

พฤติกรรมการไหลที่มุมปะทะสูงผ่านกังหันลมชนิด Stall-Regulated

Behavior of flow at high angle of attack through stall-regulated wind turbines

กัมพล อรนนท์¹, ชโลธร ธรรมแท้* และ กนต์ธร ชำนิประศาสตร์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: chalothorn@sut.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-4422-4556, เบอร์โทรสาร 0-4422-4613

บทคัดย่อ

พฤติกรรมการไหลผ่านกังหันลมที่มุมปะทะสูง ยังมีความซับซ้อนอยู่มาก เนื่องจากที่พื้นผิวใบของกังหันลมมีการไหลแบบแยกตัว ในการพัฒนาแบบจำลอง Stall-delay ให้มีความแม่นยำนั้น จำเป็นต้องมีข้อมูลการทดลองที่มุมปะทะสูงมากๆ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวกังหันลมและอุปกรณ์ต่างๆ การศึกษาที่จึงได้นำเอา CFD มาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม โดยเฉพาะในช่วงความเร็วลมตัดออก(Cut-off wind speed) ซึ่งช่วงความเร็วลมดังกล่าวไม่เกิดขึ้นในการทดลอง เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของแรงที่ได้ไปสู่การพัฒนาแบบจำลองความหวังต่อไป จากการศึกษาพบว่า แบบจำลอง SST K- ω มีความเหมาะสมกับการจำลองการไหลที่มุมปะทะสูง จึงใช้แบบจำลองนี้ในการประเมินพฤติกรรมการไหลผ่านกังหันลมในช่วงความเร็วลมตัดออก(Cut-off wind speed)

คำหลัก: มุมปะทะ, การไหลแบบแยกตัว, CFD, กังหันลม, ความหวังป้อ

Abstract

Behavior of the flow through the wind turbines at high angle of attack is much more complex, due to separation flow from the surface of the wind turbines. To develop an accurate prediction of the flows on Stall-delay model, the experimental data at very high angle of attacks are needed. But it can't be done in the practices, due to restrictions on the damage that would occur with the wind turbines and equipment. This research aimed to study the flow behavior of the air through the wind turbines especially during cut-off wind speed zone, which is not going to experiment. The CFD is used to predict the air flow through the wind turbines at high angle of attacks. The results of force coefficients on wind turbine blades will lead to improve the next stall-delay model. The results show that the K- ω SST turbulence model is suitable for the simulation of the flow at high angle of attacks. So, that model is used to evaluate the flow behavior of wind turbines on the cut-off wind speed zone.

Keywords: Angle of attacks, Separation flow, CFD, wind turbines, Stall-delay

CST-2006

1. บทนำ

ปัจจุบันการวิจัยทางด้านพลศาสตร์ของกังหันลม มีอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านใบกังหันลม เนื่องจาก ถ้ามีความรู้ความเข้าใจที่ดีเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแล้วย่อมจะสามารถนำไปสู่การสร้าง และ ออกแบบใบกังหันลมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดออกมาได้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากหลาย หากแต่การไหลผ่านกังหันลมซึ่งเป็นแพนอากาศที่กำลังหมุนยังมีความซับซ้อนอยู่มาก เนื่องจากเมื่อกังหันลมทำงานที่ความเร็วลมสูงขณะที่ความเร็วรอบคงที่ทำให้มุมปะทะที่เกิดขึ้นกับใบกังหันมีค่าสูง ก่อให้เกิดการไหลเกิดการแยกตัว และก่อให้เกิดการปัด(stall)ในที่สุด นอกจากนี้กังหันลมที่กำลังหมุนจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากขึ้นเรียกว่า stall-delay ซึ่งทำให้ค่าคุณลักษณะทั้งแรงยกและแรงต้านของแพนอากาศมีค่าเปลี่ยนไปจากสภาพที่ไม่หมุนหรือผลการทดลองการไหลผ่านแพนอากาศหนึ่งในอุโมงค์ลมเป็นอย่างมาก

พฤติกรรมที่เกิด stall-delay เป็นผลจากการหมุนของใบพัดที่ส่งผลทำให้เกิดการไหลแยกตัวอันเกิดจากความดันย้อนกลับ(adverse pressure gradient)ข้างลง พฤติกรรมดังกล่าวสังเกตเห็นครั้งแรกจากการหมุนของใบพัดเครื่องบิน โดย Himmelskamp[9] ถึงแม้ว่าจะยังไม่สามารถทราบสาเหตุได้อย่างแน่ชัดแต่ก็พอจะสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากสองปัจจัยหลักนั้นคือความดันพลวัตน์(Dynamics pressure) ซึ่งมีค่ามากขึ้นตามตำแหน่งความยาวของใบพัด ส่งผลให้เกิดปัจจัยที่สองตามมานั้นคือแรงภายนอก(External forces)อีกสองแรง นั้นคือแรงหนีศูนย์กลาง(centrifugal force) และแรงคอริโอลิส(coriolis force)[8] โดยความดันพลวัตน์ และแรงหนีศูนย์กลางจะทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี(radial velocity) นั่นคือเป็นลักษณะการไหลจากความดันสูงไปยังตำแหน่งที่ความดันต่ำกว่า นั่นคือจากโคนใบไปยังปลายใบ การไหลของอากาศไปตามแนวรัศมีของ

ใบพัดไปยังชายปีกหลัง(trailing edge) เป็นผลอันเกิดจากแรงคอริโอลิส(coriolis forces) แรงนี้จะมีลักษณะเป็น positive pressure ทำให้อากาศมีพลังงานจลน์สูงขึ้น[6]มากพอที่จะไหลเกาะไปตามผิวของใบพัดต่อไปอีกได้ ทำให้ยังคงมีแรงยกเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการไหลแยกตัวข้างลง ที่เรียกว่า stall delay นั้นเอง

ในการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดstall-delayเพื่อนำไปสู่แบบจำลองการเกิดความหน่วงบ่อให้แม่นยำนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการทดลองที่มุมปะทะสูง(high angle of attack)ที่มากพอแต่การทดลองที่มุมปะทะสูงจำเป็นจะต้องทดลองที่ความเร็วลมสูงที่เรียกว่าช่วงความเร็วลมตัดออก(Cut-off wind speed) ดังนั้นช่วงความเร็วลมดังกล่าวจึงไม่เกิดขึ้นกับการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์และกังหันลม ในการวิจัยนี้จึงได้นำเอาการคำนวณการไหลแบบพลศาสตร์(Computational Fluid Dynamic หรือ CFD)มาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมชนิด stall-regulated เพื่อหาแบบจำลองการไหลของอากาศ(turbulence model)ที่ดีที่สุดที่สามารถทำนายพฤติกรรมการไหลในช่วงความเร็วลมสูงโดยเฉพาะช่วงความเร็วลมตัดออก(Cut-off wind speed)ได้แม่นยำที่สุด เพื่อใช้เป็นแบบจำลองในการศึกษาพฤติกรรมการไหลที่ความเร็วลมสูงต่อไปในการวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการเลือกแบบจำลองที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบ 3 แบบได้แก่ Spalart-Allmaras model, realizable K-ε model และ SST K-ω model แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบความแม่นยำกับการทดลองจริง

2. การทดลอง กริด และการคำนวณ

การจำลองใช้กังหันลมNREL Phase IVจาก National Renewable Energy Laboratoryใช้แพนอากาศชนิดS809[2] เป็นกังหันลมแบบ2ใบหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง10.058m ในการคำนวณใช้

CST-2006

โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys Fluent CFD 14.0 หาผลเฉลยแบบSIMPLE algorithm สมการโมเมนตัมและสมการความปั่นป่วนประมาณค่าด้วยวิธี Quick และวิธี Second order upwind ภายใต้เงื่อนไขการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ไม่พิจารณาผลของการไหลผ่านดุม (Hub) ของกังหันลม โดยถือว่ามีผลน้อยมากต่อความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นกับผลการจำลอง ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบได้แก่ Spalart-Allmaras model, realizable K-ε model และ SST K-ω model [7] เปรียบเทียบกับผลการทดลองในอุโมงลม โดยข้อมูลที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยครั้งนี้แสดงดังในตารางที่ 1

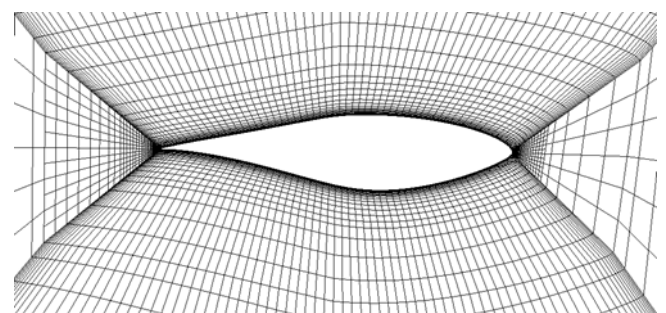
2.1 กริด

ในการคำนวณทาง CFD ได้มีการสร้างกริดโดยรอบกังหันลม เนื่องจากความสมมาตรของกังหันลม จึงได้แบ่งการพิจารณาการคำนวณเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น รูปแบบของโครงสร้างกริดที่ใช้เป็นกริดสี่เหลี่ยม (hexahedral) รูปครึ่งทรงกระบอก โดยมีระยะจากผิวที่เป็นทิศทางลมเข้า (velocity inlet) ถึงกังหันลมมีขนาดเป็น 10 เท่าของรัศมีกังหันลม ระยะของผิวทางออก และระยะห่างจากผิวข้างของกังหันลมยาวเป็น 5 เท่าของรัศมีกังหันลม เหตุที่สร้างผิวล้อมรอบกังหันลมที่มีขนาดใหญ่ขนาดนั้น เพื่อป้องกันผลกระทบและการรบกวนการไหลของผนังของผิวดังกล่าว ที่จะทำให้อาจส่งผลกับคำตอบของการคำนวณที่ผิดพลาดไป และเหตุที่สร้างระยะจากผิวทางเข้าลม (inlet) จนถึงกังหันลมมีค่ามากกว่า ผิวด้านอื่นก็เพื่อป้องกันการถูกรบกวนจากระยะผนัง และรีดลมให้ได้ความเร็วลมที่ถูกต้องตามต้องการก่อนที่ลมนั้นจะเข้าปะทะกับใบกังหันลม ใช้กริดทั้งสิ้น 2.5×10^6 กริด แบ่งกริดตามความยาวของใบกังหันลมได้ 230 กริด และ 200 กริด รอบหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 1 กริดแรกมีระยะห่างผิวไร้มิติ (Dimensionless wall distance หรือ y^+) โดยเฉลี่ยเท่ากับหนึ่ง และมีอัตราส่วนขยายความสูงเทียบกับ กริดที่อยู่ติดกันไม่เกิน 1.2 เท่า ควบคุมอัตราส่วนความยาวด้านของกริด (Aspect ratio) ไว้ต่ำกว่า 3700

ตารางที่ 1: เงื่อนไขในการคำนวณ

Wind speed [m/s]	RPM	Density [kg/m ³]	Viscosity X10 ⁻⁵ [kg/m·s]
5.0	72	1.246	1.769
7.0	71.9	1.246	1.769
10.0	72.1	1.246	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

กำหนดให้ผิวด้านหน้า และด้านข้างกังหันลมเป็นความเร็วลมเข้า (velocity inlet) ผนังด้านหลังกังหันลม กำหนดเป็นความดันออก (pressure outlet) ผิวของกังหันลมทั้งหมดถูกกำหนดเป็นพื้นผิวเคลื่อนที่ (moving wall) โดยจำลองใบกังหันลมขึ้นมาเพียงหนึ่งใบ และใช้ประโยชน์จากความสมมาตรของกังหันลม กำหนดให้ผิวสมมาตรของกังหันลมนั้นเป็นพื้นผิวรอบ (periodic) โดยโปรแกรมจะใช้ผิวนี้อีกในการจำลองสร้างกังหันลมขึ้นมาอีกใบเพื่อใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 1 กริดโดยรอบผิวของใบพัดที่หน้าตัด 95%

2.2 การคำนวณมุมปะทะ (Angle of Attack)

ในการประมาณค่ามุมปะทะที่เกิดขึ้นกับใบกังหันลมในแต่ละหน้าตัดที่เราสนใจ มีผู้นำเสนอไว้หลายแบบ [3][4] ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการ

CST-2006

ประมาณหาค่ามุมปะทะด้วยวิธีทาง CFD ในการคำนวณหาค่าความเร็วลมเหนี่ยวนำตามแนวแกนที่เกิดขึ้นบริเวณ ด้านหน้าและหลังใบพัด(Upstream และ Downstream) เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่าย มีความแม่นยำ และน่าเชื่อถือสูง[3] โดยการสร้างพื้นผิววงแหวนขึ้นมาในตำแหน่งหน้าตัดของกังหันลมที่สนใจจะประมาณค่ามุมปะทะ ความเร็วลมเฉลี่ยที่อ่านค่าได้จากพื้นผิววงแหวน จะเป็นฟังก์ชันของระยะจากกังหันลม และสามารถประมาณความเร็วลมเหนี่ยวนำได้โดยใช้สมการ Lagrangian polynomial interpolation เมื่อแบ่งระยะออกเป็น N หน้าตัด แต่ละหน้าตัดมีระยะ $z = z_i, i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ จะทำให้ได้ฟังก์ชันของความเร็วลมเป็น $f(z_i)$ แล้วความเร็วลมที่ตำแหน่ง $z = z_0$ สามารถหาได้จากสมการ (1)

$$f(z_0) = \sum_{i=1}^N \left[f(z_i) \left(\prod_{j=1, j \neq i}^N \frac{z_0 - z_j}{z_i - z_j} \right) \right] \quad (1)$$

ความเร็วลมเฉลี่ย(V_1) ที่ z_i สามารถอ่านได้จากข้อมูลการคำนวณจากCFDความเร็วลม(V_2) ที่ $z=z_0$ สามารถหาได้จากสมการ (1) ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นสามารถหามุมปะทะได้จากสมการ (2)

$$\alpha_{eff} = \tan^{-1} \left(\frac{V_2}{r\Omega} \right) - \theta \quad (2)$$

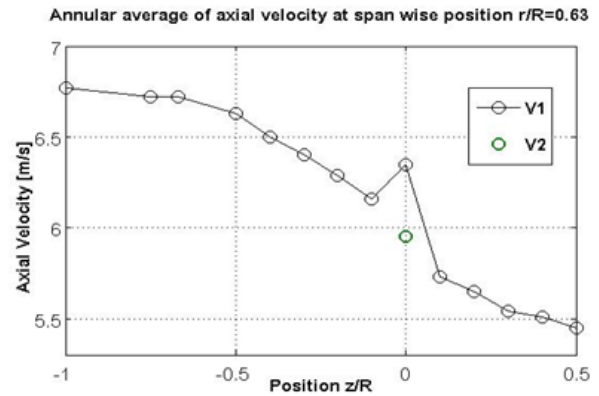
เมื่อ θ คือ มุมบิด(Local twist)ค่ามุมปะทะที่ได้นี้เมื่อนำไปวิเคราะห์ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉาก(C_N)และสัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัส(C_T)ของแต่ละหน้าตัดไปผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสู่การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงยก(C_L)และสัมประสิทธิ์แรงต้าน(C_D)ที่มุมปะทะต่างๆ ตามสมการที่(3)และ(4)

$$C_L = C_N \cos \theta + C_T \sin \theta \quad (3)$$

$$C_D = C_N \sin \theta - C_T \cos \theta \quad (4)$$

เมื่อ $\phi = \tan^{-1}(V_2/r\Omega)$ ผลวิเคราะห์นี้เป็นผลที่ได้จากกังหันลมที่กำลังหมุนซึ่งมีพฤติกรรมของStall-Delay

อยู่ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองการไหลผ่านแพนอากาศในอุโมงค์ลมแบบ2 มิติ จะเห็นผลของ Stall-Delayได้อย่างชัดเจนว่ามีความแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2 ความเร็วลมเหนี่ยวนำตามแนวแกนที่ตำแหน่งหน้าตัด $r/R = 0.63$ ความเร็วลม 7 m/s

3. ผลลัพธ์ และการวิจารณ์

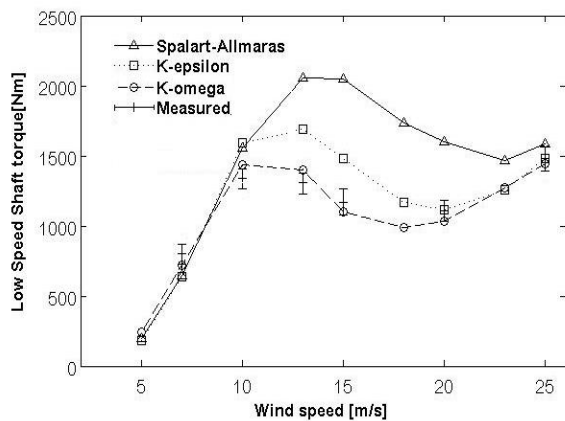
3.1 การยืนยันความถูกต้องของ CFD

ผลของการจำลองการไหลผ่านแพนอากาศ เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองความปั่นป่วน โดยเทียบกับข้อมูลการทดลองแพนอากาศในอุโมงค์ลมของแพนอากาศรุ่นS809[2] ซึ่งทดสอบในอุโมงค์ลมของ National Renewable Energy Laboratory[1] ที่ความเร็วลม 5, 7, 10, 13, 15, 18, 20, 23, 25 m/s โดยทำการเปรียบเทียบวัดแรงบิด (Torque) แรงในแนวตั้งฉาก (Normal forces) และแรงในสัมผัส (Tangential forces) ตลอดทั้งใบกังหัน เทียบกับข้อมูลการทดลองจากอุโมงค์ลมซึ่งจะอยู่ในรูปของ Low Speed Shaft Torque, Root flap moments และ Edge moments ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบผลการจำลองสัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficients) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (drag coefficients) ของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสามแบบ เทียบกับการทดสอบแพนอากาศแบบ 2 มิติในอุโมงค์ลมด้วย

เมื่อพิจารณาผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลม ที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม Ansys fluent

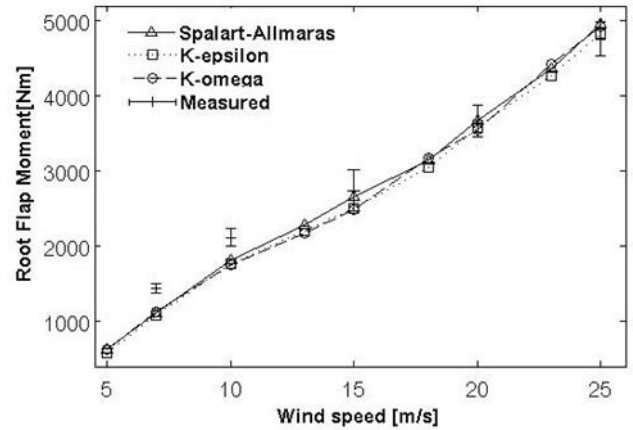
CST-2006

CFD14.0เทียบกับการทดลองในอุโมงลม ที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 1 จากรูปที่3 ในภาพรวมโดยเปรียบเทียบระหว่าง แบบจำลองทั้งสามแบบพบว่า มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยสามารถแบ่งได้เป็น4ช่วงหลักๆกล่าวคือ ในช่วงความเร็วลมจาก 5-10m/s เป็นช่วงที่แรงบิด(Torque)กำลังเพิ่มขึ้น จากความเร็วลม10-15m/s เป็นช่วงที่เกิดตรงบิดสูงสุด ความเร็วลม15-20m/s เป็นช่วงที่เป็นช่วงที่แรงบิดมีค่าลดลง และช่วงความเร็วลม 20-25m/s แรงบิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

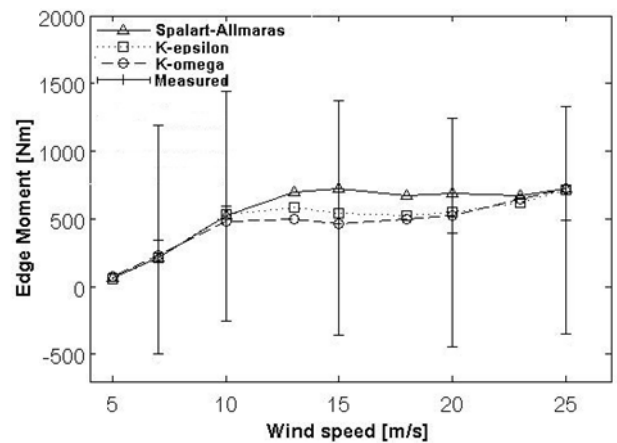


รูปที่ 3 เปรียบเทียบการวัดแรงบิดและผลการจำลองด้วย CFD สำหรับกังหันลม NREL Phase IV ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 1

เมื่อพิจารณาแต่ละช่วงความเร็วลมพบว่า ช่วงแรก (5-10m/s) ค่าแรงบิดที่อ่านได้จากโปรแกรม มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และมีแรงบิดแตกต่างกันน้อยมาก ในช่วงถัดมา(10-25m/s) ผลของแรงบิดเริ่มมีค่าต่างกันที่ความเร็วลม 10m/s และแตกต่างกันมากที่สุดที่ 15m/s โดยในที่นี้ แบบจำลอง Spalart-Allmaras มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึง75% ตามมาด้วย realizable K- ϵ ที่26%และSST K- ω 6% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาตลอดช่วงความเร็วลมที่ทำการจำลอง (5-25m/s) มีเพียงแบบจำลอง SST K- ω เท่านั้นที่สามารถรักษาความแม่นยำได้ไม่เกิน 20% ในทุกช่วงความเร็วลม



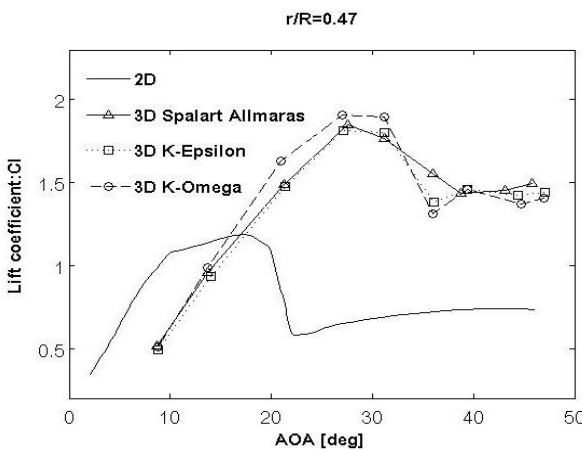
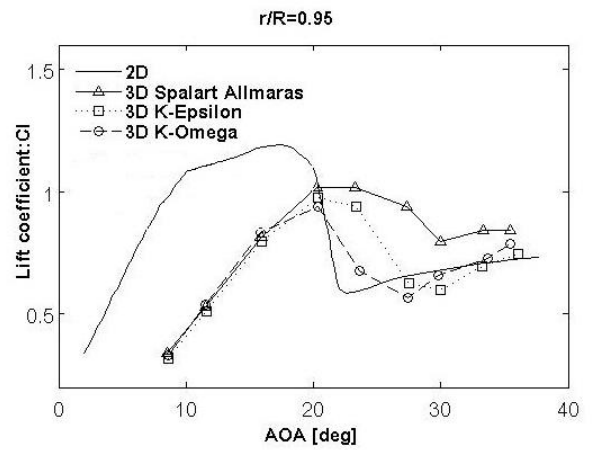
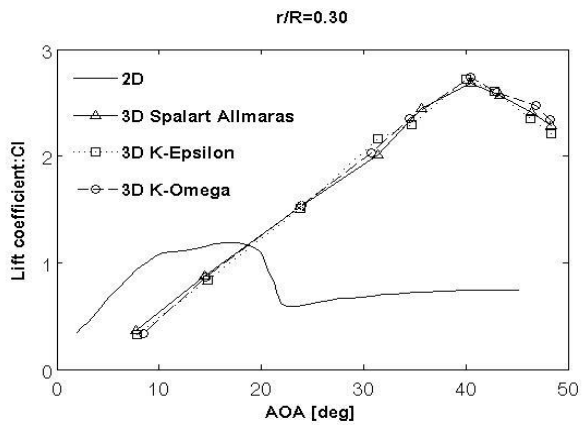
รูปที่ 4 เปรียบเทียบการวัด flap moments กับผลการจำลองด้วย CFD ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 1



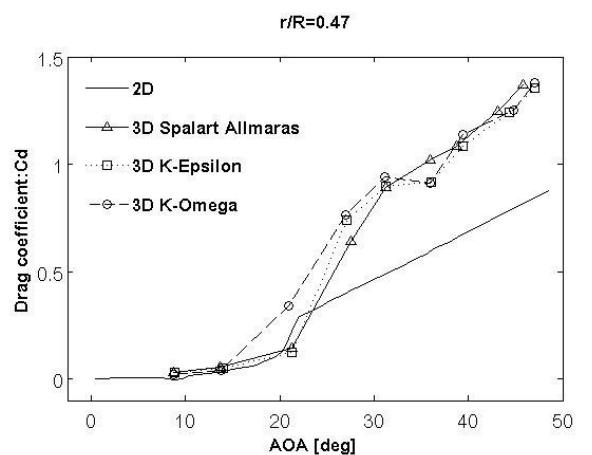
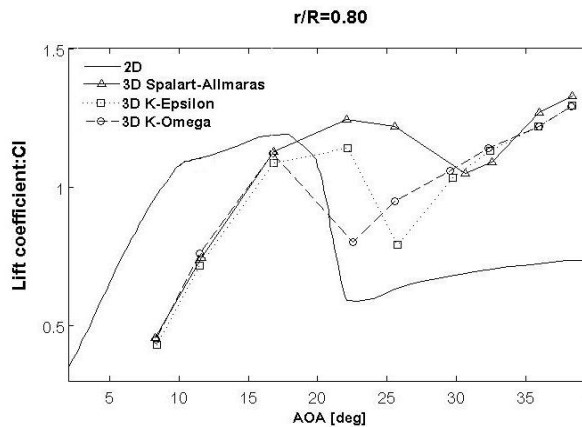
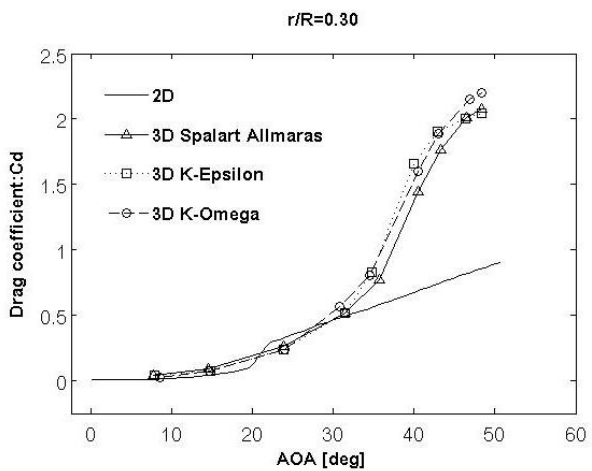
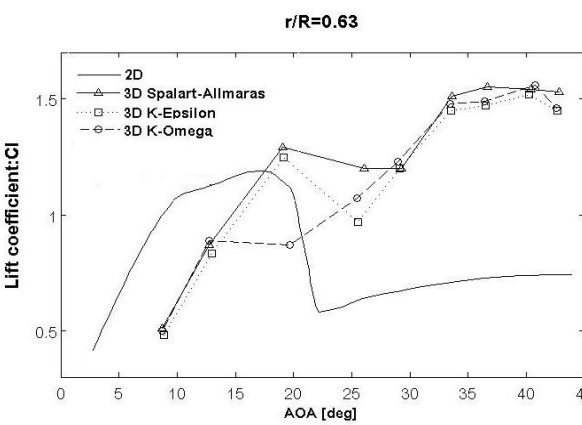
รูปที่ 5 เปรียบเทียบการวัด Edge Moment กับผลการจำลองด้วย CFD ที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 1

สำหรับโมเดล realizable K- ϵ จะมีความคลาดเคลื่อนมากในช่วงความเร็วลม10-20m/s(รูปที่3)แต่มีความแม่นยำมากขึ้นที่ความเร็วลม25m/sโดยมีผลการจำลองตรงกับการทดลองพอดิขณะที่SST K- ω มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3%จากรูปที่ 4 ผลการจำลองRoot flap moment ทั้งสามโมเดล ให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกันมากแต่ Spalart-Allmaras model จะมีค่ามากกว่าโมเดลอื่นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วลม 20-25m/s แรงบิดที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง

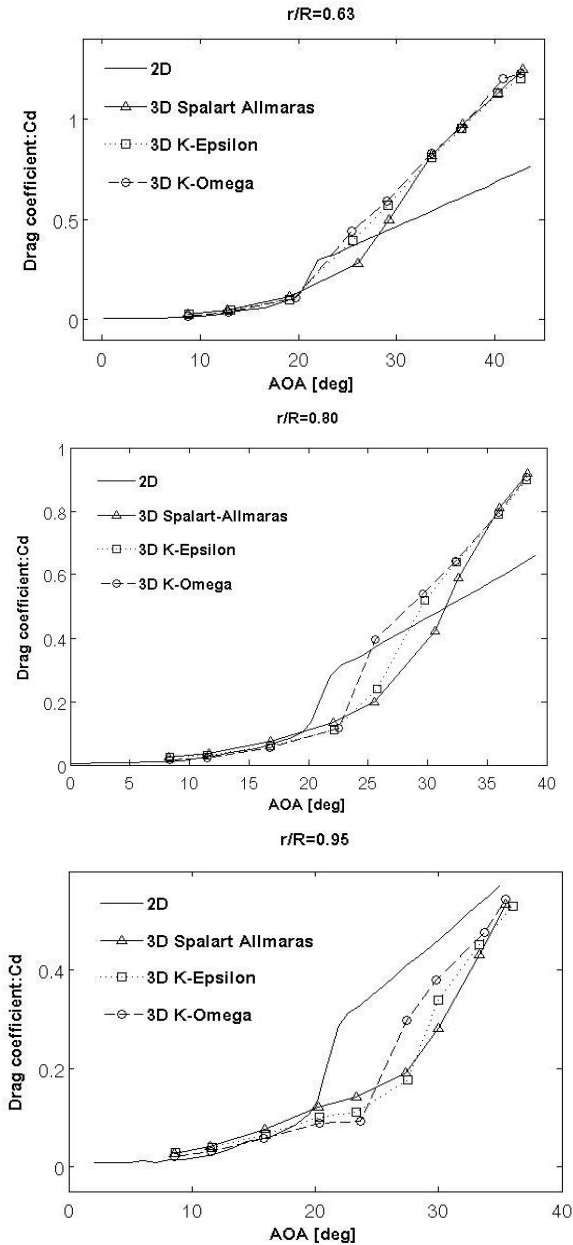
CST-2006



รูปที่ 6 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงยกภายใต้
 ปรากฏการณ์ Stall-Delay ($C_{L,3D}$ vs AOA) ในแต่ละหน้า
 ตัดใบ เทียบกับผลการทดลองใน 2 มิติ



CST-2006



รูปที่ 7 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านภายใต้
พฤติกรรม Stall-Delay ($C_{D,3D}$ vs AOA) ในแต่ละหน้า
ตัดเทียบกับผลการทดลองใน 2 มิติ

โดยที่ความเร็วลม 25m/s มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 4% ขณะที่ Edge Moment (รูปที่ 5) ก็มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จากผลการทดลองที่มีช่วงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามรูปที่ 5 กว้างมากนั้น เกิดจากผลกระทบจากการวัดการไหลของการหมุนภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วงของกังหันลม [5]

3.2 ผลของพฤติกรรม Stall-Delay

เมื่อนำข้อมูลจากผลการจำลองมาแสดงในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ ที่แบ่งออกเป็น 5 หน้าตัด ตลอดตามแนวความยาวของใบกังหันลม (Span) ด้วยอัตราส่วน r/R 0.30, 0.47, 0.63, 0.85 และ 0.95 เมื่อ r และ R คือความยาวของตำแหน่งหน้าตัดที่สนใจ โดยวัดจากแกนหมุน และความยาวใบกังหันลมทั้งหมด ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่เกิดขึ้นกับกังหันลมที่กำลังหมุน ซึ่งเกิดพฤติกรรม Stall-Delay หรือเรียกได้ว่าเป็นค่าแรงยกใน 3 มิติ (3D-Lift coefficient; $C_{L,3D}$) ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาแยกตามหน้าตัดจะพบว่าที่หน้าตัดใกล้กับจุดหมุน (r/R=0.30, 0.47) จะเกิดแรงยกมากและมากกว่าค่าอ้างอิง (2 มิติ) มากและค่อยๆ ลดลงตามความยาวใบที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าในทุกๆ แบบจำลองความปั่นป่วนได้ผลการจำลองไปในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกับผลของแรงต้านใน 3 มิติ (3D-Drag coefficient; $C_{D,3D}$) ที่มีแรงต้านค่าสูงกว่าค่าอ้างอิงมากที่บริเวณโคนใบและลดลงเมื่อความยาวใบเพิ่มมากขึ้น พฤติกรรมเช่นนี้มีความคล้ายคลึงกับผลการทดลอง [1] ที่ค่าแรงยกและแรงต้านภายใต้พฤติกรรม Stall-Delay จะมีค่าสูงกว่ากรณีแรงยกแรงต้านที่ได้จากการทดลองใน 2 มิติ

จากผลการวิเคราะห์ $C_{L,3D}$ และ $C_{D,3D}$ ที่มุมปะทะต่างๆ มีข้อสังเกตเพิ่มเติมก็คือความชันของกราฟในช่วง linear lift (ช่วงแรงยกที่มุมปะทะต่ำ) ความชันของกราฟจะแตกต่างกันไปจากค่าอ้างอิงใน 2 มิติ และแนวโน้มของมุมปะทะที่เกิดแรงยกเท่ากับ 0 (จุดตัดแกน x) จะแตกต่างกันไปจากค่าอ้างอิงอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guntur and Sørensen [3] อย่างไรก็ตามพฤติกรรมเหล่านี้ยังไม่สามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากสาเหตุใด

4.สรุป

จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านกังหันลม โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบพบว่า

CST-2006

1. แบบจำลองแบบ SST K- ω สามารถทำนายค่าแรงบิด (Torque) โดยเฉลี่ยได้อย่างแม่นยำกว่าแบบจำลองอื่นในทุกค่าความเร็วลมที่ทำการจำลอง
2. โดยเฉพาะที่ความเร็วลม 25 m/s แบบจำลอง Realizable K- ϵ สามารถทำนายแรงบิดแรงในแนวตั้งฉาก (Root Flap Moment) และแรงในแนวเฉือน (Edge Moment) ได้แม่นยำที่สุด
3. จากการวิเคราะห์ผลการจำลองการไหลผ่านกังหันลมที่กำลังหมุนด้วย CFD ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าพฤติกรรม Stall-Delay ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่มุมปะทะต่างๆ มีค่าแตกต่างจากการทดลองแบบ 2 มิติอย่างมาก

งานวิจัยต่อไปจะทำการจำลองการไหลที่ความเร็วสูงมากขึ้นเพื่อจะสังเกตเห็นว่าภายใต้กฎการ Stall-Delay จะเกิด leading-edge stall เช่นเดียวกับผลการทดลองใน 2 มิติหรือไม่ และเพิ่มกรณีศึกษาให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น ข้อมูลที่มากขึ้นจะนำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อเสนอแบบจำลอง Stall-Delay ต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jonkman, J.M. *Model of the UAE Wind Turbine of Refinement of FAST_AD*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado,
- [2] Giguere P, Selig MS. *Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor*. NREL/SR-500-26173, Nrel, Golden, CO, 1999
- [3] Guntur, S. and Sørensen, N. An evaluation of several methods of determining the local angle of attack on wind turbine blades, *Wind Energy Division*, Technical University of Denmark (DTU), Denmark.
- [4] Shen, W.Z., Martin, O. L. and Sørensen, N. (2008). *Determination of the Angle of Attack on Rotor Blades*, *Wind Energy Division*, Technical University of Denmark (DTU), Denmark.
- [5] Sørensen, N.N. Michelsen, J.A. Schreck, S. *Navier–Stokes Predictions of the NREL Phase VI*
- [6] Breton, S.P., Study of the stall delay phenomenon and of wind turbine blade dynamics using numerical approaches and NREL's wind tunnel tests, *Doctoral thesis for the degree of philosophiae doctor*. 2008.
- [7] Fluent 12.0 theory guide
- [8] Burton, T., Sharpe D. (2001). *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, New York.
- [9] Himmelskamp, H. (1947). Profile investigations on a rotating airscrew. *MAP Volkenrode Report and Translation* No. 832.