

## การจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนนอนด้วย CFD Simulation of Flow over a Horizontal Axis Wind Turbine

ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวีช จิตรสมบุญ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 0-4422-4410 โทรสาร 0-4422-4411 E-mail: chalothorn\_t@hotmail.com

Chalothorn Thumthae and Tawit Chitsomboon

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

Muang District, Nakorn Ratchasima 30000 Thailand Tel: 0-4422-4410 Fax: 0-4422-4411 E-mail: chalothorn\_t@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความเสนอการจำลองการไหลที่สภาวะคงตัวผ่านกังหันลมแกนนอนที่ไม่มีการบิดใบกังหัน ด้วยโปรแกรม 'Fluent' เพื่อทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม การจำลองการไหลทำโดยหาผลเฉลยของสมการอนุกรม มวล และโมเมนตัม ด้วยวิธีปริมาตรจำกัดในสามมิติ โดยใช้วิธีการของความเร็วสัมพัทธ์ที่กังหันอยู่กับที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนไป ได้ทำการศึกษาสองกรณีหลักคือ การไหลแบบไม่คิดความหนืด และแบบคิดความหนืด (โดยคำนวณร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon) ได้ใช้วิธีการปรับกริดแบบละเอียดเฉพาะที่ (Local Grid Refinement) และได้ศึกษาความเป็นอิสระของผลลัพธ์ต่อขนาดของกริดด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทดลองกังหันลมของ National Renewable Lab. (USA) พบว่าผลจากการคำนวณสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี ทั้งกรณีที่ไม่คิดความหนืดและคิดความหนืด โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่เกิดการ stall โดยสรุปการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Fluent มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ทำนายพฤติกรรมกริดการไหลของกังหันลมแบบแกนนอนได้ ซึ่งจะได้ใช้ในการช่วยออกแบบกังหันลมสำหรับใช้งานจริงต่อไป

### Abstract

This paper presents the numerical simulation of horizontal axis wind turbine with untwisted blade in steady state condition, using 'Fluent' code. The objective is for validating Fluent in solving this class of flow. Simulation is carried out by solving conservation equations for mass and momenta in three dimensions using the unstructured-grid finite volume methodology. The rotating reference frame technique was used wherein the blades are fixed in relation to the rotating frame. Inviscid and turbulent flows with a k-epsilon turbulence model were set as study cases. Local grid refinement technique was employed and grid-independent study was also performed. Computational results compared well with field

experimental data of The National Renewable Laboratory (USA), for both inviscid and turbulent conditions, especially when stalls did not occur. This study seems to suggest the adequacy of Fluent code in predicting the flow behaviors in a horizontal axis wind turbine. Consequently, it could be used as an engineering tool for an initial-stage design of wind turbine blades.

### 1. บทนำ

พลังงานลมเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับประเทศไทยในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในปัจจุบันและอนาคต (เนื่องจากประเทศไทยมีย่านที่มีลมแรงกระจายอยู่ตามชายฝั่งทะเลและบริเวณภูเขาในพื้นที่ที่กว้างขวางพอสมควร) ลมในประเทศไทยมีลักษณะเฉพาะที่ต้องทำการศึกษาเพื่อให้ออกแบบกังหันลมได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้การวิจัยและพัฒนากังหันลมขึ้นใช้เองในประเทศนับเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะช่วยทำให้ประเทศไทยมีการพัฒนาทางเทคโนโลยีและมีความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจมากขึ้น อย่างไรก็ตามความซับซ้อนของพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมมีค่อนข้างสูง การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้กับกังหันลมอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำจึงยังคงเป็นเรื่องที่ท้าทายนักวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์จนถึงปัจจุบัน

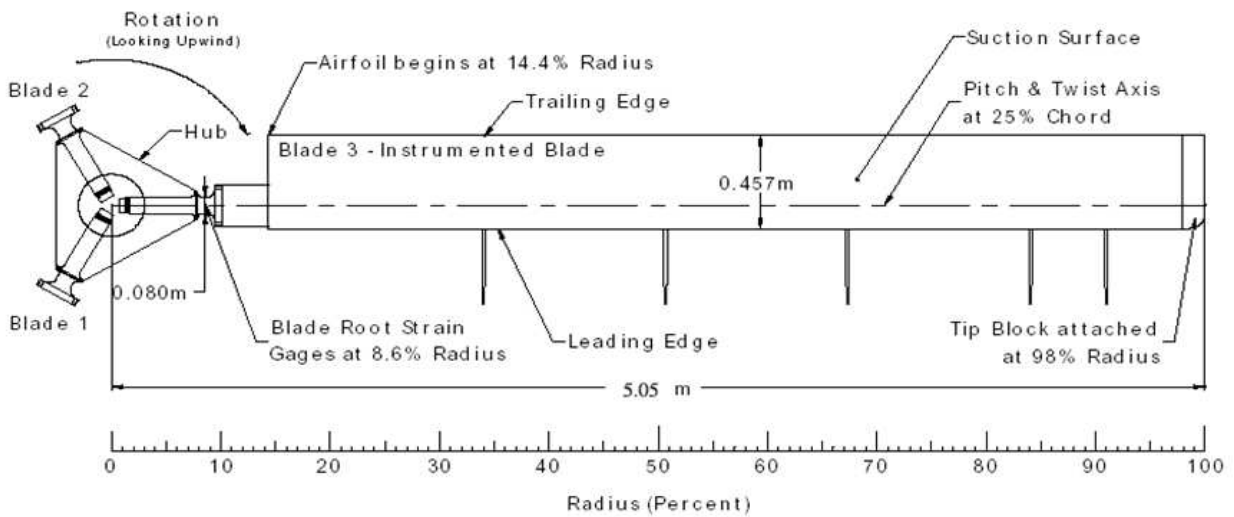
การคำนวณเชิงกลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งสำหรับนักวิจัยในปัจจุบัน เนื่องจากได้รับการพิสูจน์มาเป็นระยะเวลานานว่าสามารถใช้หาผลเฉลยการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการหาผลเฉลยด้วยการทดลองจริงได้มาก งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อใช้ CFD หาผลเฉลยให้กับกริดการไหลผ่านกังหันลมแกนนอนซึ่งเป็นการไหลที่มีความยุ่งยากพอสมควรเนื่องจากมีการหมุนตัวของกังหันไปพร้อมๆกับการไหลในเชิงแนวแกน รวมทั้งปรากฏการณ์การป้อ (stall) และ ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นบนใบกังหัน

ได้เกิดความร่วมมือระหว่างห้องปฏิบัติการของสหภาพยุโรปกับ National Renewable Energy Laboratory (NREL) ของ

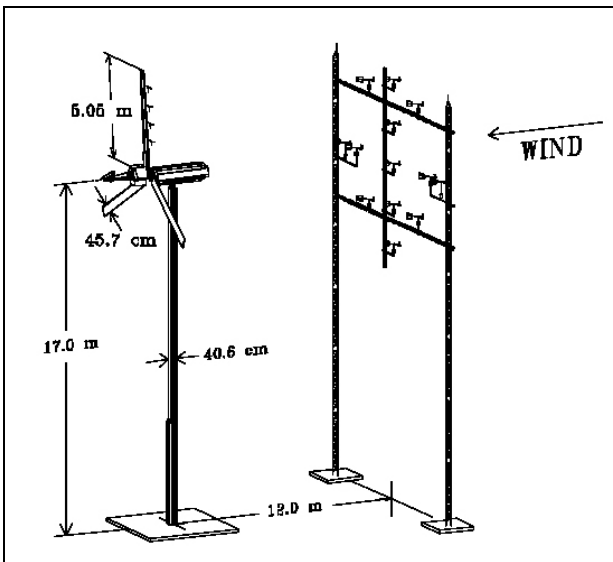
สหรัฐอเมริกาเพื่อทำการทดสอบกังหันลมหลายตัวด้วยกัน [1] (<http://www.ecn.nl/wind/other/IEA/index.en.html>) ข้อมูลจากการทดลองที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในครั้งนี้เป็นข้อมูลจากกังหันลมของ NREL Phase II [2] โดยกังหันลมนี้ใช้ใบกังหันรุ่น S809 โดยนำมาสร้างเป็นกังหันลมแบบ 3 ใบที่ไม่มีการบิดตัวใบกังหัน (untwisted blading) และมีมุมการเฉย (pitch) คงที่ตลอดใบที่ 12 องศา เป็นใบกังหันที่มีขนาดคงที่ โดยที่ปลายไม่เรียว

(non-tapered, constant chord) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกังหันลมคือ 10.1 เมตร รูปร่างของใบกังหันดังแสดงในรูปที่ 1

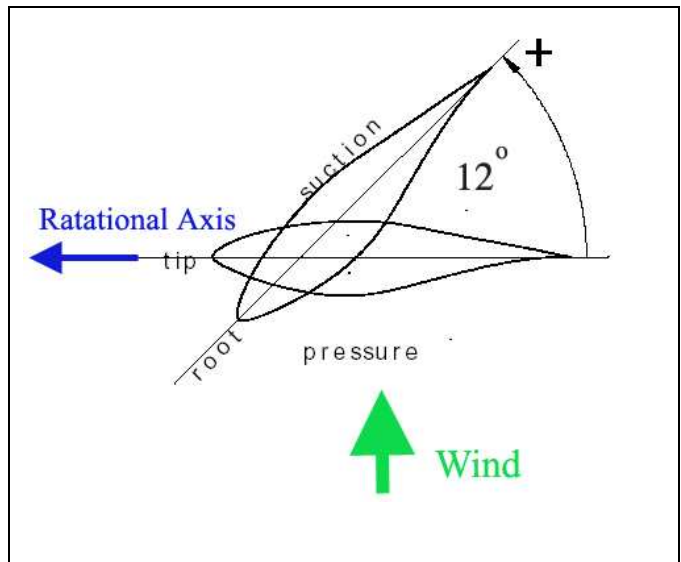
สำหรับรูปร่างและมิติของตัวกังหันลม โครงสร้าง และการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วลม แสดงอยู่ในรูปที่ 2 ส่วนรูปที่ 3 แสดงมุมมองของทิศทางการหมุนและการเฉยของใบกังหัน



รูปที่ 1 รูปร่างและมิติของใบกังหันลม NREL Phase II [2]



รูปที่ 2 รูปร่างและมิติของตัวกังหันลม โครงสร้าง และการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วลม [2]



รูปที่ 3 ภาคตัดขวางของใบกังหัน S809 และการเฉยของใบ

## 2. สมการที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

พฤติกรรมการไหลของของไหลสามารถอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ ประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล และโมเมนตัม ซึ่งสมการอนุรักษ์มวลในรูปของสมการอนุพันธ์เป็นดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

เพื่อให้ง่าย แม่นยำ และรวดเร็วต่อการหาผลเฉลยด้วย CFD จะทำการหมุนแกนอ้างอิงแล้วให้ตัวไปกั๊กหันอยู่กับที่ ซึ่งจะทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างลมปะทะกับไปกั๊กหันเช่นเดียวกับการหมุนของไปกั๊กหันในลมปกติที่ไม่มีมีการหมุน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพัทธ์กับความเร็วสัมบูรณ์เป็น  $U_r = U - (\omega \times r)$  ซึ่งทำให้เกิดความเร่งขึ้นอีกสองเทอมในสมการโมเมนตัม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมที่ทำการหมุนแกนอ้างอิง ในรูปของความเร็วมวล และโมเมนต์แรงจากความโน้มถ่วง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho U_r}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_r U_r) + 2\rho \omega \times U_r + \rho \omega \times (\omega \times r) = \nabla \cdot \sigma \quad (2)$$

เมื่อ  $2\rho \omega \times U_r$  คือแรงคอริโอลิส (Coriolis force) และ  $\rho \omega \times (\omega \times r)$  คือแรงเหวี่ยง (Centrifugal force)

ในอีกทางหนึ่งสมการโมเมนตัมสำหรับแกนอ้างอิงหมุนสามารถเขียนอยู่ในรูปของความเร็วมวลได้ดังนี้ [3]

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) + \rho(\omega \times U) = \nabla \cdot \sigma \quad (3)$$

$\sigma$  คือเทนเซอร์ของความเค้นในของไหลแบบนิวโตเนียน และเมื่อนำมารวมกับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธี Eddy Viscosity เทนเซอร์ของความเค้นจะเป็นดังนี้

$$\sigma = -\left(P + \frac{2}{3}\mu_{eff} \nabla \cdot U\right)I + \mu_{eff} [\nabla U + (\nabla U)^T] \quad (4)$$

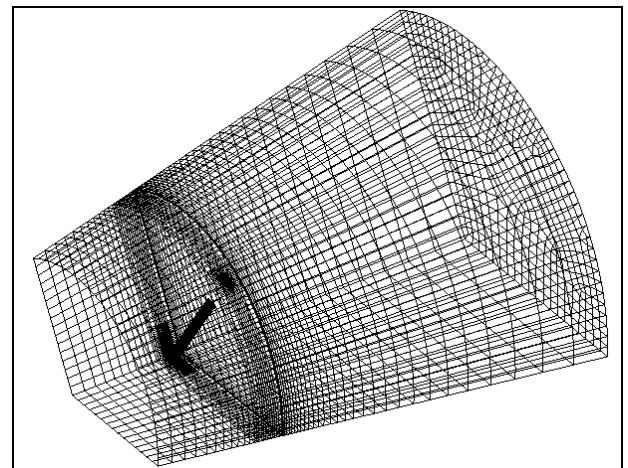
เมื่อ  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  โดย  $\mu$  เป็นความหนืดของของไหล ส่วน  $\mu_t$  เป็นความหนืดเสมือนที่ได้จากแบบจำลองการไหลของปั่นป่วนที่เรียกกันว่า Eddy Viscosity ซึ่งจะต้องคำนวณหาจากสมการความปั่นป่วน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะหา  $\mu_t$  จากแบบจำลองความปั่นป่วน k- $\epsilon$  [4] ซึ่งกำหนดให้  $\mu_t = \rho c_\mu (k / \epsilon)$  โดย  $c_\mu$  เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.09 สำหรับค่าของ  $k$  และ  $\epsilon$  จะต้องคำนวณจากสมการอนุรักษ์ ซึ่งจะไม่แสดง ณ ที่นี้ ผู้สนใจอาจศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [5]

ในการศึกษาครั้งนี้จะกำหนดให้เป็นการไหลแบบไม่อัดตัวและอยู่ในสภาวะคงตัว กล่าวคือจะไม่พิจารณาปัญหาการเริ่มหมุนตัวจากสภาพนิ่ง หรือการกระชอกของลม เมื่อพิจารณาสมการอนุรักษ์จะเห็นได้ว่ามีสมการอยู่ 6 สมการ สำหรับตัวแปรอิสระ 6 ตัวคือ  $u v w P k \epsilon$  ภายใต้สมมุติฐาน  $\rho$  เป็นค่าคงที่ การหาผลเฉลยเหล่านี้ในทุกๆ สมการพร้อมกัน จะต้องอาศัยหน่วยความจำและลำดับชั้นการทำงานที่ยุ่งยากพอสมควร ในที่นี้จะใช้กรรมวิธีหาผลเฉลยแบบ Pressure Correction Method ซึ่งได้พัฒนาขึ้นเป็นขั้นตอนตามลำดับชั้นที่เรียกว่า SIMPLE algorithm [6] การประมาณค่าในพจน์การพาของสมการอนุรักษ์จะใช้การประมาณค่าด้วยวิธี QUICK [7] สำหรับสมการโมเมนตัม และใช้วิธี First-Order Upwind [5] สำหรับการประมาณค่าของสมการความปั่นป่วน ซึ่งจากการลองผิดลองถูกในหลายกรณีพบว่าเมื่อใช้ร่วมกันแล้วจะทำให้เกิดการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็ว มีความแม่นยำ และมีความเสถียรสูง

การศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณโดย CFD กับผลที่ได้จากการทดลองจริงของ NREL การคำนวณได้ทำในสองกรณีคือ การไหลแบบคิดความหนืด และแบบไม่คิดความหนืด ซึ่งในกรณีการไหลแบบคิดความหนืดจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนด้วย ซึ่งเป็นผลให้เกิดปัญหาที่คำตอบขึ้นอยู่กับกริด (Grid dependency) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ชั้นขีดผิวซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับสถานะของความปั่นป่วน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการแบ่งกริดให้ละเอียดขึ้นในชั้นขีดผิวจนกว่าค่าผลลัพธ์ที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลง

สำหรับกรณีไม่คิดความหนืด จะทำให้  $\mu_{eff} = 0$  จึงไม่ต้องพิจารณาแบบจำลองความปั่นป่วน สมการโมเมนตัมจะลดรูปลงโดยฝั่งขวามือจะเหลือเพียงแรงจากความดัน การคำนวณจึงรวดเร็วและมีเสถียรภาพมากกว่า แต่ผลเฉลยที่ได้อาจผิดไปจากความจริงหากความหนืดมีผลต่อการไหลมาก

รูปที่ 4 แสดงถึงย่านของกริดที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งได้แบ่งย่านการไหลเป็นปริมาตร (cell) เล็กๆ จำนวน 88,154 ปริมาตร เนื่องจากไปกั๊กหันทั้งสามมีลักษณะสมมาตร ดังนั้นจึงทำการคำนวณเพียงกั๊กหันใบเดียวและกำหนดค่าขอบเขต (boundary conditions) ในแนวรัศมีของย่านสัมผัสร่วมเป็นแบบสมมาตรได้



รูปที่ 4 ย่านของกริดที่ใช้ในการคำนวณ

ได้เริ่มการคำนวณด้วยการกำหนดค่าความเร็วคงที่ตลอดทุกกริด แล้วกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเพื่อบังคับให้ค่าต่อลู่เข้าสู่ผลเฉลย โดยการลู่เข้าถือว่าเกิดขึ้นเมื่อค่าภาคเหลือ (residual) ของสมการอนุรักษ์เป็น 1E-5 การลดลงมากกว่านี้กระทำไม่ได้เนื่องจากเป็นการไหลที่มีการป้อ (stall) ซึ่งมีการเลื่อนตัวไปมาเป็นระยะ

**3. ผลที่ได้และการวิเคราะห์**

โดยที่แบบจำลองความปั่นป่วนเป็นแบบค่าเลขเรโนลด์สูง ที่ต้องการขนาดกริดในชั้นชิดผิวที่พอเหมาะ ดังนั้นจึงเริ่มการคำนวณด้วยการตรวจสอบความไม่ขึ้นกับกริด พบว่าการแบ่งกริดละเอียดบริเวณชั้นชิดผิวจนกระทั่ง  $y^+$  มีค่าไม่เกิน 250 จะทำให้ผลลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลง การเปรียบเทียบกริดบนผิวของใบกังหันแสดงอยู่ในรูปที่ 5 โดยรูป 5(a) แสดงกริดเมื่อก่อนมีการแบ่งละเอียด และ รูปที่ 5(b) แสดงกริดหลังจากการแบ่งละเอียดแล้ว รูปที่ 6 แสดงกริดโดยรอบผิวของหน้าตัดใบกังหันที่ความยาวใบ 80% วัดจากโคนใบ โดยรูป 6(a) แสดงผลก่อนการแบ่งกริดละเอียด และ 6(b) แสดงผลหลังจากการแบ่งกริดละเอียดแล้ว จากทั้งรูปที่ 5 และ 6 จะเห็นได้ว่าการแบ่งกริดละเอียดเฉพาะที่ (local grid refinement) จะทำการแบ่งละเอียดเฉพาะบริเวณที่กำหนดเงื่อนไขไว้เท่านั้น บริเวณที่ไม่อยู่ในเงื่อนไขก็จะมีกริดที่ยังคงหยาบอยู่ เทคนิคนี้จะช่วยลดหน่วยความจำและเวลาในการคำนวณได้ดีกว่าการแบ่งกริดให้ละเอียดโดยไม่มีเงื่อนไขมาก จำนวนปริมาตรกริดหลังจากทำการแบ่งละเอียดมีจำนวนทั้งสิ้น 237,051 ปริมาตร

หลังจากที่ได้กริดสุดท้ายจากการแบ่งกริดละเอียดเฉพาะที่แล้ว จึงทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ระหว่างกรณีที่เกิดความหนืดและไม่เกิดความหนืด โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพื่อการลู่เข้าเป็นดังในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการคำนวณแบบไม่เกิดความหนืดเร็วกว่าแบบเกิดความหนืดประมาณ 2.5

ตารางที่ 1: เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการลู่เข้า

รูปแบบการไหล	จำนวนการทำซ้ำ	เวลาในการลู่เข้า
ไม่เกิดความหนืด	356 ครั้ง	895 วินาที
เกิดความหนืด	579 ครั้ง	2,268 วินาที

รูปที่ 7 แสดงการกระจายของสัมประสิทธิ์ความดันบนผิวของใบกังหัน ที่หน้าตัดระยะ 30%, 47%, 63% และ 80% (ตามร้อยละความยาวใบกังหันที่วัดจากโคนใบถึงปลายใบ) โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณแบบเกิดความหนืดและไม่เกิดความหนืดกับผลของการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์ความดันคำนวณได้จากสมการ

$$C_p = \frac{(P - P_\infty)}{0.5 \rho_\infty [U_\infty^2 + (\omega r)^2]} \quad (5)$$

พบว่าที่หน้าตัด 80% (รูป d) ผลจากการคำนวณทั้งสองกรณีสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี แต่ถ้าสังเกตให้ละเอียดจะเห็น

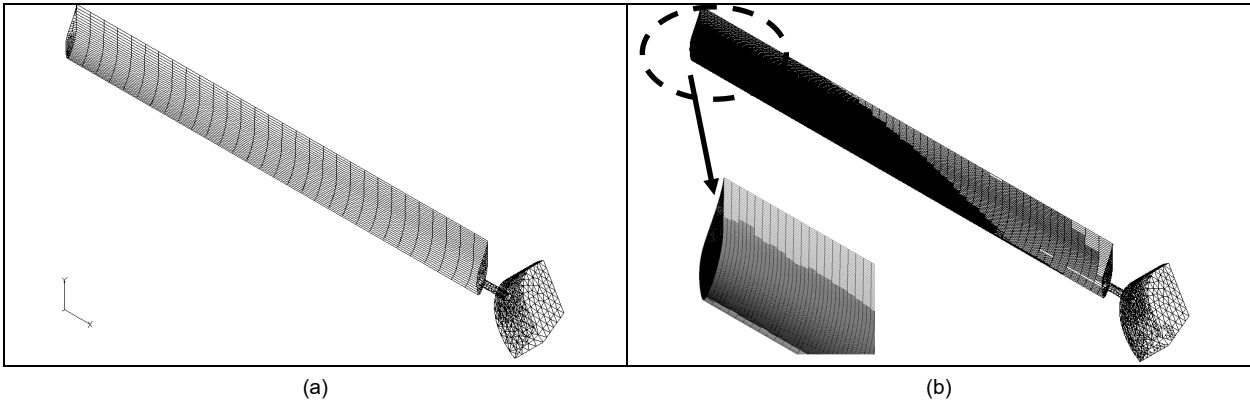
ได้ว่าแบบไม่เกิดความหนืดดีกว่าเล็กน้อยที่ขอบนำ (leading edge) และแบบเกิดความหนืดดีกว่าเล็กน้อยที่ขอบท้าย (trailing edge) ที่หน้าตัด 63% การคำนวณแบบเกิดความหนืดมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวัดเป็นอย่างดี แต่แบบไม่เกิดความหนืดผลลัพธ์ที่ด้านบนของใบกังหันมีค่าที่ผิดไปจากการทดลองมากพอสมควรโดยความดันมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ส่วนที่หน้าตัด 47% ผลการคำนวณจากทั้งสองกรณีสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดีที่ผิวด้านล่างของใบกังหัน แต่ผลที่ด้านบนของใบกังหันนั้นค่อนข้างผิดพลาดไปจากผลการทดลองในทั้งสองกรณีโดยที่แบบไม่เกิดความหนืดได้ความดันต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อย กรณีสุดท้ายที่หน้าตัด 30% ผลจากการคำนวณของทั้งสองกรณีมีค่าผิดไปจากการทดลองอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณด้านบนของกังหันได้ค่าความดันสูงกว่าการทดลองค่อนข้างมาก

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดจะเห็นได้ว่าที่หน้าตัดยิ่งใกล้กับโคนใบก็ยิ่งเกิดความแตกต่างระหว่างผลจากการคำนวณมากและการทดลองมากยิ่งขึ้น เนื่องจากที่บริเวณใกล้กับแกนหมุนนั้น มุมปะทะ (angle of attack) จะยิ่งมีค่าสูงมาก (เนื่องจากการออกแบบกังหันลมตัวนี้เป็นแบบไม่มีการบิดของใบ) การออกแบบมุมปะทะที่เหมาะสมจะอยู่ที่ตำแหน่ง 80% ดังนั้นที่บริเวณใกล้โคนใบมุมปะทะจะมีค่าสูงนอกเขตการออกแบบจนทำให้เกิดการ stall ที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลซับซ้อนยิ่งขึ้น มีความปั่นป่วนมากขึ้น และมีพฤติกรรมที่ไม่คงตัว ดังนั้นการคำนวณและการวัดในการทดลองให้ถูกต้องได้นั้นค่อนข้างทำได้ยาก ผลที่ได้จึงมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่ผิวด้านบนของใบกังหันซึ่งเกิดการแยกตัวของการไหล (flow separation) สำหรับที่บริเวณใกล้ปลายปีกกังหัน (ซึ่งเป็นย่านที่ใช้กำหนดการออกแบบ) มุมปะทะจะดีที่สุด ดังนั้นบริเวณนี้จึงไม่เกิดการ stall ดังนั้นพฤติกรรมการไหลจึงไม่ซับซ้อนมากนัก ผลที่ได้จากการคำนวณจึงไม่แตกต่างจากผลการทดลองมากนัก

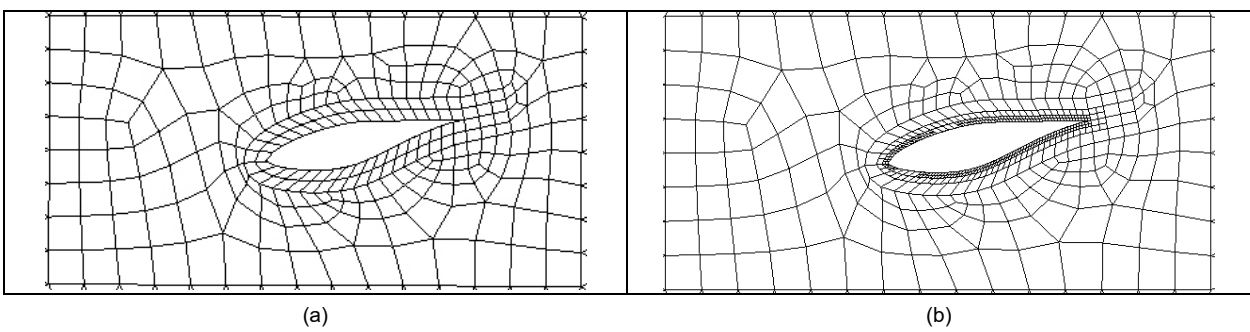
โดยภาพรวมทั่วไปแล้วสามารถวิเคราะห์ได้ว่าที่มุมปะทะปานกลางสมการ  $k - \epsilon$  ยังสามารถทำนายการแยกตัวจากผิวด้านบนได้ดีพอสมควร แต่เมื่อมุมปะทะสูงขึ้น (ทางด้านโคนใบ) สมการ  $k - \epsilon$  ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการแยกตัวได้ จึงเกิดการแตกต่างกับผลการทดลองพอกันกับแบบไม่เกิดความหนืด สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การใช้สมการ  $k - \epsilon$  ทำให้สามารถทำนายการป้อได้ดีกว่าแบบไม่เกิดความหนืดเล็กน้อยในย่านของมุมปะทะปานกลาง แต่โดยภาพรวมแล้วถือว่าเกิดความถูกต้องกว่าไม่มากนัก อาจไม่คุ้มค่ากับจำนวนเวลาคอมพิวเตอร์ที่ต้องใช้ในการคำนวณและเวลาการศึกษาของผู้ใช้โปรแกรม

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบกำลังที่ได้จากการคำนวณกับการทดลอง

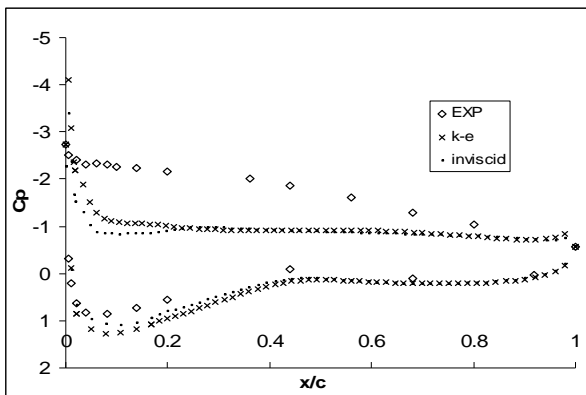
Experiment	Inviscid	k-epsilon
6.7 kW	7.24 kW	6.52 kW
% Error	+8.06 %	-2.69 %



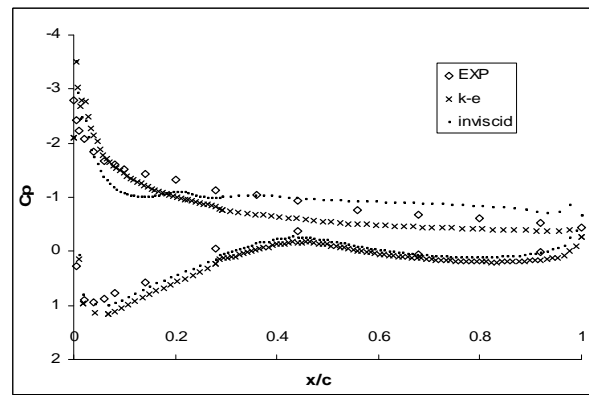
รูปที่ 5 กริดบนผิวของใบพัดและแกน (a) ก่อนการแบ่งกริดละเอียด (b) หลังจากการแบ่งกริดละเอียด



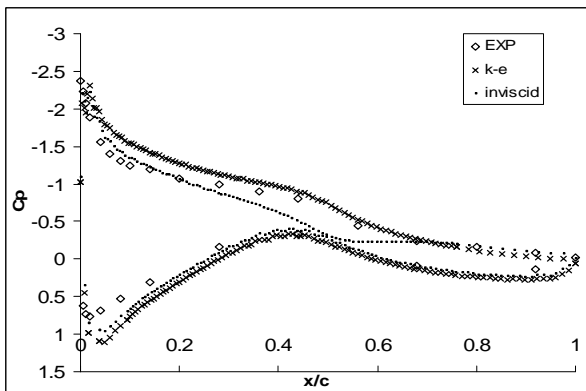
รูปที่ 6 กริดโดยรอบผิวของใบพัดที่หน้าตัด 80% (a) ก่อนการแบ่งกริดละเอียด (b) หลังจากการแบ่งกริดละเอียด



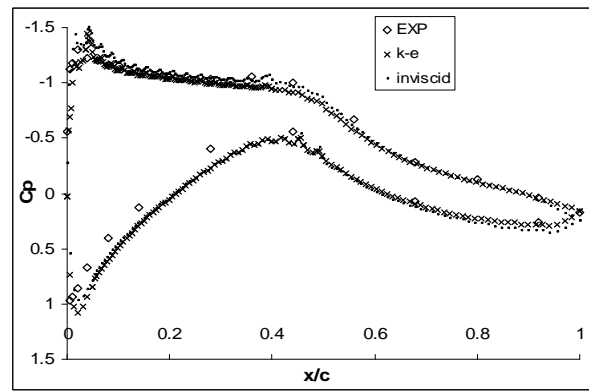
(a) 30% span



(b) 47% span

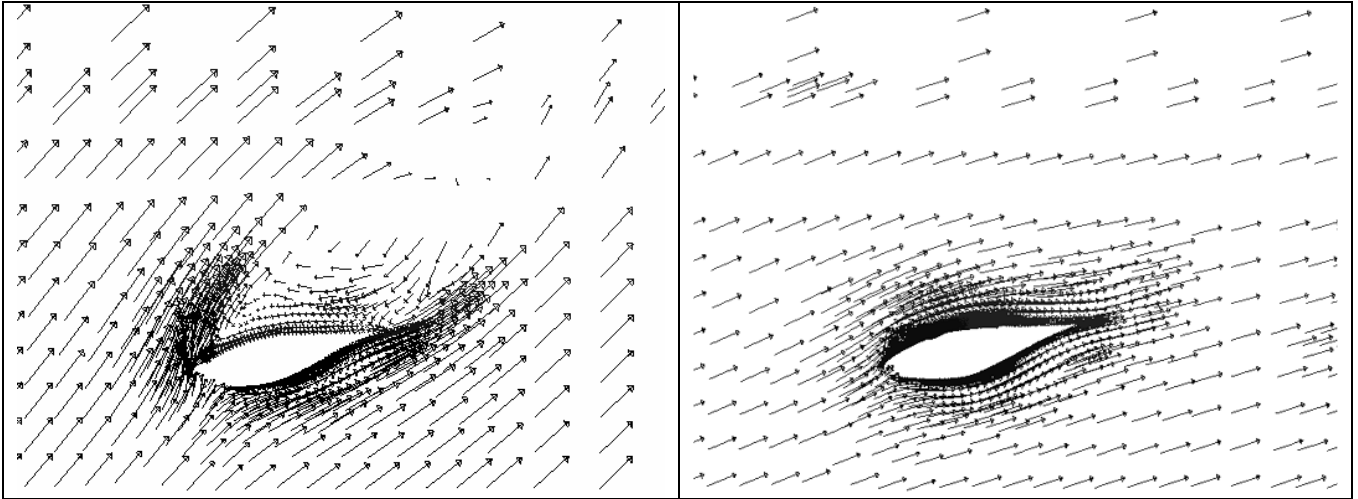


(c) 63% span



(d) 80% span

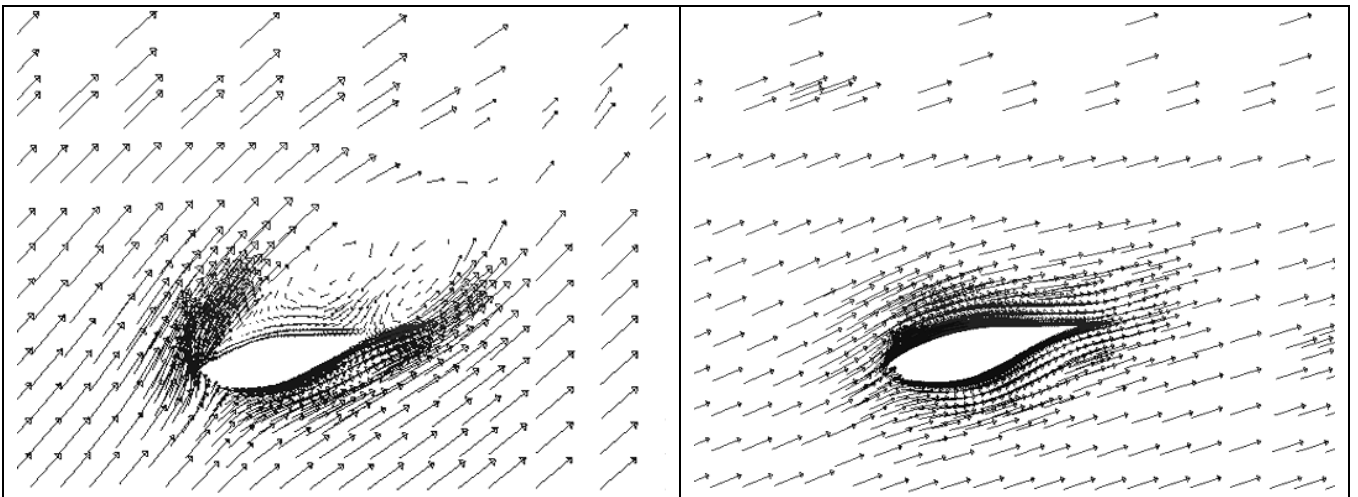
รูปที่ 7 การกระจายของสัมประสิทธิ์ความดันบนผิวใบกังหัน ที่หน้าตัด 30%, 47%, 63% และ 80% ตามความยาวของใบกังหัน



(a) 30% span

(b) 80% span

รูปที่ 8 เวกเตอร์ความเร็วในสองมิติ ที่หน้าตัด 30% และ 80% จากการคำนวณแบบไม่คิดความหนืด



(a) 30% span

(b) 80% span

รูปที่ 9 เวกเตอร์ความเร็วในสองมิติ ที่หน้าตัด 30% และ 80% จากการคำนวณแบบคิดความหนืด

รูปที่ 8 และ รูปที่ 9 แสดงเวกเตอร์ของการไหลรอบๆหน้าตัด 30% และ 80% ของการคำนวณแบบไม่คิดความหนืด และแบบที่คิดความหนืด ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นการแยกตัวของการไหลที่เกิดขึ้นใกล้กับขอบหน้าของใบ โดยเมื่อเกิดการแยกตัวแล้วจะเกิดการหมุนวนที่หลังใบ จำนวน 1 วง สำหรับกรณีที่ไม่คิดความหนืด (รูป 8(a)) และเกิดการหมุนวนที่หลังใบ จำนวน 2 วงสวนทางกันในกรณีที่คิดความหนืด (รูป 9(a)) แต่ที่หน้าตัด 80% ทั้งรูป 8(b) และ 9(b) แสดงการไม่เกิดการแยกตัวดังกล่าว และผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก สำหรับค่าของความดันสถิตยบนผิวของใบ กังหันแสดงอยู่ในรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงยกจะมีมากบริเวณปลายใบมากกว่าบริเวณโคนใบ ซึ่งเป็นไปตามหลักการออกแบบตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้จากกังหันลมโดยเป็นการวัดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าเป็น 78% ของกำลังเชิงกลตามรายงานของ NREL เห็นได้ว่ากำลังที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองเป็นอย่างดี โดยการจำลองแบบคิดความ

หนืดให้ผลผิดพลาดเพียง -2.69 % และการจำลองแบบไม่คิดความหนืดให้ผลผิดพลาดมากกว่าคือ +8.06%

**4. สรุป**

จากการจำลองการไหลของกังหันลม NREL Phase II ด้วยโปรแกรม CFD (Fluent) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่า  $y^+$  ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองแบบคิดความหนืดโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-ε คือ  $y^+ = 250$  หรือน้อยกว่านี้
2. ผลการคำนวณด้วย Fluent สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมกังหันลมได้เป็นอย่างดี โดยค่ากำลังงานที่ได้จากการจำลองแบบคิดความหนืดให้ผลที่ผิดพลาดเพียง 2.69%
3. Fluent สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนใบกังหันลมได้ดีมาก ถ้าไม่เกิดการ stall ซึ่งในกรณีนี้การจำลองแบบไม่คิดความหนืดก็ให้ความแม่นยำดีมากเช่นกัน

4. การ stalls ที่โคนใบเกิดจากมุมปะทะที่มากเกินไป ซึ่งการทำนายด้วย CFD ในการศึกษาี้ยังทำได้ไม่ดีนักเมื่อเทียบผลกับการทดลอง
5. การคำนวณแบบไม่คิดความหนืดได้ผลเฉลยรวดเร็วกว่าแบบคิดความหนืดมาก ในขณะที่ผลการคำนวณก็แม่นยำพอสมควร จึงอาจใช้ได้ในช่วงการคำนวณเริ่มแรกแบบหยาบๆ หรือ อาจใช้ได้ดีมากในกรณีที่มีการบิดใบกึ่งหัน ซึ่งจะเกิดการ stall น้อยมาก
6. ในการทำงานขั้นต่อไปจะใช้ทฤษฎีกึ่งหันลมผนวกกับ CFD เพื่อค้นหาแนวทางในการออกแบบใบกึ่งหันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะในการหา solidity ที่ดีที่สุดในสภาพลมต่างๆ

**5. กิตติกรรมประกาศ**

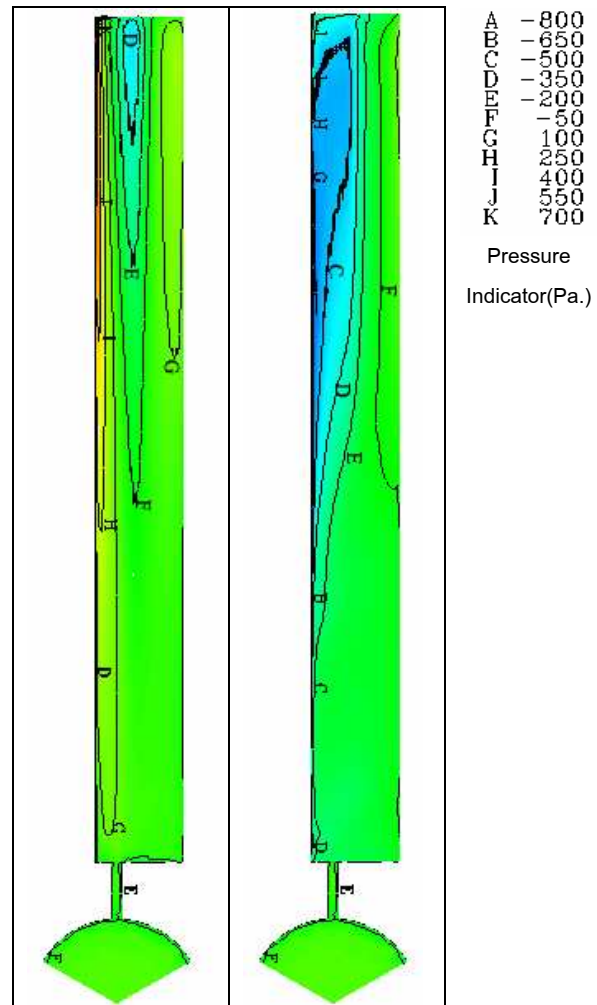
งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

**เอกสารอ้างอิง**

1. Scheper, J.G. et al., "Enhanced Field Rotor Aerodynamics Database" Final report of IEA AnnexXVIII: ECN-C--02-016, February, 2002
2. Simms, D. A. et al., "Unsteady Aerodynamics Experiment Phases II-IV Test Configurations and Available Data Campaigns", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, July 1999
3. Fluent 6.2 User Manual
4. Launder, B. E. and Spalding, D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
5. Versteeg, K. H. and Malalasekera, W., "An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method", Longman Scientific & Technical, 1995
6. Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980
7. Leonard, B. P. and Mokhtari, S., "ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow". NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12), NASA Lewis Research Center, 1990.
8. Earl, P.N. Duque, et al, "Numerical Predictions of Wind Turbine Power and Aerodynamic Loads for The NREL PHASE II Combine Experiment Roter", AIAA-2000-0038, AIAA/ASME Wind Energy Symposium AIAA 38th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 10-13, 2000
9. White, F. W., "Fluid Mechanics" McGraw-Hill :1994
10. Anderson, J. D., "Computational fluid dynamics the basic with applications", McGraw-Hill: 1995

**Nomenclature**

P	-pressure
U	-absolute velocity vector
$U_r$	-relative velocity vector
I	-unit tensor
u	-velocity in x-direction
v	-velocity in y-direction
w	-velocity in z-direction
t	-time
k	-turbulence kinetic energy
$\epsilon$	-turbulence dissipation rate
$\omega$	-rotational velocity
$\rho$	-density
$\sigma$	-stress tensor
$\mu$	-dynamic viscosity
$\mu_t$	-dynamic eddy viscosity
$\mu_{eff}$	-dynamic effective viscosity



(a) Pressure side (b) Suction side  
รูปที่ 10 ความดันสถิตย์บนใบกึ่งหันลม (a) ผิวล่างของใบ (b) ผิวบนของใบ