

# CST32

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 19-21 ดุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

# การจำลองการไหลผ่านกังหันลมโดยใช้การจำกัดความหนืดวนพาที่ต่างกัน Simulation of Flow over Wind Turbine using Different Eddy-Viscosity Limitation

<u>ี วิโรจน์ แบบพิมาย</u>1และ ทวิช จิตรสมบูรณ์<sup>1</sup>\*

'สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 \*ติดต่อ: E-mail: <u>tabon@sut.ac.th</u>, โทรศัพท์: 044 224 410, โทรสาร: 044 224 411

#### บทคัดย่อ

บทความนำเสนอความสามารถของแบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \omega$  SST และ Transition  $\gamma - \text{Re}_{\rho}$  ที่มีการ ปรับระดับการจำกัดความหนืดวนพาในการจำลองการไหลผ่านแพนอากาศ S809 แบบสถิตย์และใบกังหันลม NREL Phase VI ที่กำลังหมุน ผลการศึกษาที่ได้พบว่า ระดับค่าการจำกัดความหนืดวนพาที่เปลี่ยนไปส่งผลกระทบ อย่างมากต่อผลการทำนายค่าแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสอง ซึ่งแบบจำลอง ความปั่นป่วน  $k - \omega$  SST และ Transition  $\gamma - \text{Re}_{\rho}$  ที่ทำการปรับขนาดตัวจำกัดความหนืดวนพาให้มีค่าที่เหมาะสม ค่าหนึ่งจะทำให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดีทั้งในแพนอากาศและกังหันลม **คำหลัก**: แบบจำลองความปั่นป่วน, การไหลผ่านกังหันลม, การไหลผ่านแพนอากาศ S809, ระดับความหนึดวนพา

#### Abstract

This present paper is aimed to test and assess the capability of eddy-viscosity limiter which is used to limit the turbulence shear stress level of the turbulence models. Two turbulent models,  $k - \omega$  SST and Transition  $\gamma - \text{Re}_{\theta}$  with different level of eddy-viscosity limiters are employed to predict threedimensional rotating wind turbine flow. The results showed the sensitivity of the solution on the eddy-viscosity limiter. Both  $k - \omega$  SST and Transition  $\gamma - \text{Re}_{\theta}$  models could produce good agreement with the experiment if the models have suitable levels of eddy-viscosity limitation.

Keywords: Turbulence models, Flow over wind turbine, Flow over airfoil S809, Eddy viscosity limitation



### 1. บทนำ

การออกแบบกังหันลมนั้น วิศวกรส่วนใหญ่นิยมเริ่มต้น ด้วยการออกแบบเชิงอากาศพลศาสตร์ของใบ ดังนั้น การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบทั้ง กับแพนอากาศกังหันลมและใบกังหันลม งานวิจัยและ พัฒนาวิธีการคำนวณ CFD เพื่อให้ได้ความถูกต้อง แม่นยำในการทำนายประสิทธิภาพเชิงอากาศ พลศาสตร์ของกังหันลมจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ เนื่องจากส่งผลกระทบโดยตรงต่อการประเมิน สมรรถนะของกังหันลม การเลือกใช้เครื่องกำเนิด กระแสไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ

การใช้วิธีการ CFD กับสมการ Navier-Stokes แบบเต็มรูปในการจำลองการไหลผ่านใบกังหันลมนั้น เริ่มจาก N.N. Sorensen and Hansen [1] ต่อด้วย Duque et al. [2] สำหรับปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา ้นักวิจัยส่วนใหญ่ได้มุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบผลการ คำนวณ CFD กับกังหันลม NREL Phase VI เนื่องจากมีการวัดที่ละเอียดได้มาตรฐาน (Simms et al, 2001) อาทิเช่น Sørensen et al. [3] และ Pape and Lecanu [4] ใช้วิธี Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) ด้วยแบบจำลอง  $k-\omega$  SST ในการทำนายแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ พบว่า ผลการคำนวณแรงบิดที่ได้จะสอดคล้องกับการ ทดลองอย่างดีในช่วงความเร็วลมต่ำ แต่เมื่อความเร็ว ลมสูงกว่า 10 m/s จะมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง Langtry et al. [5] เปรียบเทียบกรณีจำลองด้วย แบบจำลองปั่นป่วน *k – w* SST กับแบบจำลอง  $k - \omega$  SST ที่เพิ่มแบบจำลอง Transition  $\gamma - \operatorname{Re}_{\theta}$  ที่ นำเสนอโดย Menter et al. [6] เข้าไป พบว่า การคิด ด้วยจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ผลของ Transition โดยเฉพาะในช่วงความเร็วลมต่ำที่ซึ่งการไหลเป็นการ ใหลแบบชิดผิว เช่นเดียวกับ Sørensen [7] ที่ทดสอบ แบบจำลอง  $k-\omega$  SST ที่เพิ่มแบบจำลอง Transition γ-Re<sub>θ</sub> เข้าไปด้วย พบว่า ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับ การทดลองดีกว่าที่ความเร็วลมต่ำ แต่จะให้ผลลัพธ์ที่ ใกล้เคียงกับกรณีจำลองด้วยแบบจำลองปั่นป่วน

โดยภาพรวมแล้วที่ผ่านมาการคำนวณ CFD จำลองการใหลผ่านกังหันลม NREL Phase VI จะ ทำนายแรงบิดได้ไม่สอดคล้องกับการทดลองในช่วง ้ความเร็วลมสูงกว่า 9 m/s ขึ้นไป เนื่องจากเป็นสภาวะ ที่แพนอากาศของใบทำมุมปะทะสูง มีการไหลแยก เกิดขึ้น การไหลจะอยู่ในสภาวะไม่คงตัวแบบ 3 มิติ สังเกตว่านักวิจัยจำนวนมากนิยมใช้แบบจำลอง Menter's *k* – *w* SST [8, 9] เนื่องจากแบบจำลอง นี้ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำกว่า  $k - \omega$  SST แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ 2 สมการทั่วไป การที่ การไหลแยกและการไหลภายใต้แรงดันต้าน (adverse pressure gradient) ได้ดี เนื่องจากแบบจำลองนี้ได้ใช้ วิธีการจำกัดค่าความหนืดวนพา (eddy viscosity) เพื่อ ไม่ให้แบบจำลองผลิตระดับค่าความเค้นเฉือนปั่นป่วน (turbulence shear stresses) ที่สูงเกินไป นอกจาก Menter [8, 9] แล้วมีการใช้วิธีการจำกัดความหนืดวน พาในแบบจำลองความปั่นป่วนต่าง ๆ [10-14]

บทความนี้จะทำการศึกษาความสามารถของการ จำกัดค่าความหนีดวนพาในแบบจำลอง *k* – *ω* SST [9] ในการจำลองการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible flow) ผ่านแพนอากาศกังหันลม S809 แบบสองมิติและกังหันลม NREL Phase VI นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษากับแบบจำลอง Transition <sub>γ</sub> – Re<sub>θ</sub>[15] ด้วยเช่นกัน

## 2. แบบจำลองความปั้นป่วน

 การจำกัดระดับ turbulence shear stresses
 วิธีการ RANS นั้นแบบจำลองความปั่นป่วนจะใช้ สมมุติฐานของ Boussinesq ที่นิยามให้ความเค้นเฉือน ปั่นป่วน (turbulence stresses; (*r<sub>ij</sub> = -ρī(u'<sub>j</sub>*)) สัมพันธ์ แบบเชิงเส้นกับอัตราเครียด (strain rate; (*S<sub>ii</sub>*))

 $-\rho \overline{u'_{i}u'_{j}} + \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} = 2\mu (S_{ij} - \frac{1}{3}S_{kk}\delta_{ij})$ <sup>(1)</sup>



เมื่ออัตราเครียด

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$$
<sup>(2)</sup>

สำหรับแบบจำลอง  $k-\omega$  จะคำนวณค่าความหนืด วนพา (eddy viscosity) จากสมการ

$$\mu_{t,0} = \frac{\rho k}{\omega} \tag{3}$$

สำหรับการไหลที่เกิดการไหลแยกและมีแรงดันต้านสูง นั้น พบว่าแบบจำลองจะผลิตความเค้นเฉือนปั่นป่วน สูงเกินไปอันเกิดจากการคำนวณ μ, ด้วยสมการ (3) ดังนั้นเพื่อที่จะจำกัดระดับความเค้นเฉือนปั่นป่วน จึง ต้องใช้ตัวจำกัดความหนืดวนพา (eddy-viscosity limiter) ดังนี้

$$\mu_{t,\lim} = \frac{a\rho k}{S} \tag{4}$$

เมื่อ*a* เป็นค่าคงที่

S =  $\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$  คือ ขนาดของอัตราเครียด ดังนั้นจะได้สมการคำนวณค่าความหนึดวนพาของ แบบจำลองใหม่เป็น

$$\mu_t = \min\left(\mu_{t,0}, \mu_{t,\lim}\right) \tag{5}$$

แนวคิดการจำกัดค่าความหนืดวนพาในสมการที่ (5) ด้วยตัวจำกัดความหนืดวนพา μ<sub>t,lim</sub> ในสมการ (4) มี การใช้โดยนักวิจัยหลายท่าน [8-14] แม้ที่มาของ สมการจะต่างกันแต่ได้สมการในรูปเดียวกัน ซึ่งแต่ละ แบบจำลองมีการใช้ค่าคงที่ *a* แตกต่างกันไป สำหรับ Menter [8, 9] แล้ว เรียกการจำกัดนี้ว่า Shear Stress Transport (SST) Limiter และใช้ค่าคงที่ *a* = 0.31

## 2.2 แบบจำลองความปั้นป่วน $k-\omega\,\mathsf{SST}$

สมการ Transportของ *k – w* SST นำเสนอโดย Menter [8] และปรับปรุงเพิ่มเติมใน Menter et al.[9] เป็นดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_{j}k)}{\partial x_{j}} = P_{k} - D_{k}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \left( \mu + \mu_{i}\sigma_{k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_{j}\omega)}{\partial x_{j}} = \alpha \rho S^{2} - \beta \rho \omega^{2}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \left( \mu + \mu_{i}\sigma_{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_{j}} \right] + 2\left(1 - F_{1}\right) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \frac{\partial \omega}{\partial x_{j}}$$
(7)

เมื่อ

$$P_{k} = \min\left(\mu_{i}S^{2}, 10\rho\beta^{*}k\omega\right), D_{k} = \beta^{*}\rho\omega k$$

$$F_{1} = \tanh\left\{\left(\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^{2}\omega}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^{2}}\right]\right)^{4}\right\}$$

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_{j}}\frac{\partial\omega}{\partial x_{j}}; 10^{-10}\right)$$

ซึ่ง blending function  $F_1$  ใช้เพื่อผสมค่าสัมประสิทธิ์ ของแบบจำลองของ  $k - \omega$  ในส่วนที่เป็นชั้นชิดผิวกับ แบบจำลอง  $k - \varepsilon$  ในส่วนที่เป็น Free-shear layer โดยที่  $F_1$  จะมีค่าเป็น 1 ในชั้นชิดผิว ( $k - \omega$  model) และมีค่าเข้าสู่ 0 ที่ขอบของชั้นชิดผิว ( $k - \varepsilon$  model)

แบบจำลอง  $k - \omega$  SST มีการใช้ blending function กับความหนืดวนพาด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึง ต้องปรับสมการคำนวณความหนืดวนพาในสมการที่ (5) ใหม่เป็น

$$\mu_{t} = \frac{a\rho k}{\max(a\omega; SF_{2})}$$
(8)

เมื่อค่าคงที่ a = 0.31เป็นค่ากำหนดมาตรฐานของ แบบจำลอง

$$F_{2} = \tanh\left\{\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^{2}\omega}\right)\right]^{2}\right\}$$
(9)

ซึ่ง F<sub>2</sub> เป็น blending function ที่มีค่าเป็น 1 ในชั้นชิด ผิวและมีค่าเข้าใกล้ 0 นอกชั้นชิดผิว

### 2.3 แบบจำลอง transtion $\gamma - \operatorname{Re}_{\theta}$

ด้วยเหตุที่แบบจำลอง  $k - \omega$ SST เป็นแบบจำลองชนิด ความปั่นป่วนเต็มที่ (fully turbulent) ซึ่งสามารถใช้ได้ ดีในบางกรณีเท่านั้น สำหรับปัญหาการไหลผ่านแพน อากาศนั้นการไหลจะปะทะกับส่วนหน้าก่อให้เกิดจุด ความเร็วหยุดนึ่ง (stagnation point) แล้วค่อย ๆ พัฒนาการไหลจากการไหลราบเรียบ (laminar) ไปสู่ ช่วงเปลี่ยนตัว (transition) แล้วกระโดดไปสู่การไหล ปั่นป่วนเต็มที่ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแบบจำลอง transition ขึ้นมา ซึ่งแบบจำลอง transition ที่จะศึกษา ในบทความนี้คือ แบบจำลอง  $\gamma - \operatorname{Re}_{\theta}[15]$  ซึ่งLangtry et al. [15] ได้นำเอาแบบจำลอง transition  $\gamma - \operatorname{Re}_{\theta}$ ควบรวมเข้ากับแบบจำลอง  $k - \omega$ SST นำสู่การปรับ



ค่าพจน์การผลิต (Production) และพจน์การเสื่อม สลาย (Dissipation) ของสมการ k ดังนี้  $ilde{P}_k = \gamma_{e\!f\!f} P_k$  (10)

 $\tilde{D}_{k} = \min[\max(\gamma_{eff}, 0.1), 1.0]D_{k}$  (11)

ส่งผลให้แบบจำลอง  $k-\omega$  SST ซึ่งแต่เดิมเป็น แบบจำลองความปั้นป่วนเต็มที่กลายเป็นแบบจำลองที่ สามารถจำลองการไหลช่วง transition ได้

# 3. การทดลอง กริด และการคำหวณ CFD

### 3.1 การทดลอง

การคำนวณ CFD จำลองการไหลผ่านกังหันลม จะทำ การสอบเทียบผลลัพธ์กับการทดสองกังหันลม NREL Phase VI ซึ่งทดลองในอุโมงค์ลมของ NASA Ames [16] โดยกังหันลมตัวนี้ออกแบบโดย Giguere and Selig [17] ใช้แพนอากาศรุ่น S809 ที่ออกแบบโดย Somers [18] เป็นกังหันชนิด 2 ใบ ความสอบใบเชิง เส้น (Linear taper) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ 10.1 เมตรไม่มีมุม Cone โรเตอร์เป็นแบบ Stallregulated หมุนด้วยความเร็วคงที่ 71.9 RPM ติดตั้ง บนเสาทรงกระบอกสูง 12.2 เมตร ความเร็วลมผิดไป ้จากค่าเฉลี่ยไม่เกิน 0.25% การเบี่ยงของมุมลมไม่เกิน 0.5 องศา และมีค่า Turbulence intensity น้อยกว่า 0.5 % ส่วนข้อมูลการทดสอบแพนอากาศรุ่น S809 ใน อุโมงค์ลมจะใช้ข้อมูลการทดสอบในอุโมงค์ลมของ Colorado State University (CSU) ที่เลขเรย์โนล์ด ในอุโมงค์ลมของ Ohio  $0.5 \times 10^{6}$ [19]. State (OSU) ที่เลขเรย์โนล์ด 0.75×10<sup>6</sup> และ University  $1{ imes}10^6$  [20] และในอุโมงค์ลม Delft University of Technology (DUT) ที่เลขเรย์โนล์ด 1×10<sup>6</sup> [18]

#### 3.2 กริด

การจำลองการไหลผ่านแพนอากาศในระบบ 2 มิติ โดนมนแบบวงกลม (O-Grid) โดยควบคุมให้ cell แรก ที่ชิดกับผนังแพนอากาศมีค่า y<sup>+</sup> < 0.2 จำนวนจุดต่อ (node) รอบแพนอากาศประมาณ 300 จุดต่อ อัตรา การขยายกริดในทิศตั้งฉากกับผิวเป็น 1.1 ขนาดของ โดเมนที่ใช้เป็น 15 เท่าของระยะคอร์ด (chord) ของ แพนอากาศ สำหรับกริดของการคำนวณใน 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 1 เนื่องจากเป็นกังหันลม 2 ใบที่ สมมาตรกัน การคำนวณจึงลดเหลือเพียง 1 ใบ โดย กำหนดค่าที่ผิวสมมาตรเป็น periodic condition ปริมาตรคำนวณเป็นรูปทรงกระบอก โดยกริดที่ใช้รอบ ใบกังหันมีลักษณะเป็น O-grid ดังแสดงในรูปที่ 2 กริด ที่ cell แรกควบคุมให้มีค่า y<sup>+</sup>< 2 กริดรอบแพน อากาศของใบมีจำนวน 120 จุดต่อ กริดในทิศทาง ความยาวใบพัดมีจำนวน 80 จุดต่อ ขนาดของด้านทั้ง สาม (ด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้าง) ในปริมาตร ้คำนวณกำหนดใหญ่เป็น 3 เท่าของรัศมีใบ สำหรับ เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (inlet) จะใช้ค่า turbulent intensity = 0.5% และ viscosity ratio = 10 ซึ่ง เพียงพอสำหรับให้การใหลแบบความปั้นป่วนต่ำ



รูปที่ 1 กริดและโดเมนการคำนวณกังหันลมใน 3 มิติ



รูปที่ 2 กริดรอบแพนอากาศของใบกังหันลม

## 3.3 การคำนวณ CFD

การคำนวณ CFD ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Fluent เวอร์ชัน 12 ใช้กรรมวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE algorithm สมการโมเมนตัมและสมการแบบจำลอง ความปั้นป่วนประมาณค่าด้วยวิธี QUICK การไหลเป็น อัดตัวไม่ได้ วิเคราะห์การไหลผ่านใบกังหันลมที่กำลัง หมุนด้วยระบบ Rotating Reference Frame



ค่าผลต่างเพียง 0.01 (∆*a* = 0.01) แต่ได้ผลการ คำนวณค่าแรงยกและแรงฉุดที่แตกต่างกันอย่างมาก

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณการไหลใน ช่วงแรกที่มุมปะทะต่ำแรงยกมีอัตราการเพิ่มขึ้นแบบ เชิงเส้น พบว่า แบบจำลอง SST4 คำนวณแรงยกและ แรงฉุดได้สอดคล้องกับการทดลองมากกว่าแบบจำลอง SST2 เนื่องจากการที่แบบจำลอง SST4 สามารถ จำลองการไหล transition ได้

การไหลต่อจากช่วงแรกนั้นการคำนวณโดยไม่ใช้ การจำกัดความหนืดวนพา ทั้ง SST2.none และ SST4,none ให้ค่าแรงยกที่สูงเกินไปในทุกค่าเลขเรย์ โนล์ด (นี่อาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองความ ปั่นป่วนชนิดต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่ไม่ได้ใช้การจำกัด ความหนืดวนพาให้ผลการคำนวณในปัญหาการไหล ภายใต้แรงดันต้านได้ด้อยกว่าแบบจำลอง Menter's  $k-\omega$  SST) การคำนวณด้วยแบบจำลอง SST2 ที่มี การปรับลดค่า *a* ลงมาจากค่ากำหนดมาตรฐาน (a=0.31) ให้มีค่าเป็น 0.29 ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ สอดคล้องกับการทดลองมากขึ้นในทุกค่าเลขเรย์โนล์ด อีกทั้งสามารถจับพฤติกรรมการหักงอของเส้นกราฟ (ช่วงมุมปะทะ 9-13 องศา) ได้เป็นอย่างดี ส่วนการ ้คำนวณด้วยแบบจำลอง SST4 นั้นการปรับลดค่า a ลงมาจากค่ากำหนดมาตรฐานช่วยให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ แรงฉุดที่สอดคล้องกับการทดลองมากขึ้น แต่ได้ค่า ้สัมประสิทธิ์แรงยกที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองและมี แนวโน้มต่ำลงกว่าการทดลองที่มุมปะทะช่วงประมาณ 10 ถึง 20 องศา ซึ่งช่วงมุมปะทะดังกล่าวเป็นช่วงที่มี ความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นการบ่งชี้คุณลักษณะ เชิงอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศถึงความสามารถ ในการให้แรงยกสูงสุดก่อนการป้อ (stall) ใน ขณะเดียวกันก็เป็นช่วงที่ยากต่อการทำนายด้วย CFD ้ด้วยเช่นกัน เพราะมีการใหลแยกผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง ้ดังนั้นในกรณีการจำลองด้วยแบบจำลอง SST4 การใช้ ้ค่า *a* = 0.31 ในภาพรวมแล้วถือว่าให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าที่ ้ค่า *a* อื่นๆ (ที่เป็นเช่นนี้อาจมาจากการที่แบบจำลอง  $\gamma - \mathrm{Re}_{ heta}$  พัฒนาขึ้นภายใต้การใช้ค่า transition a = 0.31 ในแบบจำลอง  $k - \omega$  SST)

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ คือ  $k - \omega$  SST [9] และ transition  $\gamma - \text{Re}_{\theta}$  [15] ซึ่งจะทำการศึกษา ความสามารถของแบบจำลองทั้งสองเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงขนาดตัวจำกัดความหนืดวนพา ( $\mu_{t,\text{lim}}$ ) ในสมการที่ (8) โดยทำการปรับขนาดของค่า a จาก ค่ากำหนดมาตรฐานเดิมของแบบจำลอง (a = 0.31) ให้มีค่าเป็น a = 0.30, 0.29, 0.28 และการคำนวณที่ ไม่ใช้การจำกัดความหนืดวนพา (นั่นคือ  $\mu_t = \mu_{t,0}$ ) เพื่อความกระชับของชื่อเรียกต่อไปในบทความนี้จะ เรียกแบบจำลอง  $k - \omega$  SST [9] ว่า SST2 (เนื่องจาก มีสมการ transport 2 สมการ) และเรียกแบบจำลอง transition  $\gamma - \text{Re}_{\theta}$  [15] นี้ว่า SST4 (เนื่องจากมี สมการ transport 4 สมการ)

# 4. ผลลัพธ์และการวิจารณ์ 4.1 ผลการคำนวณแพนอากาศ S809

รูปที่ 3-8 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรง ยก (lift coefficient) และแรงฉุด (drag coefficient) ของการคำนวณ CFD ของแพนอากาศ S809 ที่เลข เรย์โนล์ด (Reynolds Number; Re) ต่างๆ ด้วย แบบจำลอง SST2 และ SST4 ที่มีการปรับค่า a เป็น ค่าต่างๆ ในที่นี้แบบจำลอง SST2 ที่ใช้ค่า a = 0.31, 0.30, 0.29, 0.28 และการไม่ใช้  $\mu_{t,lim}$  แสดงชื่อเรียก ด้วย SST2,a=0.31 ; SST2,a=0.30 ; SST2,a=0.29 ; SST2,a=0.28 ; SST2,a=0.27 และ SST2,none ตามลำดับ (ในการคำนวณด้วย SST4 ก็ใช้ชื่อเรียก ทำนองเดียวกัน)

ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทั้งสอง พบว่า ค่า a ที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลกระทบอย่างมากต่อผล การคำนวณค่าแรงยกและแรงฉุดที่ได้ ซึ่งลักษณะ กราฟแรงยกและแรงฉุดที่ได้จากการคำนวณในทุกค่า เลขเรย์โนล์ดมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ ในช่วงแรกที่มุมปะทะ (angle of attack) ต่ำ แรงยกมี อัตราการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เมื่อค่า a ลดลง ค่าแรง ยกและแรงฉุดจะลดลงเล็กน้อย ความแตกต่างจะเริ่ม มากขึ้นเมื่อมุมปะทะสูงขึ้น ซึ่งเมื่อค่า a ลดลง ค่าแรง ยกจะลดลงและแรงฉุดจะเพิ่มขึ้น และแม้ว่าค่า a จะมี

รูปที่ 6 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงฉุดของแพนอากาศ S809 ที่ Re = 0.5x10<sup>-6</sup> ที่คำนวณด้วย SST4



รูปที่ 5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงฉุดของแพนอากาศ S809 ที่ Re = 1x10<sup>-6</sup> ที่คำนวณด้วย SST2



ูรูปที่ 4 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงฉุดของแพนอากาศ S809 ที่ Re = 0.75x10⁻⁰ ที่คำนวณด้วย SST2





0.6

EXP. DUT

14









รูปที่ 8 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงฉุดของแพนอากาศ S809 ที่ Re = 1x10⁻ํ ที่คำนวณด้วย SST4

#### 4.2 ผลการคำนวณกังหันลม

ผลการคำนวณแรงบิด (Torque) ของกังหันลม NREL Phase VI ที่ความเร็วลมต่างๆ ด้วยแบบจำลอง SST2 และ SST4 เปรียบเทียบกับการทดลองแสดงใน รูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า แบบจำลอง SST2 และ SST4 ที่มีการปรับลดค่า *a* ลง มีแนวโน้ม เหมือนกันคือจะได้ค่าแรงบิดที่ต่ำลง โดยความ แตกต่างจะเห็นได้ชัดเจนช่วงความเร็วลม 9 - 20 m/s

พิจารณาผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง SST2 และ SST4 ที่ใช้ค่า *a* ต่างๆ ที่ความเร็วลม 7 m/s ซึ่ง ที่ความเร็วลมนี้มุมปะทะ ณ หน้าตัด (section) ใด ๆ ตลอดความยาวใบจะมีค่าต่ำกว่า 10 องศา [21] และจะ เกิดการไหลแบบชิดผิวบนใบกังหัน หากย้อนกลับได้ดู ผลการคำนวณค่าแรงยกและแรงฉุดของแพนอากาศ S809 ใน 2 มิติ ในรูปที่ 3-8 ในช่วงมุมปะทะต่ำกว่า 10 องศา จะพบว่าค่าแรงยกและแรงฉุดที่ค่า *a* ต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในกรณีกังหันลมจึงได้ค่า แรงบิดที่ใกล้เคียงกัน และทั้งแบบจำลอง SST2 และ SST4 ให้ผลการทำนายแรงบิดได้สอดคล้องกับการ ทดลองเป็นอย่างดี

ส่วนที่ช่วงความเร็วลม 9 - 20 m/s จะเกิดมุม ปะทะสูงกว่า 10 องศา [21] ซึ่งในกรณีแพนอากาศ 2 มิติ ที่มุมปะทะสูงกว่า 10 องศานั้น การคำนวณด้วย ค่า a ที่ต่างกันจะให้ค่าแรงยกและแรงฉุดแตกต่างกัน ้อย่างชัดเจน ดังนั้นในกรณีกังหันลมก็เช่นกัน แรงบิดที่ ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน จุดสำคัญอยู่ที่ช่วง ความเร็วลม 9-13 m/s ซึ่งเป็นบริเวณใกล้เคียงกับจุด ประเมินกำลังของกังหันลม (rated power) เป็นช่วงที่ ้กังหันลมให้งานรายปีมากที่สุด ดังนั้นความถูกต้อง แม่นยำของการคำนวณในช่วงนี้จึงมีความสำคัญมาก การคำนวณด้วยแบบจำลอง SST2 ที่ใช้ค่ากำหนด มาตรฐาน (a = 0.31) พบว่า ในช่วงความเร็วลม 9-12 ให้ค่าแรงบิดที่สูงกว่าการทดลอง (ดูรูปที่ 9 m/s ประกอบ) แต่เมื่อทำการปรับลดค่า *a* ลงมาให้มีค่า

# CST32



สุดท้ายการไหลช่วงความเร็วลมสูงกว่า 20 m/s ซึ่งจะเกิดมุมปะทะสูงมาก โดยเฉพาะบริเวณช่วงโคน ใบ (inboard part) การไหลจะเป็นการไหลแยกอย่าง สมบูรณ์ตั้งแต่ขอบนำ (leading edge) ของใบและการ ไหลแยกได้ครอบคลุมหมดทั่วผิวด้านบนของใบเสมือน การไหลผ่านแผ่นราบ (flat plate) ซึ่งผลการคำนวณที่ ได้จากค่า *a* ต่าง ๆ ให้ค่าแรงบิดไม่ต่างกันมากนัก ซึ่ง ทั้ง SST2 และ SST4 ให้ผลการทำนายแรงบิดที่ต่ำ กว่าการทดลอง

เมื่อย้อนไปดูผลการคำนวณใน 2 มิติ ดังรูปที่ 6-8 ที่ช่วงมุมปะทะ 10- 20 องศา แบบจำลอง SST4 ที่ใช้ ค่า *a* = 0.31 ให้ค่าแรงยกที่สูงกว่าการทดลองและหาก ใช้ค่า *a* = 0.32 ก็ยิ่งจะได้ค่าแรงยกที่สูงกว่าการ ทดลองไปอีก แต่เมื่อพิจารณาผลการคำนวณกังหันลม ในรูปที่ 10 ที่ความเร็วลม 10 m/s ที่ซึ่งมุมปะทะตลอด ทั้งใบมีค่าไม่เกิน 18 องศา [21] การใช้ค่า *a* = 0.31 กลับให้แรงบิดต่ำกว่าการทดลองและการใช้ค่า *a* = 0.32 สามารถให้ค่าแรงบิดที่แม่นยำ นั่นแสดงว่า แบบจำลอง SST4 มีความ "ไว" (sensitive) กับระบบ การไหลใน 3 มิติ ที่มีการหมุนร่วมด้วย ซึ่งต่างจาก กรณีของแบบจำลอง SST2 ที่ผลการคำนวณกังหันลม ใน 3 มิติกับแพนอากาศใน 2 มิติมีแนวโน้มสอดคล้อง กันที่ความเร็วลมดังกล่าว

อนึ่ง การไหลผ่านกังหันลมนั้นยังมีผลของ ปฏิสัมพันธ์ของแรงใน 3 มิติ กล่าวคือ แรงเหวี่ยง (Centrifugal force) และแรงคอริโอลิส (Coriolis force) ที่ช่วยหน่วงและยับยั้งการไหลแยก ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยก และลดแรงฉุดให้กับกังหันได้ในระดับหนึ่ง การที่ SST2 และ SST4 ทำนายแรงบิดได้ต่ำในช่วงความเร็ว ลม 13 – 17 m/s อาจเพราะความไม่สามารถจำลอง ผลของแรงทั้งสองนี้ก็เป็นได้ และอีกสาเหตุอาจมาจาก ที่ความเร็วลมสูงจะก่อให้เกิดมุมปะทะสูง จะเกิดการ ไหลแยกและมีสภาวะไม่คงตัวใน 3 มิติสูง การคำนวณ ด้วยวิธี RANS แบบคงตัว (steady) อาจไม่เพียงพอ

สำหรับการลดระดับค่า μ<sub>t,lim</sub> ลงด้วยการปรับลด ค่า a นี้เป็นการลดค่าขีดจำกัดบน (upper limit) ของ การคำนวณค่าความหนีดวนพา μ<sub>t</sub> ส่งผลให้

เป็น 0.30 พบว่า ให้แรงบิดที่สอดคล้องกับการทดลอง มากขึ้น ส่วนการใช้ค่า *a* = 0.29 ให้แรงบิดที่แม่นยำ สอดคล้องกับการทดลองดีจนถึงความเร็วลมที่ 10 m/s การคำนวณด้วย SST4 ที่ใช้ค่า *a* = 0.29, *a* = 0.30 และค่ากำหนดมาตรฐาน (*a* = 0.31) ให้ แรงบิดต่ำกว่าการทดลองที่ความเร็วลมสูงกว่า 9 m/s ขึ้นไป แต่เมื่อลองปรับเพิ่มค่า *a* ให้มีค่าเป็น *a* = 0.32 สามารถให้ค่าแรงบิดที่แม่นยำสอดคล้องกับ การทดลองจนถึงความเร็วลมที่ 11 m/s ส่วนการใช้ *a* = 0.33 ทำนายแรงบิดที่สูงเกินไปในช่วงความเร็วลม 10-11 m/s และสำหรับการคำนวณโดยไม่ใช้วิธีการ จำกัดความหนืด ทั้ง SST2,none และ SST4,none ให้ ค่าแรงบิดที่สูงเกินไปที่ความเร็วลมมากกว่า 9 m/s



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลการคำนวณแรงบิดกังหันลม NREL Phase VI ด้วยแบบจำลอง SST2



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการคำนวณแรงบิดกังหันลม NREL Phase VI ด้วยแบบจำลอง SST4

# CST32





(d) SST4,none รูปที่ 12 แสดง Limiting streamline บนผิวด้านดูดของ

ใบที่ความเร็วลม 10 m/s คำนวณด้วย SST4

#### 5. สรุปผล

ได้ทำการจำกัดความหนืดวนพาของแบบจำลอง ความปั่นป่วน  $k - \omega$  SST และ Transition  $\gamma - \operatorname{Re}_{\sigma}$ โดยทำการปรับขนาดค่า a พบว่า ค่าความหนืดวน พาที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยส่งผลกระทบอย่างมากต่อ ผลการทำนายค่าแรงเชิงอากาศพลศาสตร์บนแพน อากาศสองมิติที่นิ่ง และบนใบกังหันลมสามมิติที่หมุน สำหรับแบบจำลอง  $k - \omega$  SST นั้นค่า a ที่เหมาะสม ในแพนอากาศสองมิติที่นิ่งกับใบกังหันลมที่กำลังหมุน เป็นค่าเดียวกัน ส่วนแบบจำลอง Transition  $\gamma - \operatorname{Re}_{\sigma}$ นั้น a ที่เหมาะสมในแพนอากาศสองมิติที่นิ่งต่างจาก ค่า a ที่เหมาะสมในแพนอากาศสองมิติที่นิ่งต่างจาก ค่า a ที่เหมาะสมในใบพัดกังหันลมที่กำลังหมุนอย่าง มีนัยสำคัญ ดังนั้นการปรับใช้ค่า a จึงควรต้องมีความ ระมัดระวังอย่างยิ่ง มิฉะนั้นผลลัพธ์ที่ได้อาจมีความ ผิดพลาดได้มาก

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการ ปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ของสำนักงาน กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

#### 7. เอกสารอ้างอิง

 Sørensen NN, Hansen MOL. (1998). Rotor performance predictions using a Navier-Stokes method. Presented at AIAA Aerosp. Sci. Meet.
 Exhib., 36th, Reno, AIAA Pap. No. 1998-25
 Duque EPN, van Dam CP, Hughes S. (1999).
 Navier-Stokes simulations of the NREL combined experiment phase II rotor. Presented at AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib., 37th, ASME Wind Energy Symp., Reno, AIAA Pap.No. 1999-37

แบบจำลองผลิตระดับค่าพลังงานจลน์ของความ ปั่นป่วนและความหนืดวนพาในระดับที่ต่ำลง ดังนั้นจะ มีโมเมนตัมของความปั่นป่วนน้อยลง มีความสามารถ ทะลวงผ่านแรงดันต้านได้น้อยลง ส่งผลให้เกิดการการ ไหลแยกได้เร็วขึ้น รูปที่ 11 และ 12 แสดงลักษณะ Limiting streamline ที่บนผิวด้านดูด (suction side) ของใบที่ความเร็วลม 10 m/s ซึ่งจะเห็นว่าการลดค่า *a* ลง ตำแหน่งการไหลแยกจะขยับเข้าหาขอบนำ (Leading edge) ของแพนอากาศของใบ เกิดการไหล แยกกินพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่งผลให้ได้แรงบิดที่ต่ำลง









[3] Sørensen NN, Michelsen JA, Schreck S. (2002). Navier-Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA-AMES 80 ft × 120 ft wind tunnel. *Wind Energy*, Vol.5, pp.151–169

[4] Pape, AL and Lecanu, J., (2004). 3D Navier-Stoke Computations of a Stall-regulated Wind Turbine. *Wind Energ*, Vol. 7, pp. 309–324.

[5] Langtry, R.B., Gola, J., and Menter, F.R., Langtry, R.B., (2006). Predicting 2D Airfoil and 3D Wind Turbine Rotor Performance using a Transition Model for General CFD Codes. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno 2006, AIAA 2006-0395

[6] Menter FR, Langtry RB, Likki SR, Suzen YB, Huang PG, Volker S. (2004). A correlation-based transition model using local variables, part I: model formulation. In *Proc. ASME Turbo Expo 2004, Power Land, Sea,Air, Vienna, Austria*, GT2004-53452. New York: ASME

[7] Sørensen, N. N., (2009). CFD modeling of laminar-turbulent transition for airfoils and rotors using the  $\gamma - \text{Re}_{\theta}$  Model. *Wind Energy*, DOI: 10.1002/we.325

[8] Menter, F. R., Two-Equation Eddy-ViscosityTurbulence Models for Engineering Applications.(1994), *AIAA Journal*, vol.32, pp.1598-1605

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

[10] Bradshaw, P., Ferriss, D. H., and Atwell, N.
P.,(1967). Calculation of Boundary Layer
Development Using the Turbulent Energy
Equation, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 28, Pt.
3, pp. 593–616.

[11] Coakley, T. J. (1983). Turbulence Modeling Methods for the Compressible Navier-Stokes Equations, *AIAA Paper 83-1693*.

[12] Durbin, P. A. (1996). On the k- *E* Stagnation
Point Anomaly.*International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 17, No. 1, pp. 89–90.

[13] Wilcox D.C., (2008). Formulation of the k-@
Turbulence Model Revisited. *AIAA Journal*, Vol.
46, No. 11.

[14] Thivet, F., (2002), Lessons Learned From RANS Simulations of Shock-Wave/Boundary Layer Interactions, *AIAA* Paper No. 2002-0583.

[15] Langtry,R.B., Menter, F.R., (2009). Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 12, pp. 2894-2906.

[16] Schreck S. (2002). The NREL Full-ScaleWind Tunnel Experiment, *Wind Energ.* 2002;Vol.5, pp. 77–84 (DOI: 10.1002/we.72)

[17] Giguere P, Selig MS. (1999). Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor. *NREL/SR-500-26173*, Colorado.

[18] Somers, D. M. (1997). Design and Experimental Results for the S809 Airfoil. Airfoils, Inc., State College, PA, *NREL/SR-440-6918* 

[19] Butterfield, C.P.; Musial, W.P.; Simms, D.A.
(1992). Combined Experiment Phase I Final Report. *NREL/TP-257-4655*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

[20] 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.

[21] Jonkman, J. M. (December 2003). Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST\_AD. *NREL/TP-500-34755*, Colorado.