พฤติกรรม Stall-Delay ใน 3 มิติที่มุมปะทะสูงด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ 3D Stall-Delay phenomenon at high angle of attack using Computational fluid dynamics

<u>กัมพล อรนนท์</u>1, ชโลธร ธรรมแท้¹* และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 **ติดต่อ: chalothorn@sut.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-4422-4556, เบอร์โทรสาร 0-4422-4613

บทคัดย่อ

บทความเสนอผลการจำลองพฤติกรรมการเกิด Stall-Delay ที่มุมปะทะสูงนอกช่วงการทดลองด้วยวิธีการ คำนวณเชิงตัวเลข (CFD) ของกังหันลม NREL Phase VI ด้วยแบบจำลองความป^{ั้}นปวน SST K-@ เพื่อหา แนวโน้มการสิ้นสุดของการเกิด Stall-Delay ที่มุมปะทะสูงให้มีความสมเหตุสมผลมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่า พฤติกรรม Stall-Delay ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ของแรงยกและแรงต้านเพิ่มขึ้น กราฟแรงยกมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่ หลังจากมุมปะทะ 50 องศาและไปบรรจบกันกับข้อมูลการวัดใน 2 มิติที่มุมปะทะ 80 องศา คำหลัก: แบบจำลอง Stall-Delay, การคำนวณเชิงตัวเลข, กังหันลม,มุมปะทะ

Abstract

This article presents Stall-Delay phenomenon with simulation results at high angle of attack, out of experimental range with Computational Fluid Dynamics (CFD) of NREL Phase VI wind turbine. To finds trend the end of Stall-Delay phenomenon at high angle of attack for more reasonable, with SST k- ω turbulent model. The study found that the Stall-Delay behavior, increase lift and drag coefficients. At angle of attack 50 degree, lift curves are trend linearly and converge to the experimental data in 2 dimensions flow at 80 degree, angle of attack.

Keywords: Stall-Delay model, CFD, Wind turbine, Angle of attack

1. บทนำ

ในการออกแบบกังหันลมในเชิงทฤษฎีนั้น จำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบหลาย ประการ แต่ที่มีความสำคัญที่สุดคือข้อมูลจากการ ทดสอบสัมประสิทธิ์ของแรงของแพนอากาศ(Airfoil) ในขณะที่กำลังหมุน (3มิติ) ที่เป็นฟังก์ชันของมุมปะทะ ดั้งแต่ 0 จนถึง 90 องศาเพราะจะส่งผลต่อความ แม่นยำในการออกแบบอย่างมาก การนำมาซึ่งข้อมูล ดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมด้าน พลศาสตร์ของกังหันลมให้มีความชัดเจนเสียก่อน หากแต่พฤติกรรมด้านพลศาสตร์ของกังหันลมนั้น ยังมี ความซับซ้อนอยู่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกังหันลม ชนิด Stall-Regulated การทำงานของกังหันลมชนิด ดังกล่าวโดยมากมักจะทำงานที่มุมปะทะสูงซึ่งเป็นช่วง การเกิด Stall แต่สำหรับกังหันลมที่กำลังหมุนจะ ก่อให้เกิดพฤติกรรมที่เรียกว่า Stall-Delay พฤติกรรม นี้จะส่งผลให้เกิดความดันโดยรอบใบพัดสูงมากกว่า ใบพัดที่ไม่หมุน (2มิติ) ในด้านดูด(suction side) เป็น

เห็นว่าแบบจำลองความป^{ั่}นป่วนแบบ SST k-@ มี แนวโน้มให้ผลการจำลองในภาพรวมที่แม่นยำที่สุดเมื่อ เทียบกับโมเดลอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 จึงได้ใช้ แบบจำลองนี้ในการทำนายพฤติกรรมการไหลที่ ความเร็วลมสูงต่อไป



รูปที่ 1 เปรียบเทียบการวัดแรงบิดและผลการจำลอง ด้วย CFD สำหรับกังหันลม NREL Phase IV ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน±1

กริดและเงื่อนไขขอบที่ใช้ในการคำนวณ

การศึกษาพลศาสตร์ของกังหันลม Phase VI จาก National Renewable Energy Laboratory (NREL) เป็นกังหันลมแบบ 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.058 เมตร ใช้แพนอากาศรุ่น S809 [6] คำนวณการ ใหลโดยใช้สมการ Navier-Stokes เป็นพื้นฐาน การ ใหลเป็นแบบคงตัวและอัดตัวไม่ได้ ภายใต้สมมติฐาน ความหนาแน่นคงที่ มุมบิดที่ปลายใบทำมุม 3 องศา เทียบกับระนาบการหมุนของใบ (Rotational Plane) ในการจำลองทาง CFD ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys Fluent 14.0 พิจารณาความปั้นป่วนเป็นแบบค่าเฉลี่ย เรโนลด์ (Reynold-Averaged Navier-Stokes:RANS) หาผลเฉลยแบบ SIMPLE algorithm สมการโมเมนตัม และความป^{ั้}นป่วนประมาณด้วยวิธี Second Oder Upwind ไม่พิจารณาผลของการใหลผ่านแกนหมุน (Hub) ของกังหันลม โดยถือว่ามีผลน้อยมากต่อความ ผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นกับผลของการจำลอง ใช้

้อย่างมากที่บริเวณโคนใบ[16] ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ แรงยกและแรงต้านที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกับแรงที่ ได้จากการวัดใน2 มิติมาก[4] ในป[ั]จจุบันเองก็ยังไม่ สามารถอธิบายถึงสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ ดังกล่าวได้อย่างชัดเจน มีข้อสันนิษฐานจากนักวิจัยว่า เกิดจากการปฏิสัมพันธ์กันในสามมิติของแรงเฉื่อย แรงเหวี่ยง และแรงคอริโอริส[2,5] เพื่อศึกษา พฤติกรรม Stall-Delay ให้มีความชัดเจนจึงได้มี โครงการที่ใช้ในการทดสอบกังหันลมขึ้นมาหลาย โครงการไม่ว่าจะเป็นโครงการ NREL[8] และ MEXICO rotor[17] แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดในด้านการ ทดลองที่ไม่สามารถทำการทดลองที่ความเร็วลมสูง มากได้จึงมีข้อมูลการทดลองแค่เพียงที่ความเร็วลมไม่ เกิน 25 เมตร/วินาทีเท่านั้นทำให้ข้อมูลการทดลองไป สิ้นสุดที่มุมปะทะ 45 องศาเท่านั้น ขณะ เดียวกันในวิธี เชิงทฤษฏีก็มีความพยายามในการสร้างแบบจำลอง ออกมาในหลายๆรูปแบบ แต่ก็ยังไม่ Stall-Delay สามารถหาข้อสรุปที่ถูกต้องที่สุดร่วมกันได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาประโยชน์จากการจำลอง การไหลผ่านการคำนวณแบบวิธีเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics : CFD) มาประยุกต์ ใช้ในการคำนวณที่ความเร็วลมสูงมาก ซึ่งการทดลอง ไม่สามารถทำได้ และไม่มีข้อมูลจากวิธีเชิงทฤษฎี เพื่อ หาสัมประสิทธิ์ของแรงที่มุมปะทะสูงจนถึงมุมปะทะ 90 องศา โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys fluent เป็น เครื่องมือในการจำลอง

ในงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการศึกษาหาแบบจำลอง ความป^{ั่}นป่วนที่ดีที่สุดที่ใช้สมการควบคุมไม่เกิน 2 สมการในการคำนวณได้แก่ Spalart-Allmaras model, realizable k-E model และ SST k-@ model โดยได้ ทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองความ ป^{ั่}นป่วนทั้ง 3 แบบกับกังหันลม NREL Phase VI ซึ่ง ใช้แพนอากาศ S809 ในการออกแบบ[6] โดย เปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดแรงบิดที่แกนหมุนของ ใบพัด (LSST) เทียบกับข้อมูลการทดลองในอุโมงค์ลม ของNASA Ames Research Center ที่ช่วงความเร็ว ลม 6-25 เมตร/วินาที[8] จากผลการจำลองแสดงให้



รูปที่ 3 เงื่อนไขขอบที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4 ระนาบวงแหวนที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหล ตามทฤษฎี BEM

ตารางที่1: เงื่อนไขในการคำนวณ

Wind	RPM	Density	Viscosity
speed		[kg/m ³]	X10 ⁻⁵
[m/s]			[kg/m∙s]
5.0	72	1.246	1.769
7.0	71.9	1.246	1.769
10.0	72.1	1246	1.769
13.0	72.1	1.227	1.781
15.1	72.1	1.224	1.784
18.0	72	1.221	1.786
20.1	72	1.221	1.786
23.0	72	1.22	1.785
25.1	72.1	1.22	1.785

แบบจำลองความปั่นป่วน SST K-@ ที่เสนอโดย Menter[13,14] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการสอบ เทียบความแม่นยำมาแล้วในเบื้องต้น[1] และได้รับการ ยอมรับว่ามีความแม่นยำกว่าแบบจำลองความป^{ั่}นป่วน แบบ 2 สมการทั่วไป[4,10]

กริดที่ใช้เป็นกริดรูปทรงสี่เหลี่ยมทั้งหมด ที่บริเวณ รอบๆกังหันลมจะเป็นแบบ O-grid โดยจะแบ่ง ออกเป็น 220เซลล์รอบหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 2 ความหนาของกริดแรกรอบผิวใบคิดเป็น 0.01 มิลลิเมตรเพื่อให้ขนาด γ+ รอบผิวใบโดยเฉลี่ยมีขนาด เท่ากับ 1 และให้อัตราการเติบโตเป็น 1.2 จำนวน 25 เซลล์จากผิวใบ เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการทำนาย การไหลที่ชั้นชิดผิวของกังหันลม ใช้กริดจำนวนทั้งสิ้น ประมาณ 2.5ล้านกริด ซึ่งได้ผ่านการทดสอบแล้วว่า ้จำนวนกริดที่ใช้ไม่มีอิทธิพลต่อผลการจำลอง (grid independent) กำหนดขนาดของโดเมนด้านหน้าของ ใบพัดคิดเป็น 10R และด้านหลังและด้านข้างขนาด 5R (R คือรัศมีของกังหันลม) ซึ่งพิสูจน์มาแล้วว่าเป็น ขนาดที่มีความเหมาะสม และจะไม่ได้รับผลกระทบ ้จากขอบ (Boundary Effect) เนื่องจากกังหันลมที่ใช้ ทดสอบเป็นแบบสองใบ และแต่ละใบมีการไหลที่ ้เหมือนกัน จึงสร้างโดเมนของกริดเป็นรูปครึ่งหนึ่งของ ทรงกระบอก ซึ่งจะช่วยให้ลดปริมาณกริดที่ใช้ในการ คำนวณลงได้มากดังแสดงในรูปที่ 3 และให้พื้นผิว สมมาตรของทรงกระบอกที่ถูกแบ่งครึ่งกำหนดให้เป็น ้ผิว periodic รอบแกนหมุนของใบพัด โดยมีเงื่อนไขใน การคำนวณที่ความเร็วลมต่าง ๆดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 กริดโดยรอบผิวใบกังหันลม ที่หน้าตัด 80% span

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 METT28 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

และเนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการจำลองที่ความเร็วลม สูงมากกว่า 25 m/s ซึ่งไม่มีข้อมูลจากการทดลอง ประกอบ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหลังจากนี้ จะถูกกำหนดให้มีค่าความเร็วรอบ 72 RPM, Density 1.225 (kg/m³), Viscosity 1.785x10⁻⁵ (kg/m⋅s) ตลอด ช่วงความเร็วลม

3. Blade Element Momentum (BEM) Theory

ในการออกแบบกังหันลมโดยทั่วไปจะใช้วิธี BEM วิธีนี้จะแบ่งระนาบของใบกังหันออกเป็นส่วนวงแหวน ในแนวรัศมี (Annular stream tube) ดังแสดงในรูปที่ 4 แล้วทำการวิเคราะห์การถ่ายเทมวล และโมเมนตัมใน วงแหวนนี้ภายใต้สมมติฐานการไหลในแต่ละวงแหวน เป็นเอกรูป (Uniform) ที่ไม่มีปฏิสัมพันธ์กันทฤษฏีนี้ ประกอบด้วย 2 ทฤษฏีย่อย คือ Momentum theory และ Blade element theory แล้วรวมกับแฟคเตอร์การ สูญเสียที่โดนใบและปลายใบจะได้ความสัมพันธ์ของ สมการดังนี้[9,12]

$$\tan \phi = \frac{U_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \frac{(1-a)}{\lambda_r(1+a')}$$
(1)

$$a = \frac{1}{\frac{4F\sin^2\phi}{\sigma'c_n} + 1}$$
(2)

$$a' = \frac{1}{\frac{4F\sin\phi\cos\phi}{\sigma'c_{\star}} - 1}$$
(3)

เมื่อ $\sigma' = Nc / 2\pi r$ (Local solidity), $\lambda_r = \Omega r / U_0$ (Tip speed ratio) และ F คือแฟคเตอร์การสูญเสียรวมที่โคนใบและปลาย ใบ หาได้จากความสัมพันธ์

$$F = F_{tip} F_{hub} \tag{4}$$

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-\frac{N(R-1)}{2r \sin \phi} \right) \right)$$
(5)

$$F_{hub} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-\frac{N(r - R_{hub})}{2r \sin \phi} \right) \right)$$
(6)

โดยเวคเตอร์ของลม และแรงที่กระทำบนแพนอากาศ ของกังหันลมที่กำลังหมุนแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เวคเตอร์ของความเร็วลมและแรงที่เกิดขึ้น บนแพนอากาศ

สมการข้างต้นเป็นสมการโดยทั่วไปที่ใช้ในการ ออกแบบกังหันลม นั่นคือมีความเร็วลม (U₀)ที่ในการ ออกแบบ จำนวนใบพัด (N) ขนาดความกว้างใบ (C) ความเร็วในการหมุน (Ω) ความยาวใบพัด (R) เป็นจุด ออกแบบใช้ข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงในสามมิติ (Cl,Cd) เป็นข้อมูลในการออกแบบ และมีตัวแปรที่ยังไม่รู้ค่าอีก 3 ตัวได้แก่ ϕ , a และ a'เมื่อ ϕ คือมุมบิดรวม(มุม บิดใบ(β)+มุมปะทะ(α)) a คือแฟคเตอร์ความเร็วลม เหนี่ยวนำในแนวแกนหมุน และ a' คือแฟคเตอร์ ความเร็วลมเหนี่ยวนำในแนวรัศมี ในการคำนวณตัว ไม่ทราบค่าดังกล่าวทั้ง 3 ค่าไม่สามารถคำนวณได้ ด้วยพีซคณิตโดยตรง จำเป็นจะต้องใช้การคำนวณด้วย

วิธีการทำซ้ำแบบย้อนกลับที่เรียกว่าวิธี inverse BEM เพื่อนำไปสู่การคำนวณหามุมปะทะของกังหันลม

4. Inverse BEM

Inverse BEM เป็นกระบวนการในการหาคำตอบ ด้วยวิธีการทำซ้ำ [15,16] โดยใช้สมการหลัก 3 สมการ ได้แก่สมการ (1-3) เพื่อหาค่า φ โดยใช้ข้อมูลของ กังหันลมที่ใช้ในการจำลองมาใช้ในการคำนวณ เพื่อ นำไปสู่การหาค่ามุมปะทะ (α) เนื่องจากข้อมูลที่ได้ การจำลองไม่สามารถบอกค่าสัมประสิทธิ์ข้องแรงที่ เป็นฟังก์ชันของมุมปะทะได้โดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้อง ใช้การประเมินมุมปะทะด้วยวิธี inverse BEM ในการ คำนวณจะแบ่งใบพัดออกเป็น 5 ส่วนย่อยได้แก่ที่ 30, 47, 63, 80 และ 95 เปอร์เซ็นต์ของรัศมีใบ เป็นการ แบ่งการพิจารณาออกเป็นช่วง ๆ เนื่องจากแต่ละช่วง นั้นมีพฤติกรรมไหลของอากาศที่แตกต่างกัน แล้วเริ่ม การคำนวณในแต่ละส่วนย่อยดังนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้น a = a' = 0
- คำนวณมุมลมสัมพัทธ์ จากสมการ

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{U_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} \right]$$

- อ่านค่า C_n, C_t จากผลการคำนวณด้วย
 โปรแกรม CFD
- 4) คำนวณ ค่า a และ a' ค่าใหม่ จากสมการ
 (2) และ (3)
- ถ้าผลของความคลาดเคลื่อนของค่า a และ a' ยังมากกว่าที่เราต้องการก็กลับไปคำนวณ ซ้ำในข้อ 2)
- 6) คำนวณ C_I , C_d และlpha จาก สมการ

$$C_l = C_n \cos \phi + C_t \sin \phi \tag{7}$$

 $C_d = C_n \sin \phi - C_t \cos \phi \qquad (8)$

 $\alpha = \phi - \beta \tag{9}$

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเพิ่มคือ เมื่อค่า a มีค่า มากกว่า 0.4 สัมประสิทธิ์ของแรงจะไม่เป็นไปตาม ทฤษฎีโมเมนตัมแนวทางในการปรับแก้ปัญหาดังกล่าว นั้นมีผู้ที่คิดไว้หลายทฤษฎี แต่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น ของ Glauert[7] เป็นสมการความสัมพันธ์กับการ สูญเสียที่ปลายใบและสัมประสิทธิ์แรงผลัก (C_T) ดัง สมการ

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50}$$
(10)

จากผลการคำนวณดังกล่าวจะทำให้ได้ผลการ จำลองของสัมประสิทธิ์ของแรงที่เป็นฟังก์ชันของมุม ปะทะได้

ผลลัพธ์และการวิจารณ์

ผลจากการจำลองการไหลผ่านกังหันลมด้วย โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys fluent 14.0 แล้วนำข้อมูลที่ ได้จากการจำลองมาใช้ในการประเมินมุมปะทะด้วยวิธี inverse BEM (ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4) แม้ว่า ทฤษฎี BEM จะถูกสร้างขึ้นมาจากสมมติฐานของการ ใหลใน 2 มิติ(ความยาวของแพนอากาศเป็นอนันต์) นั้นคือไม่คิดรวมผลกระทบจากการสูญเสียที่โคนและ ปลายใบ แต่เมื่อเพิ่มการพิจารณาการสูญเสียตรงส่วน นี้เข้าไปก็จะสามารถนำมาใช้คำนวณการไหลผ่านแพน อากาศที่มีความยาวใบแบบจำกัดได้ โดยไม่จำเป็นที่ จะต้องเพิ่มแฟคเตอร์ของการเกิด Stall-Delay อัน เนื่องมาจากการหมุนของใบพัดเข้าไปในสมการอีกแต่ ้อย่างใด เนื่องจากแรงที่วัดได้จากผลการจำลองทาง CFD ได้รวมเอาผลกระทบจากการเกิด Stall-Delay เอาไว้ด้วยแล้ว การพิจารณาจะถูกแบ่งออกเป็น 5 หน้าตัดได้แก่ที่หน้าตัด 30, 47, 63, 80 และ 95 เปอร์เซ็นต์ของความยาวใบพัดดังแสดงในรูปที่ 6 ถึง รูปที่ 10 เปรียบกับข้อมูลการวัดใน 3 มิติซึ่งประเมิน มุมปะทะของกังหันลมที่กำลังหมุนด้วยเครื่องมือ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 METT28 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

CST-192

Local flow angle แล้วทำการปรับแก้ค่าให้เป็นมุม ปะทะ และข้อมูลการวัดใน 2 มิติ

ที่หน้าตัด 30 และ 47 เปอร์เซ็นต์ของความยาว ใบพัด (รูปที่ 6-7) ในช่วงที่มุมปะทะไม่เกิน 10 องศา กราฟข้อมูลการจำลองทาง CFD ของสัมประสิทธิ์ของ แรงยกจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและสอดคล้องกับ ข้อมูลการวัดทั้งในแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ และ กราฟสัมประสิทธิ์ของแรงต้านกราฟทั้ง 3 ก็ยังมี แนวโน้มแนบไปกับข้อมูลการวัดทั้ง 2 แบบ เมื่อมุม ปะทะมากกว่า 10 องศาขึ้นไปเริ่มเกิดการไหล แยกตัว (flow separation) ในการไหลแบบ 2 มิติทำให้ สัมประสิทธิ์ของทั้งแรงยกและแรงต้านตกลง แต่ใน มิติของทั้งสองกราฟยังคงมีแรงยกที่สูงขึ้น แบบ 3 อย่างต่อเนื่องไปจนถึงมุมปะทะประมาณ 30-35 องศา แล้วกราฟแรงยกจึงมีแนวโน้มที่ตกลง ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่ง Stream lines ยังคงเป็นแบบราบเรียบแม้มุม ปะทะ 21 องศาแล้วก็ตาม นั่นแสดงให้เห็นถึงประกฎ การณ์ของการเกิด Stall-Delay และที่มุมปะทะสูง กราฟแรงยกมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและไปบรรจบกับ กราฟก็มูลการวัดใน 2 มิติที่มุมปะทะประมาณ 80 องศา



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์ของแรงยก (C_I) และ แรงต้าน (C_I)ที่หน้าตัด 0.30R



รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์ของแรงยก (C_i) และ แรงต้าน (C_d)ที่หน้าตัด 0.47R



รูปที่ 8 Stream lines เป็นแบบราบเรียบ ที่หน้าตัด 0.30R

ที่หน้าตัด 63 และ 80 เปอร์เซ็นต์ของความยาว ใบพัด (รูปที่ 9-10) ในช่วงที่มุมปะทะไม่เกิน 10 องศา ทั้ง 3 กราฟมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันและกราฟแรงยก เริ่มตกลงที่มุมปะทะสูงขึ้น โดยกราฟ 2 มิติตกลงมาก ที่สุดเนื่องจากเกิดการ fully stall และมีแรงยกเพิ่มขึ้น อีกครั้งที่มุมปะทะ 20 องศา และที่มุมปะทะสูงกราฟ แบบจำลองทาง CFD ก็มีแนวโน้มที่ไปบรรจบกับ

ข้อมูลกาววัดใน 2 มิติที่มุมปะทะ 80 องศาเช่นกัน ในขณะที่กราฟสัมประสิทธิ์แรงต้านมีแนวโน้มที่ สอดคล้องกับแบบ 3 มิติเป็นอย่างดี และมีค่าสูงกว่า แบบ 2 มิติเล็กน้อย



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์ของแรงยก (C_I) และ แรงต้าน (C_d) ที่หน้าตัด 0.63R



รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์ของแรงยก (C_I) และ แรงต้าน (C_d)ที่หน้าตัด 0.80R



รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์ของแรงยก (C_I) และ แรงต้าน (C_d) ที่หน้าตัด 0.95R

ที่หน้าตัด 95 เปอร์เซ็นต์ของความยาวใบพัด (รูป ที่ 11) ผลการจำลอง และการวัดใน 3 มิติได้รับอิทธิพล ของการสูญเสียที่ปลายใบจึงทำให้กราฟสัมประสิทธิ์ แรงยกที่ได้มีค่าน้อยกว่าการวัดใน 2 มิติ และมี แนวโน้มสอดคล้องกับแบบ 2 มิติที่มุมปะทะสูง ส่วน กราฟสัมประสิทธิ์แรงต้านข้อมูลที่ 3 มีแนวโน้มที่ สอดคล้องกันดีตลอดช่วงการวัด

5. สรุป

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมของการ เกิด Stall-Delay ที่มุมปะทะสูง ซึ่งไม่สามารถทำการ ทดลองได้ และยังมีความคลุมเครือไม่ชัดเจนของ จุดสิ้นสุดของการเกิดพฤติกรรม จากการวิจัยพบว่า ใน กังหันลมที่มีการหมุนมีพฤติกรรมการเกิด Stall-Delay

ขึ้นจริง ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดเกิดแรงยก และแรงต้าน ได้สูงกว่าแบบไม่หมุนมาก และแนวโน้มของกราฟ สัมประสิทธิ์แรงยกยังมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงที่มุม ปะทะสูงไปบรรจบกับกราฟข้อมูลการวัดใน 2 มิติที่มุม ปะทะ 80 องศา จากกงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่า การจำลองทาง CFD ของกังหันลมและประเมินมุม ปะทะด้วยวิธี inverse BEM สามารถคำนวณการไหล ได้เป็นอย่างดี และมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลการ วัดใน 3 มิติอีกด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กัมพล อรนนท์, ชโลธร ธรรมแท้ และ กนต์ธร ชำนิ ประศาสน์ (2556). พฤติกรรมการไหลที่มุมปะทะสูง ผ่านกังหันลมชนิด Stall-Regulated. การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 จังหวัดชลบุรี, 8 หน้า.

[2] Burton et al., (2001). Wind Energy Handbook,John Wiley & Son.

[3] Butterfield et al., (1992). NREL Combined experimental final report-phase II, NREL/TP-442-4807; National Renewable Energy Laboratory: Golden,Co, pp.429.

 [4] Catalano, P., Amato, M.,(2003). An evaluation of RANS turbulence modeling for aerodynamics applications. Aerospace Science and Technology, Vol.7, No. 7, pp. 493-509

[5] Corten, G.P., 2001. Flow separation on Wind TurbineBlades, PhD thesis, University of Utrecht.

[6] Giguere, P., Selig, MS., 1999. Design of tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor. NREL/SR-500-26173, Nrel, Golden, CO.

[7] Glauert, H. "The analysis of experimental results in the windmill brake and vortex ring states of an airscrew", ARCR R&M 1926(1026).

[8] Hand M.M., Simms D.A, Fingersh LJ, Jager DW, Cotrell JR, Schreck S, Larwood, SM., 2001.

UnsteadyAerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns, NREL/TP–500-29955; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO. [9] Hansen, O.L.,(2013). Aerodynamics of wind

turbines, Routledge, ISBN-1136572252.

[10] Huang, P. G.,1999. Physics and Computation of Flows with Adverse Pressure Gradients.Modelling Complex Turbulent Flows, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 245-258.

[11] Jonkman, J.M., 2003. Modeling of the UAE wind turbine for refinement of FAST_AD.Technical Report NREL/TP-500-34755, National Renewable Energy Laboratory, Colorado.

[12] Manwell et al. (2010). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, ISBN-9780470686287.

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

[14] Menter, F. R.,1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications., AIAA Journal, vol.32, pp.1598-1605.

[15] Özlem C., 2008. Aerodynamic Design and Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by using BEM Theory and Genetic Algoritm, master degree of science in aerospace engineering, Middle East Technical University, 2008.

[16] Ronsten G., 1992. Static pressure measurements on a rotating and a non-rotating 2.375 m wind turbineblade. Comparison with 2D calculations. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ; 39: 105-118.

[17] Schepers et al., (2012). Analysis of Mexico wind tunnel measurements. Energy research centre of the Netherlands. ECN-E-12-004, pp.312.