

ขนาดโดเมนที่เหมาะสมในการจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนนอน Appropriate Domain Size for Numerical Simulation of Horizontal-Axis Wind Turbines

ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช 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

บทความเสนอผลของขนาดโดเมนต่อการจำลองการไหลที่สภาวะคงตัวผ่านกังหันลมแกนนอน ด้วยการใช้ CFD การจำลองการไหลทำโดยหาผลเฉลยของสมการอนุรักษ์ มวล และโมเมนตัม และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon ด้วยวิธีปริมาตรจำกัดในสามมิติโดยใช้กริดแบบไร้โครงสร้าง และโดยการใช้วิธีการของความเร็วสัมพัทธ์ที่ให้กังหันอยู่กับที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนไป พบว่าการขยายโดเมนออกไปจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจาก National Renewable Laboratory (USA) และยังพบว่า ค่า tip speed ratio ที่สูงขึ้นส่งผลให้ต้องใช้โดเมนด้านหน้าที่ยาวขึ้น

Abstract

This paper presents the effect of domain sizes on CFD solution of horizontal axis wind turbine. Finite volume methodology was used to solve conservation equations for mass and momenta in three dimensions coupled with a k-epsilon turbulence model and unstructured grid. The rotating reference frame technique was used wherein the blades are fixed in relation to the rotating frame. The results show that as the domains were continuously extended the solutions approached more and more those of the experimental data conducted by The National Renewable Laboratory (USA). It was found also that the upstream portion of the domain should be extended more as the tip speed ratio of the rotor increases.

1. บทนำ

การวิจัยและพัฒนากังหันลมขึ้นใช้เองในประเทศเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะช่วยให้ประเทศมีการพัฒนาทางเทคโนโลยีจนสามารถพึ่งตนเองได้มากขึ้น แต่ความซับซ้อนของพฤติกรรมทางอากาศ

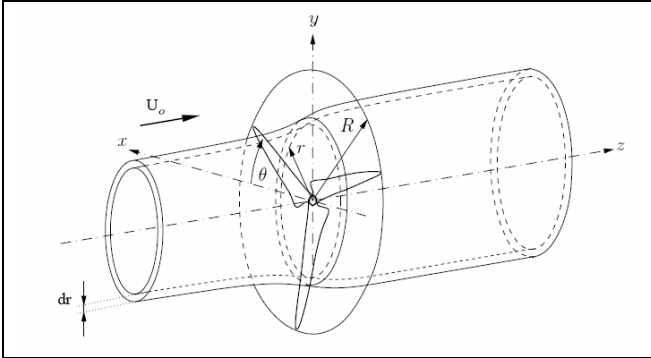
พลศาสตร์ของกังหันลมมีค่อนข้างสูง การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้กับกังหันลมอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำยังคงเป็นเรื่องที่ท้าทายนักวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์จนถึงปัจจุบัน

การคำนวณเชิงกลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งสำหรับนักวิจัยในปัจจุบัน เนื่องจากได้รับการพิสูจน์มาเป็นระยะเวลานานว่าสามารถใช้หาผลเฉลยการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำพอสมควร ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการหาผลเฉลยด้วยการทดลองจริงได้มาก การจำลองการไหลภายนอก (external flow) เช่นการไหลผ่านกังหันลม มีประเด็นเพิ่มเติมประการหนึ่งคือ ขนาดอันเหมาะสมของโดเมนที่ใช้ในการคำนวณควรเป็นเท่าใด เพราะกำหนดโดเมนใหญ่เกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลือง แต่หากขนาดเล็กไปก็อาจกระทบต่อความถูกต้องของผลลัพธ์

สำหรับการไหลผ่านกังหันลมแกนนอนดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อกังหันหมุน อาจสมมติได้ว่ามีพฤติกรรมเป็นแผ่นจานกลม (disk) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณจึงควรเป็นรูปทรงกระบอก แผ่นจานที่วางการไหลจะทำให้เส้นแนวการไหลบริเวณปลายปีกกังหันล้นออกจากแผ่นจาน ดังนั้นโดเมนทางด้านข้างต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะรองรับพฤติกรรมการล้นนี้ เช่นเดียวกับโดเมนด้านหน้าซึ่งจะต้องยาวพอที่จะรองรับสัญญาณจากการชะลอตัวของไหลที่กระทบกับกังหัน (upstream influence) เห็นได้ว่าขนาดของโดเมนมีผลต่อความถูกต้องของผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข

เพื่อทดสอบประเด็นของขนาดของโดเมน งานวิจัยจะทำการคำนวณการไหลผ่านกังหันลมด้วยโปรแกรม CFD [3] และจะเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลองซึ่งเป็นผลจากความร่วมมือระหว่างห้องปฏิบัติการของสหภาพยุโรปกับ National Renewable Energy Laboratory (NREL) ของสหรัฐอเมริกาเพื่อทำการทดสอบกังหันลมหลายตัว [1] (<http://www.ecn.nl/wind/other/IEA/index.en.html>) ข้อมูลจากการทดลองที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

ในครั้งนี้เป็นข้อมูลจากกังหันลมของ NREL Phase II [2] โดยกังหันลมนี้ใช้ใบกังหันรุ่น S809 โดยนำมาสร้างเป็นกังหันลมแบบ 3 ใบที่ไม่มีบิดตัวใบกังหัน (untwisted blading) และมีมุมการเฉย (pitch) คงที่ตลอดใบที่ 12 องศา เป็นใบกังหันที่มีขนาดคงที่ โดยที่ปลายไม่เรียว (non-tapered, constant chord) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกังหันลมคือ 10.1 เมตร



รูปที่ 1 ลักษณะของการไหลผ่านกังหันลม

2. สมการที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

พฤติกรรมของการไหลของของไหลสามารถอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ ประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล และโมเมนตัม ซึ่งสมการอนุรักษ์มวลในรูปของสมการอนุพันธ์เป็นดังนี้

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

เพื่อให้ง่าย แม่นยำ และรวดเร็วต่อการหาผลเฉลยด้วย CFD จะทำการหมุนแกนอ้างอิงแล้วให้ตัวใบกังหันอยู่กับที่ ซึ่งจะทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างลมปะทะกับใบกังหันเช่นเดียวกับการหมุนของใบกังหันในลมปกติที่ไม่มีลมหมุน 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 $2\rho \omega \times U$ คือแรงคอริโอลิส (Coriolis force) และ $\rho \omega \times (\omega \times r)$ คือแรงเหวี่ยง (Centrifugal force)

ในอีกทางหนึ่งสมการโมเมนตัมสำหรับแกนอ้างอิงหมุนสามารถเขียนอยู่ในรูปของความเร็วมวลได้ดังนี้ [3]

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

σ คือเทนเซอร์ของความเค้นในของไหลแบบนิวโตเนียน และเมื่อนำมารวมกับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธี Eddy Viscosity เทนเซอร์ของความเค้นจะเป็นดังนี้

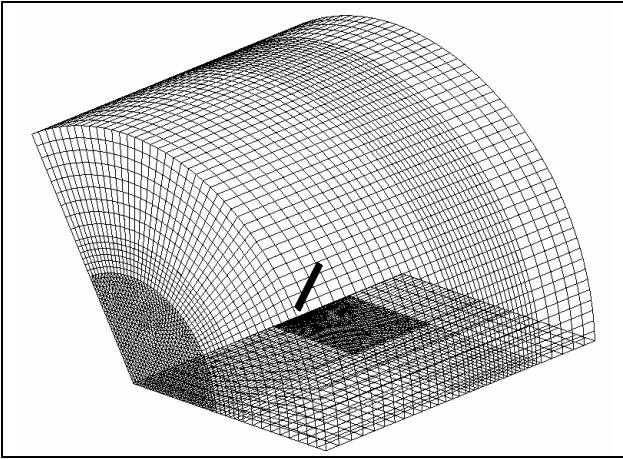
$$\sigma = -\left(P + \frac{2}{3} \mu_{eff} \nabla \cdot U\right) I + \mu_{eff} [\nabla U + (\nabla U)^T] \quad (4)$$

เมื่อ $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ โดย μ เป็นความหนืดของของไหล ส่วน μ_t เป็นความหนืดเสมือนที่ได้จากแบบจำลองการไหลของปั่นป่วนที่เรียกกันว่า eddy viscosity ซึ่งจะต้องคำนวณหาจากสมการความปั่นป่วน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะหา μ_t จากแบบจำลองความปั่นป่วน k-ε [4] ซึ่งกำหนดให้ $\mu_t = \rho c_\mu (k^2 / \epsilon)$ โดย c_μ เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.09 สำหรับค่าของ k และ ϵ จะต้องคำนวณจากสมการอนุพันธ์ ซึ่งจะไม่แสดง ณ ที่นี้ ผู้สนใจอาจศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [5]

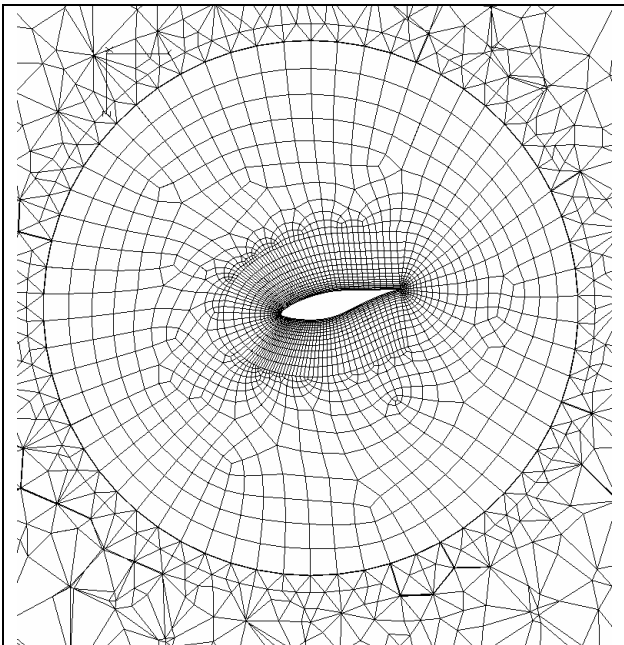
ในการศึกษาครั้งนี้จะกำหนดให้เป็นการไหลแบบไม่อัดตัวและอยู่ในสภาวะคงตัว กล่าวคือจะไม่พิจารณาปัญหาการเริ่มหมุนตัวจากสภาพนิ่ง หรือการกระชอกของลม เมื่อพิจารณาสมการอนุรักษ์จะเห็นได้ว่ามีสมการอยู่ 6 สมการ สำหรับตัวแปรอิสระ 6 ตัวคือ $u v w P k \epsilon$ ภายใต้สมมุติฐาน ρ เป็นค่าคงที่ การหาผลเฉลยเหล่านี้ในทุกๆ สมการพร้อมกัน จะต้องอาศัยหน่วยความจำและลำดับชั้นการทำงานที่ยุ่ยากพอสมควร ในที่นี้จะใช้กรรมวิธีหาผลเฉลยแบบ Pressure Correction Method ซึ่งได้พัฒนาขึ้นเป็นขั้นตอนตามลำดับขั้นที่เรียกว่า SIMPLE algorithm [6] การประมาณค่าในพจน์การพาของสมการอนุรักษ์จะใช้การประมาณค่าด้วยวิธี QUICK [7] ทั้งสมการโมเมนตัม และสมการความปั่นป่วน

สำหรับที่ชั้นชิดผิว เนื่องจากใช้กฎของผนัง (law of the wall) (ดู [3,5]) การควบคุมกริดจะต้องให้ได้ค่า y^+ สูงกว่า 30 แต่จะไม่ให้กริดหนาเกินไปโดย ควบคุมให้ ค่า y^+ สูงสุดอยู่ที่ไม่เกิน 150 การเลือกใช้กริดหนาจะช่วยลดปริมาณกริดซึ่งจะช่วยลดเวลาในการคำนวณลงไปได้มาก แต่คำตอบอาจจะไม่แม่นยำเท่ากับกริดละเอียด อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมา [8] พบว่าสำหรับกังหันลม NREL Phase II ค่า y^+ ที่ 200 มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

รูปที่ 2 แสดงถึงย่านของกริดที่ใช้ในการคำนวณรูปทรงกระบอกเนื่องจากใบกังหันทั้งสามมีลักษณะสมมาตร ดังนั้นจึงทำการคำนวณเพียงกังหันใบเดียวและกำหนดค่าขอบเขต (boundary conditions) ในแนวรัศมีของย่านสัมผัสร่วมเป็นแบบสมมาตรได้ รูปที่ 3 แสดงกริดแบบผสมรอบๆ หน้าตัดใบกังหันซึ่งใช้แพนอากาศแบบ S809 เงื่อนไขที่ขอบที่ทางเข้ากำหนดให้เป็นความเร็วคงที่แบบสม่ำเสมอ ที่ด้านข้างและด้านหลังกำหนดให้เป็นแบบความดันคงที่เท่ากับความดันบรรยากาศ การคำนวณจะสิ้นสุดเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดไม่มี การเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2 ย่านของกริดที่ใช้ในการคำนวณ

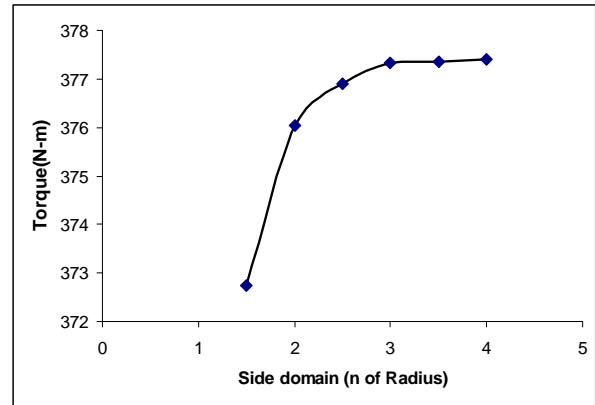


รูปที่ 3 กริดแบบผสมรอบๆ แพนอากาศ S809 ของกังหันลม

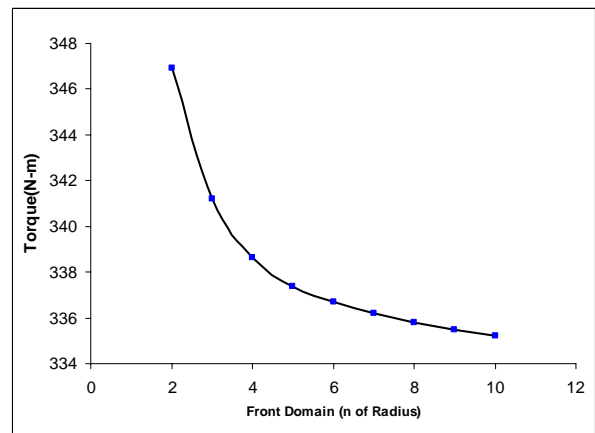
3. ผลที่ได้และการวิเคราะห์

เริ่มต้นด้วยการศึกษา ที่ความเร็วทางเข้า 10.5 m/s โดยพิจารณาผลของโดเมนด้านข้างโดยกำหนดให้โดเมนด้านหน้ามีขนาดยาวเป็น 1 เท่าของรัศมีใบ แล้วปรับขนาดของโดเมนด้านข้างออกไปทีละ 0.5 เท่าของรัศมีใบ ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อขนาดของโดเมนด้านข้างมากกว่า 3.5 เท่าของรัศมีใบจะทำให้แรงบิดเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับที่ 3 เท่าเพียง 0.1% ดังนั้นจึงให้ค่าโดเมนด้านข้างที่ 3.5 เท่าของรัศมีใบเป็นค่าที่เหมาะสม

พิจารณาต่อไปที่ผลของโดเมนด้านหน้า โดยเริ่มศึกษาจากที่ 2 เท่าของรัศมีใบ โดยปรับขนาดของโดเมนด้านหน้าออกไปทีละ 1 เท่าของรัศมีใบ ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 5 พบว่าขนาดของโดเมนด้านหน้ามีผลพอสมควรต่อแรงบิดที่ได้จากใบกังหัน โดยหากต้องการให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับโดเมนเก่าไม่เกิน 0.1 % จะต้องใช้โดเมนด้านหน้าที่มีขนาดยาวเป็น 9 เท่าของรัศมี ขึ้นไป



รูปที่ 4 ผลของขนาดโดเมนด้านข้างต่อแรงบิดของกังหันลม



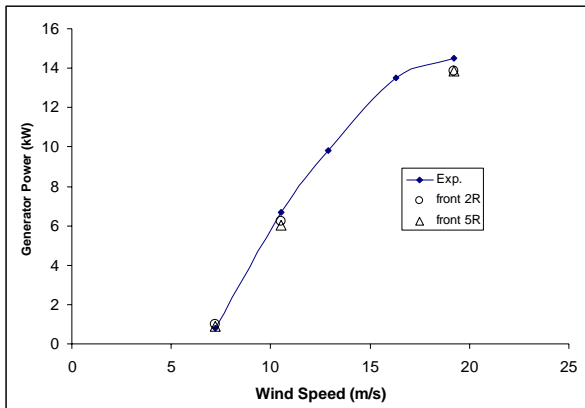
รูปที่ 5 ผลของขนาดโดเมนด้านหน้าต่อแรงบิดของกังหันลม

จากผลการคำนวณที่ได้จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดโดเมนด้านข้างทำให้ได้กำลังงานมากขึ้น ส่วนการเพิ่มขนาดด้านหน้าทำให้กำลังงานลดลง ซึ่งเป็นการยากที่จะให้เหตุผลเชิงฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง แต่โดยภาพรวมอาจถือได้ว่าเป็นผลจากการสะท้อนของค่าขอบเขต (boundary conditions) ซึ่งเป็นเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ที่อาจไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมทางฟิสิกส์อย่างสมบูรณ์ เข้าไปยังย่านของการคำนวณ ดังนั้นการที่ขอบโดเมนอยู่ห่างออกไปทำให้ลดผลกระทบนี้ จึงทำให้การคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น

จากนี้ได้ขยายผลการทดสอบการไหลไปที่ความเร็วลมต่างๆ คือ 7.2, 10.5 และ 19.2 m/s โดยให้โดเมนด้านหน้ายาวเป็น 2 และ 5 เท่าของรัศมีใบ และด้านข้างเป็น 3.5 เท่าของรัศมีใบ ผลการคำนวณแสดงอยู่ใน ตารางที่ 1 และในรูปที่ 6 โดยเป็นการเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (การแปลงค่ากำลังเชิงกลเป็นกำลังไฟฟ้านั้นใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอไว้ใน [9]) จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าความผิดพลาดเกิดขึ้นมากที่ความเร็วลม 7.2 m/s เมื่อใช้ขนาดของโดเมนด้านหน้าเป็น 2 เท่าของรัศมี แต่ผลลัพธ์จะดีขึ้นมากเมื่อขยายโดเมนออกไปที่ 5 เท่าของรัศมี สำหรับที่ความเร็ว 10.5 และ 19.2 m/s การขยายโดเมนออกไปไม่มีผลต่อความแม่นยำเท่าใดนัก

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับการทดลองภาคสนาม

V (m/s)	Tip speed ratio	Exp.	Front domain= 2R		Front domain= 5R	
		Power(kW)	Power(kW)	%error	Power(kW)	%error
7.2	5.29	0.8	1.01	26.25	0.89	11.25
10.5	3.63	6.7	6.24	-6.86	6.05	-9.70
19.2	1.98	14.5	13.88	-4.27	13.84	-4.55



รูปที่ 6 กำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกับการทดลอง

จากการที่กังหันลมตัวนี้มีความเร็วรอบคงที่ที่ 72 RPM นั้น หมายถึงยิ่งความเร็วลมสูงขึ้น tip speed ratio (tsr) จะลดลง ที่ความเร็วลม 7.2 m/s ได้ค่า tsr = 5.29 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในสามกรณีนี้ การที่มี tsr สูงหมายถึงกังหันมีความตัน (solidity) มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ลมผ่านไปได้อย่างขึ้น จึงทำให้เส้นการไหลเกิดการล้นออกด้านข้างมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเส้นแนวการไหล (stream line) ย่อมเกิดการโค้งมากกว่ากรณีอื่น ดังนั้นจึงต้องการโดเมนที่ใหญ่ขึ้นเพื่อลดทอนผลของการโค้งนี้ ส่วนที่ความเร็ว 19.2 m/s มี ค่า tsr เพียง 1.98 ความตันของกังหันจึงน้อยลง การไหลล้นออกจากใบและความโค้งเส้นแนวการไหลจึงน้อยลง ผลของขนาดโดเมนด้านหน้าจึงมีผลน้อยลงต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังที่ได้ ทั้งหมดนี้หมายถึงขนาดของโดเมนด้านหน้าจะสัมพันธ์กับ tsr ด้วยซึ่งจะได้ทำการศึกษาค้นหาความสัมพันธ์นี้โดยละเอียดต่อไป

4. สรุป

1. โดเมนการคำนวณต้องมีขนาดใหญ่ที่เพียงพอจึงจะให้คำตอบที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
2. ขนาดของโดเมนที่เหมาะสมสำหรับความเร็วลม 10.5 m/s หรือที่ tip speed ratio 3.63 คือ ด้านข้างมากกว่า 3.5 เท่าของรัศมีใบ และด้านหน้ามากกว่า 9 เท่าของรัศมีใบ
3. ค่า tip speed ratio มีผลต่อขนาดโดเมนด้านหน้า โดยเมื่อ tip speed ratio สูงจะต้องใช้โดเมนที่ยาวขึ้น
4. การกำหนดขนาดของโดเมนขึ้นอยู่กับความต้องการความแม่นยำ ขนาดของโดเมนที่ใหญ่ขึ้นย่อมหมายถึงเวลาการคำนวณ และหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ ที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สนับสนุนโดยโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ PHD/0092/2548

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. ธรรมแท้, ช. และ จิตรสมบูรณ์, ท., "การจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนนอนในสภาวะคงตัวด้วย CFD", การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ก.ค. 2548, จังหวัดนครราชสีมา
9. 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

Nomenclature

- P -pressure
 U -absolute velocity vector
 U_r -relative velocity vector

I	-unit tensor	Ω	-rotational velocity
u	-velocity in x-direction	ρ	-density
v	-velocity in y-direction	σ	-stress tensor
w	-velocity in z-direction	μ	-dynamic viscosity
t	-time	μ_t	-dynamic eddy viscosity
k	-turbulence kinetic energy	μ_{eff}	-dynamic effective viscosity
ε	-turbulence dissipation rate		