Ting and A. Fartaj, "Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.12, No.4, pp.1087-1109, May 2008.
- [3] L.P. Chamorro, R.E.A. Arndt and F. Sotiropoulos, "Reynolds number dependence of turbulence statistics in the wake of wind turbines," *Wind Energy*, Vol.15, No.5, pp. 733-742, Sep. 2012.
- [4] I. Mazharul, S.K.T. David and F. Amir, "Aerodynamic models for Darrieus type straight bladed vertical axis wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.12, No.4, pp.1087-1109, May 2008.
- [5] O. Eboibia, L.A.M. Danaob and R.J. Howell, "Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low Reynolds numbers," *Renewable Energy*, Vol.92, Vol.1, pp.474-483, Jul. 2016.
- [6] S. Armstrong, A. Fiedler and S. Tullis, "Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences," *Renewable Energy*, Vol.41, No.1, pp.13-22, May 2012.
- [7] A. Fiedler and S. Tullis, "Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine," *Wind Eng.*, Vol.33, No.3, pp.237-246, May 2009.

- [8] Staelens, Y, Saeed, F, & Paraschivoiu, I. "A Straight-Bladed Variable-Pitch VAWT Concept for Improved Power Generation." *Proceedings of the ASME 2003 Wind Energy Symposium. ASME 2003 Wind Energy Symposium. Reno, Nevada, USA. January 6–9, 2003.* pp. 146-154. ASME. <https://doi.org/10.1115/WIND2003-524>
- [9] S.H. Song, S. Kang and N. Hahm, "Implementation and control of grid connected AC-DC-AC power converter for variable speed wind energy conversion system," in *Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Florida, USA, pp. 154-158. 2003.
- [10] Y. X. Peng, Y.L. Xu, S. Shu and C. Li, "High solidity straight bladed vertical axis wind turbine: Numerical simulation and validation," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*," vol.193, no.103960, pp. 1-13. Oct, 2019.
- [11] Y. Guo, X. Li, L. Sun, Y. Gao, Z. Gao and L. Chen "Aerodynamic analysis of a step adjustment method for blade pitch of a VAWT," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol.188, pp.90-101. May 2019.