

การไหลแยกจากผิวแบบไม่คงตัวผ่านใบกังหันลมแกนตั้ง: การศึกษาเชิงตัวเลข Separated, Unsteady Flow through Vertical Axis Wind Turbine Blade: A Numerical Study

จารุวรรณ ตังตันสกุลวงศ์* และ ทวิช จิตรสมบุญ#

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร (044) 224410 โทรสาร (044) 224411, E-Mail: Jacksut@hotmail.com, # tabon@sut.ac.th

Jaruwan Tangtonsakulwong* and Tawit Chitsomboon#

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

111 University Ave., Muang District, Nakorn Ratchasima, Thailand 30000

Tel: 044-224410, Fax: 044-224411, Email: jacksut@hotmail.com*, # tabon@sut.ac.th

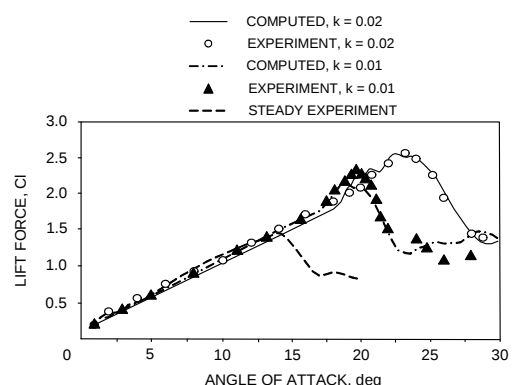
บทคัดย่อ: การไหลผ่านใบกังหันลมแกนตั้งเป็นการไหลที่มีความซับซ้อนมากเพราะมุมปะทะเปลี่ยนกับเวลา ส่งผลให้เกิดการป้อว้าง (dynamic stall) ซึ่งส่งผลสำคัญต่อกำลังงานที่จะได้จากใบกังหันงานวิจัยนี้จำลองการไหลผ่านใบกังหันลมแกนตั้งแบบใบตรงด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (CFD) เพื่อทดสอบความแม่นยำของกระบวนการเชิงตัวเลขในการทำนายพฤติกรรมแบบไม่คงตัวอันซับซ้อนนี้ รวมทั้งเพื่อศึกษาลักษณะของแรงลมที่เกิดขึ้นบนใบกังหัน การจำลองกระทำโดยใช้กรรมวิธีปริมาตรจำกัดใน 2 มิติ ด้วยเทคนิคกริดเลื่อน (Sliding mesh technique) ผลการคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงตั้งฉากกับรัศมีที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองพอสมควร ที่สำคัญคือการจำลองนี้สามารถทำนายพฤติกรรมเกิดการป้อว้างได้ดีเกินคาด สรุปได้ว่าการจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้งโดยใช้เทคนิคกริดเลื่อนประสบผลสำเร็จในเบื้องต้น มีความแม่นยำพอที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบกังหันต่อไปในอนาคต

Abstract: The flow through a vertical axis wind turbine blade is very complex due to the time-dependent angle of attacks which result into the 'dynamic stall' phenomenon. This research aimed to simulate the unsteady fluid flow through a vertical axis wind turbine in order to validate the software and especially the involved numerical procedures to attain reliable solutions. Finite volume methodology together with the sliding mesh technique were used to solve mass and momentum conservation equations. The results obtained indicated that the tangential and normal

force coefficients of the turbine rotor showed good agreements with a reported experiment data. The dynamic stall phenomenon was predicted very well, beyond expectation. The study was considered successful which can be used as a tool for designing vertical axis wind turbines in the future.

1. บทนำ

การไหลแบบไม่คงตัวผ่านกังหันลมแกนตั้งเป็นการไหลที่ซับซ้อนเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะพฤติกรรมเกิดการป้อว้าง (dynamic stall) เมื่อมุมปะทะเปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีผลทำให้การป้อถูกยึดออกไปจากจุดป้อนิ่ง (static stall) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 พฤติกรรมการป้อว้างของแพนอากาศ NACA 0015
จากการทดลองและทำนายค่าของ Ekaterinaris [1]

ลักษณะเช่นนี้ทำให้ได้แรงยกที่มีค่าสูงขึ้นกว่าปกติ (ซึ่งนับเป็นสิ่งที่เป็ คุณ) รูปที่ 1 แสดงพฤติกรรมการบินที่เกี่ยวกับการบ่อนิ่งของแพนอากาศ (airfoil) NACA0015 เมื่อกังหันมีการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะไร มีด้อยต่อเนื่องด้วยอัตรา 0.02 โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะไร มีด้อยมีนิยามดังนี้ [2]

$$k = \left[\frac{1}{2} c \dot{\alpha} \right] / U_\infty \quad (1)$$

เมื่อ k คืออัตราการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะไรมีด้อย และ $\dot{\alpha}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะเทียบต่อเวลา จะเห็นว่ามุมปะทะที่เกิดการบ่อนิ่งมีค่ามากกว่าการเกิดการบ่อนิ่ง (static stall) ถึงประมาณ $7^\circ - 13^\circ$ และแรงยกมีค่าสูงขึ้นจากเดิมเกือบ 2 เท่า ดังนั้นการศึกษาเชิงตัวเลขที่สามารถทำนายพฤติกรรมการบินได้จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ท้าทาย เพื่อสนับสนุนการวิจัย พัฒนา และออกแบบกังหันลมแกนตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ในลมให้เป็นพลังงานกล ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามทิศทางแกนหมุนของกังหันได้เป็น “กังหันลมแกนตั้ง” และ “กังหันลมแกนนอน” กังหันลมแกนตั้ง (VAWT) มีข้อดีที่เด่นชัดเหนือกังหันลมแกนนอน (HAWT) 3 ประการ คือ 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหรือชุดเฟืองทดสามารถติดตั้งที่พื้นดินได้ 2) ไม่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยในการหันเข้าหาทิศทางลม และ 3) ใบกังหันไม่จำเป็นต้องมีการบิดตามแนวรัศมีซึ่งทำให้ง่ายต่อการออกแบบและผลิต แต่ยังมีข้อเสียบางประการ เช่น แรงบิดมีค่าไม่คงที่เมื่อมุมหันเปลี่ยนไป, ความไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ด้วยตัวเอง และประสิทธิภาพที่ต่ำกว่ากังหันลมแกนนอน ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าถ้าได้รับการศึกษาวิจัยที่เข้มข้นกันจะปรับปรุงแก้ไขข้อเสียเหล่านี้ได้ ซึ่งเป็นจุดประสงค์ส่วนหนึ่งของการศึกษานี้

การวัดค่าต่าง ๆ ของกังหันด้วยการทดลองมีความยุ่งยาก และมีต้นทุนสูง การทำนายพฤติกรรมการบินและหาค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของกังหันด้วยแบบจำลองต่าง ๆ เป็นทางเลือกที่สามารถลดต้นทุนและเวลารวมถึงการทดลองอันยุ่งยากได้ นักวิจัยจำนวนมากจึงพยายามพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการบินของกังหันลมแกนตั้งอย่างต่อเนื่อง ในปี 1970 สถาบันวิจัยหลายแห่งเช่น National Research Council of Canada, NASA Langley Research Center (USA) และ Sandia National Laboratories (USA) ได้ให้ความสนใจในข้อดีของกังหันแกนตั้งและเริ่มต้นวิจัยและพัฒนาอย่างจริงจังอีกครั้ง ทำให้แบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมแกนตั้งมากมาย โดยสามารถจำแนกประเภทได้เป็น 3 กลุ่มกว้าง ๆ ได้แก่ 1.) แบบจำลองทฤษฎีโมเมนตัม หรือเรียกว่าแบบจำลองท่อการไหล (stream tube model) ได้แก่แบบจำลองของ Templin [3] แบบจำลองของ Strickland [4] และ แบบจำลอง Paraschivoiu [5] แบบจำลองในกลุ่มทฤษฎีโมเมนตัมนี้เป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำ สามารถทำนายประสิทธิภาพโดยรวมของกังหันได้เป็นอย่างดี แต่ไม่สามารถวิเคราะห์การกระรุมที่กระทำต่อกังหันได้ 2.) แบบจำลอง vortex ได้แก่แบบจำลองของ Gohard [6] แบบจำลองของ Wilson [7] และแบบจำลอง Strickland [8] แบบจำลองกลุ่มนี้มีความซับซ้อนรวมถึงใช้

เวลาและทรัพยากรในการคำนวณมากกว่าแบบจำลองโมเมนตัม แต่สามารถให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่ารวมถึงทำนายแรงกระทำบนใบกังหันได้ การวิเคราะห์ดังกล่าวนำไปสู่ความเข้าใจในบทบาทของอากาศพลศาสตร์แบบไม่คงตัว (Unsteady aerodynamics) มากขึ้นแต่ก็ยังไม่ครอบคลุมทุกช่วงการทำงานของกังหัน 3.) แบบจำลองแบบผสมเช่นแบบจำลองของ Ponta, F.L. and Jacovkis [9] ที่ผสมผสานแบบจำลอง vortex ของ Wilson เข้ากับระเบียบวิธีสมาชิกจำกัด (Finite-element analysis) ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นแต่ยังคงสิ้นเปลืองทรัพยากรในการทำนายและไม่ครอบคลุมทุกช่วงการทำงานของกังหันเช่นเดิม

อย่างไรก็ตามคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนามีศักยภาพสูงในการคำนวณในราคาที่ไม่แพงนัก ประกอบกับการคำนวณการไหลแบบพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamic หรือ CFD) ได้รับการพัฒนามีความสามารถในการทำนายการไหลถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ การใช้ CFD เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของการไหลผ่านกังหันลมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปสู่การออกแบบที่ง่ายและประหยัดขึ้น อย่างไรก็ตามโปรแกรม CFD แต่ละโปรแกรมมีศักยภาพในการทำนายการไหลที่แตกต่างกัน รวมทั้งกระบวนการเชิงตัวเลขที่เกี่ยวข้องที่นักวิจัยแต่ละท่านใช้ในการคำนวณนั้นยังแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของผลทำนายได้มาก งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรม CFD และกำหนดกระบวนการเชิงตัวเลขที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและพัฒนากังหันลมแกนตั้งให้มีประสิทธิภาพที่ดีต่อไป

2. การจำลองเชิงตัวเลข

การจำลองการไหลใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหล Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดโปรแกรมหนึ่ง โดยใช้กรรมวิธีปริมาตรจำกัดและเทคนิคการเลื่อนกริด (sliding mesh technique) ในการหาผลเฉลยของสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม สมมุติฐานในการจำลองคือ การไหลเป็นแบบไม่อัดตัว (incompressible flow), ไม่พิจารณาผลกระทบบางจากแกนกังหัน และการคำนวณจะกระทำซ้ำจนกว่าผลลัพธ์จะมีลักษณะซ้ำรอบ (time periodic) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณในการจำลองด้วยเทคนิคการเลื่อนกริดนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือโดเมนส่วนหยุดหนึ่งและโดเมนส่วนหมุน ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสและความเร็วสัมบูรณ์สามารถเขียนได้เป็น

$$\vec{v}_r = \vec{v} - (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad (2)$$

เมื่อ $\vec{v}_r$ คือความเร็วสัมผัส $\vec{v}$ คือความเร็วสัมบูรณ์ $\vec{\Omega}$ คือความเร็วเชิงมุมการหมุนของกังหันและ $\vec{r}$ คือรัศมีของกังหัน การหมุนของโดเมนดังกล่าวทำให้เกิดแรงขึ้นอีกสองพจน์ในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม [10] ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเร็วสัมผัสได้ดังนี้

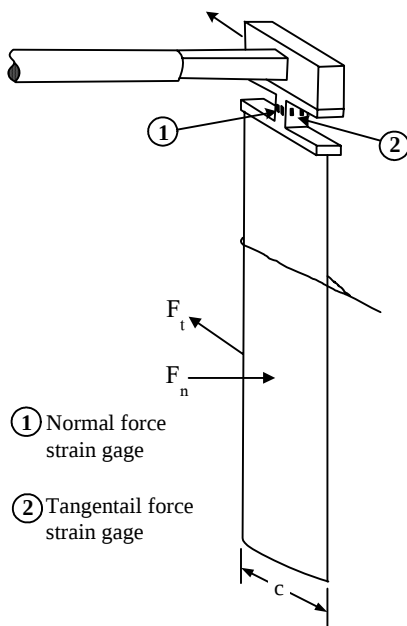
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}_r) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}_r) + \rho(2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r + \vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\vec{\tau} \right) + \rho \vec{g} \end{aligned} \quad (3)$$

พจน์ $\rho(2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r)$ คือแรง Coriolis และ $\rho\vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}$ คือแรงหนีศูนย์กลาง โดย p คือ ความดันสถิต $\vec{\tau}$ คือเทนเซอร์ของความเค้น $\rho \vec{g}$ เป็นแรงโน้มถ่วง ในที่นี้เทนเซอร์ของความเค้นหาจากกฎแรงเฉือนของนิวตัน ผนวกกับ Stokes' hypothesis ดังนี้

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} I \right] \quad (4)$$

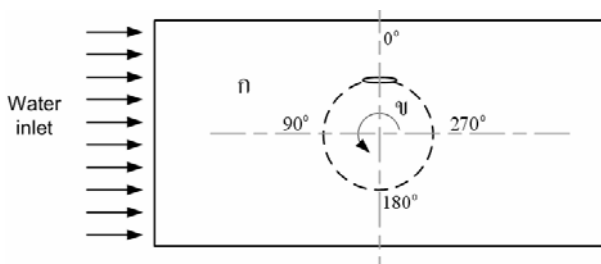
โดย μ คือความหนืดของของไหล และ I คือยูนิทเทนเซอร์

ลักษณะของกังหันที่ถูกจำลองเป็นกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบแรงยก (lift type) ตามการทดลองของ Oler และคณะ [11] ซึ่งประกอบด้วยใบกังหันใบเดียว มีเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหัน 0.61 เมตร หน้าตัดใบกังหันที่ใช้คือ NACA0015 ความยาวคอรัด 0.1524 เมตร กังหันดังกล่าวถูกทดลองในอ่างน้ำขนาดกว้าง ยาว ลึก เป็น 5, 10, 1.25 เมตร ตามลำดับ ความเร็วในการหมุนของกังหันถูกกำหนดให้คงที่ที่ 0.74918 เรเดียน / วินาที โดยความเร็วของน้ำที่ทางเข้าอ่างจะถูกแปรค่าเพื่อให้ได้อัตราส่วนความเร็วปลายปีก (ความเร็วเชิงเส้นของใบกังหันต่อความเร็วน้ำที่ทางเข้าอ่าง) ตามที่กำหนด คือ 2.5, 5.1 และ 7.6 ลักษณะของกังหันที่ใช้ในการจำลองเป็นดังรูปที่ 2

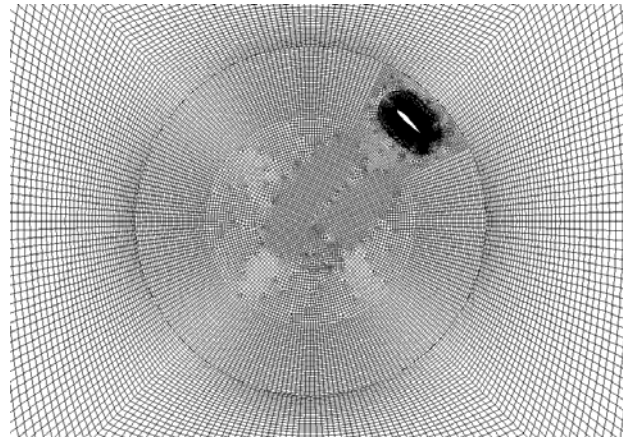


รูปที่ 2 ลักษณะกังหันที่ใช้ในการทดลองแบบใบเดียว

สำหรับการคำนวณโดยใช้เทคนิคการเลื่อนกริดนี้ ในระหว่างการคำนวณ กริดในส่วนหมุน (ส่วน ข ในรูปที่ 3) จะเคลื่อนผ่านกริดในส่วนนิ่ง (ส่วน ก) โปรแกรมจะคำนวณฟลักซ์ระหว่างกริดที่สัมผัสกันของทั้งสองส่วนของโดเมนด้วยการเฉลี่ยค่า (interpolation)

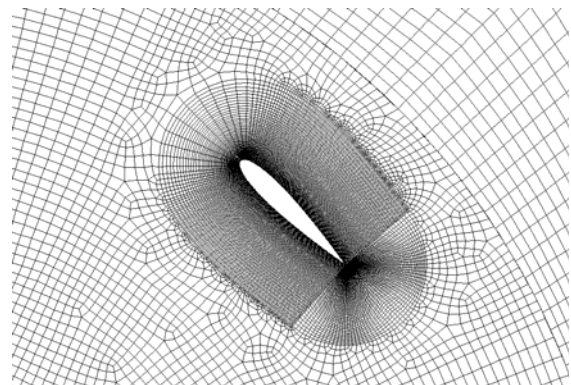


รูปที่ 3 โดเมนที่ใช้ในการคำนวณ ก. ส่วนหยุดนิ่ง และ ข. ส่วนหมุน



รูปที่ 4 ลักษณะกริดบริเวณรอบ ๆ กังหัน

ส่วนกริดที่ใช้เป็นกริดแบบผสมดังแสดงในรูปที่ 4 กริดบริเวณรอบ ๆ กังหันเป็นกริดแบบ O-mesh มีขนาดเล็กเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ โดยแบ่งออกเป็น 256 เซลล์รอบหน้าตัด ความหนาของ กริดแรกจากพื้นผิวหน้าตัดเป็น 0.14 มิลลิเมตร หลังจากนั้นให้เติบโตขึ้นด้วยอัตราการโต เป็น 1.05 จำนวนทั้งสิ้น 70 เซลล์จากผิวใบกังหัน การกำหนดกริดเช่นนี้ก็เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมของชั้นขี้นผิวบนใบกังหัน และให้เกิดความประหยัดพร้อมกันไปลักษณะกริดบริเวณรอบ ๆ หน้าตัดใบกังหันเป็นดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะกริดบริเวณรอบหน้าตัดใบกังหัน

แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบจำลอง 1 สมการที่เสนอโดย Spalart และ Allmaras [12] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับทำนายอากาศพลศาสตร์โดยเฉพาะ นอกจากนี้ได้กำหนดความเข้มของการปั่นป่วน (Turbulent Intensity) เป็น 0.01 และสเกลความยาว (Length scale) 0.1 เท่าของรัศมีกังหัน ทั้งบริเวณทางเข้าและทางออกของอุโมงค์น้ำ

สำหรับการทดลองของ Oler และคณะ [11] นั้นได้หาค่าแรงในทิศสัมผัสและตั้งฉากกับแนวเส้นรอบวงของการหมุนกังหัน 2 วิธีการด้วยกัน วิธีแรกคือติดเซนเซอร์วัดความดัน 10 จุดรอบผิวใบกังหัน หลังจากนั้นหาแรงกระทำบนใบกังหันโดยการหาปริพันธ์ของความดันโดยรอบ

อย่างไรก็ตามการหาแรงกระทำต่อใบกังหันด้วยวิธีนี้ให้ค่าความถูกต้องค่อนข้างต่ำเนื่องจากจำนวนเซนเซอร์วัดความดันมีจำนวนน้อย วิธีต่อมาคือติด strain gauge วัดค่าความเค้นที่ก้านยึดใบกังหันด้านบนและมีการปรับแก้ผลกระทบจากปลายใบ (Tip effect) ตามวิธีของ Graham [13] เพื่อให้ผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะการไหลแบบสองมิติ ซึ่งผลที่ได้น่าจะมีความถูกต้องกว่าแบบแรก ดังนั้นการจำลองของการศึกษานี้ (ซึ่งเป็นการจำลองแบบ 2 มิติ) จะเทียบผลลัพธ์กับค่าที่ได้จากการใช้ strain gauge โดยเลือกค่าจากการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วปลายปีกเท่ากับ 2.5 เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการสั่นและการบิดของใบกังหันในกรณีที่มีอัตราส่วนความเร็วปลายปีกสูงกว่านี้

3. ผลลัพธ์และการวิจารณ์ผล

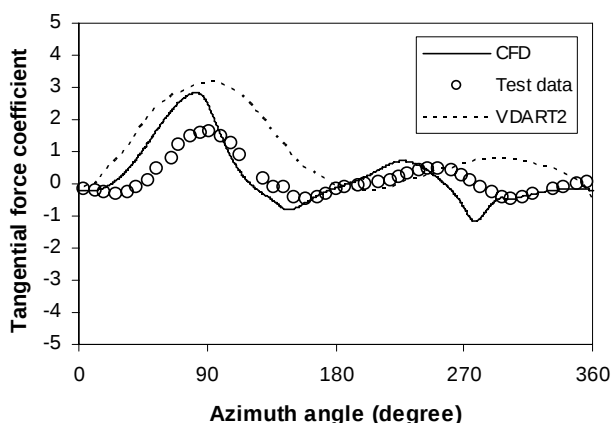
จากการคำนวณด้วย CFD สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงในทิศสัมผัสและตั้งฉากกับเส้นรอบวงของกังหัน (Tangential and normal force coefficients) ซึ่งมีนิยามตามสมการ (5) และสมการ (6) ตามลำดับ

$$C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \rho c U_\infty^2} \quad (5)$$

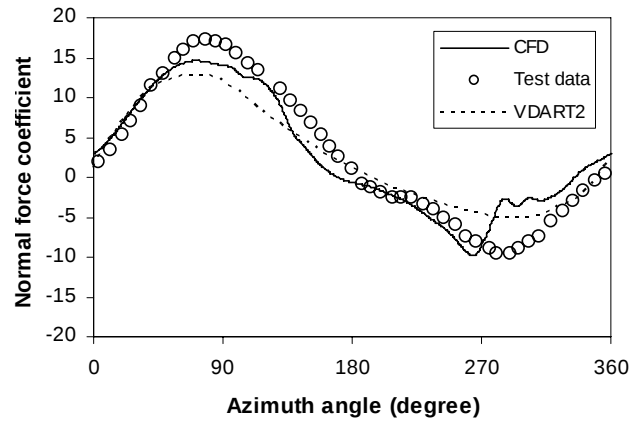
$$C_n = \frac{F_n}{\frac{1}{2} \rho c U_\infty^2} \quad (6)$$

เมื่อ F_t คือ แรงที่กระทำต่อหน้าตัดกังหันในทิศสัมผัสเส้นรอบวงของกังหัน และ F_n คือ แรงที่กระทำต่อหน้าตัดกังหันในทิศตั้งฉากกับเส้นรอบวงของกังหัน ρ คือความหนาแน่นของน้ำ c คือความยาวคอร์ด และ U_∞ คือความเร็วของน้ำที่ทางเข้าอ่าง

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองกับผลการทดลองและผลการคำนวณด้วยโปรแกรม VDART2 (แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์กังหันแกนตั้ง เสนอโดย Strickland ในปี 1981 [14]) ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์แรงในทิศสัมผัสเส้นแนวรัศมีรอบวงกังหัน

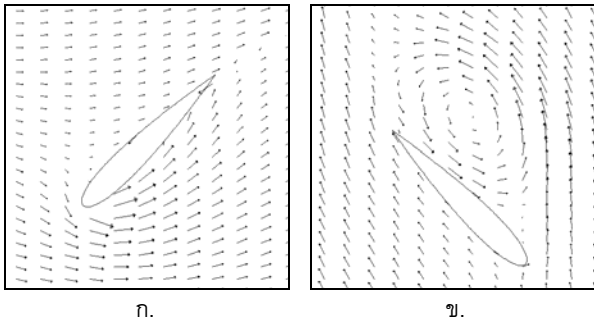


รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์แรงในทิศตั้งฉากเส้นแนวรัศมี

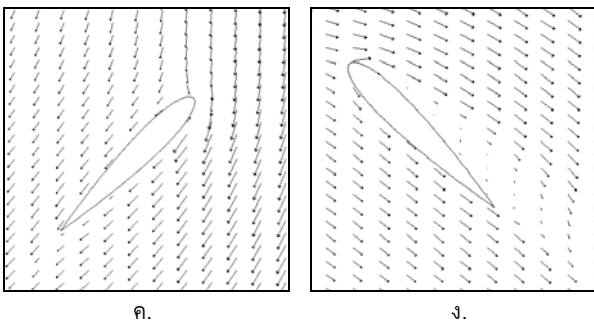
จะเห็นว่าโดยรวมแล้วสัมประสิทธิ์ทั้งสองที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ CFD ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี ยกเว้นในช่วง 0° ถึง 90° ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงในทิศสัมผัสเส้นรอบวงสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง แต่ยังคงใกล้เคียงกว่าผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง VDART2 กรณีนี้ผู้ทดลองให้เหตุผลว่าน่าจะเกิดเนื่องจาก Strickland ใช้แบบจำลองการปัดว้าง (Dynamic stall model) ที่ยังไม่ดีนัก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยคาดว่าผลการทดลองให้ค่าดังกล่าวต่ำ อาจสามารถเกิดได้จากการทดลองในอ่างน้ำที่เปิดด้านบน โดยในขณะที่ใบกังหันเคลื่อนที่สวนทางกับกระแสจะทำให้เกิดคลื่นผิวน้ำ (surface wave) ดังนั้นพลังงานที่ได้จะสูญเสียไปกับการเกิดคลื่นที่ผิวน้ำด้วย นอกจากนี้ผู้ทดลองติดตั้งใบกังหันโดยมีตัวจับยึดที่ด้านบนเท่านั้น ปลายใบกังหันสามารถเกิดการสั่นเนื่องจากแรงกระทำที่มีลักษณะเปลี่ยนไปเป็นรอบตามมุมหันที่เปลี่ยนไป (cyclic variation) ซึ่งอาจทำให้ค่าที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้ผลการทดลองก็แสดงให้เห็นว่าการสั่นทวีความรุนแรงขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายปีกสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการสั่นเข้าใกล้ความถี่พ้อง (resonance frequency) มากขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์แรงในทิศสัมผัสเส้นแนวรัศมีที่เปลี่ยนไปตามมุมหันตลอดรอบการหมุน 360° (azimuth angle) ส่งผลให้แรงบิดที่ได้จากกังหันแกนตั้งไม่คงที่ (ซึ่งต่างจากกังหันแกนนอนที่มีค่าคงที่) จากรูปที่ 6 กังหันจะให้แรงบิดสูงเมื่อเมื่อใบกังหันวิ่งผ่านในช่วง 90° ซึ่งเป็นส่วนด้านหน้าของกังหัน ที่เป็นดังนี้เพราะเกิดการประสานกันระหว่างความเร็วลมและมุมปะทะที่ดีที่สุด เพราะกำลังงานจะเกิดได้มากที่สุดเมื่อมีมุมปะทะที่เหมาะสมต่อลักษณะหน้าตัดใบกังหันและมีความเร็วลม (สัมพัทธ์) ที่สูง

ความเร็วของการไหลผ่านกังหันที่มุมหันต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8 และ 9



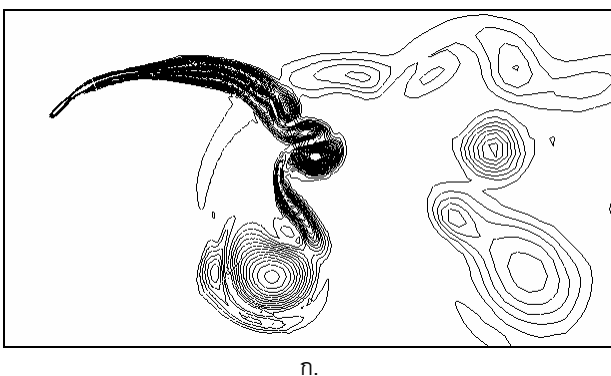
รูปที่ 8 ศรความเร็วที่มุมหัน ก. 45° และ ข. 135°



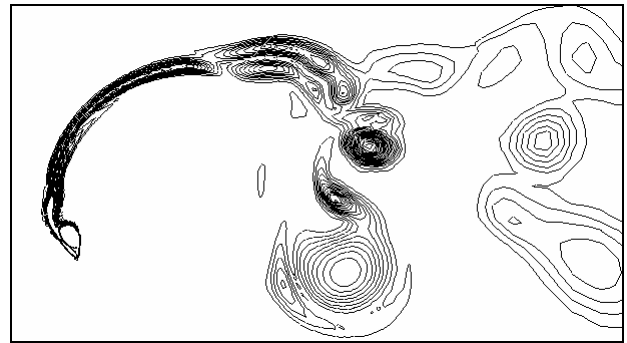
รูปที่ 9 ศรความเร็วที่มุมหัน ค. 225° ง. 315°

จากรูป 8, 9 เห็นได้ชัดว่าการไหลมีการแยกจากผิวและการแนบกับผิวสลับกันไปตามมุมปะทะที่เปลี่ยนไปตามมุมหัน ซึ่งทำให้เกิดการป้อว้าง (dynamic stall) ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งพฤติกรรมมีความซับซ้อนมากกว่าการป้อนิ่ง (static stall) เป็นอย่างมาก แม้การป้อนิ่งเองก็มีความซับซ้อนกว่าการไหลที่ไม่เกิดการป้อมากอยู่แล้วด้วย

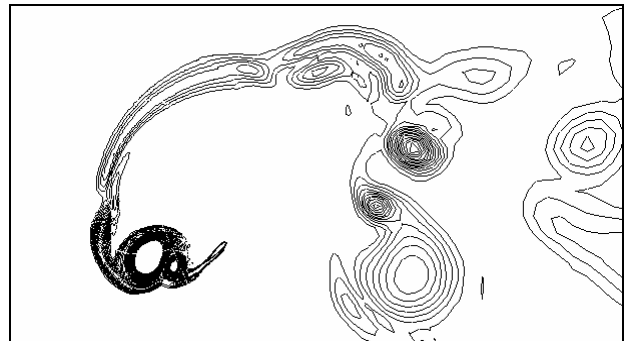
นอกจากนี้จากการคำนวณสามารถแสดงลักษณะของ “คลื่นสะบัดท้าย” (wake) ที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งเป็นการพล็อตของเส้นความวน (vorticity) จากรูปจะเห็นว่าเกิดการบานออกของคลื่นสะบัดท้ายอันเนื่องมาจากการดูดซับพลังงานของกังหัน พฤติกรรมโดดเด่นที่ควรสังเกตคือเกิดการแยกตัวของชั้นขีดผิว (boundary layer separation) ออกจากผิวใบกังหัน ทำให้เกิดการหมุนวนในบริเวณดังกล่าว 2 ครั้งคือที่ช่วงมุมหันประมาณ 80-120 และ 250-290 ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการสังเกตพฤติกรรมการป้อว้างของ Oler



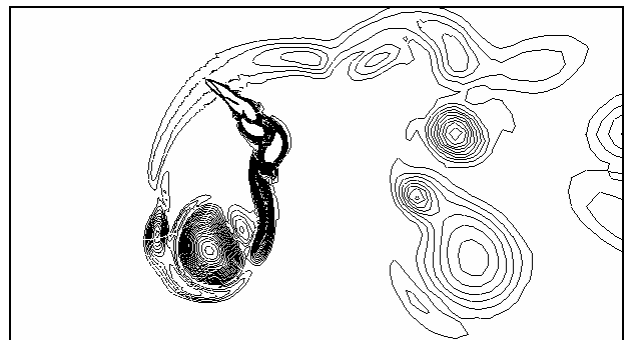
ก.



ข.



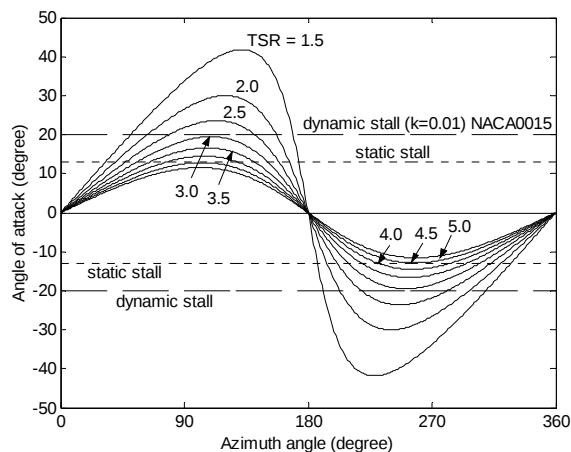
ค.



ง.

รูปที่ 10 ลักษณะของเวคเมื่อใบกังหันอยู่ที่มุมหัน
ก. 45° และ ข. 135° ค. 225° และ ง. 315°

กังหันแกนตั้งเป็นอุปกรณ์หมุนที่ใบกังหันมีการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะของลมอยู่ตลอดเวลา หากคำนวณมุมปะทะของกังหันกับมุมหันอย่างง่าย (ไม่คิดผลกระทบจากการเหนี่ยวนำการไหล) จะได้กราฟดังรูปที่ 11 เส้นประเส้นบนสุดและล่างสุดแสดงตำแหน่งการเกิดการป้อว้างของหน้าตัดกังหัน NACA 0015 ที่อัตราทางการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะไร้มิติ 0.02 ส่วนเส้นประที่เหลืออีกสองเส้นแสดงตำแหน่งที่เกิดการป้อนิ่ง



รูปที่ 11 มุมปะทะเทียบกับมุมหันที่อัตราส่วนความเร็วปลายปีกต่าง ๆ

จะเห็นว่าสำหรับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีก 2.5 (tip speed ratio = $tsr=2.5$) ที่มุมหัน ประมาณ $80^\circ - 120^\circ$ และ $240^\circ - 290^\circ$ ใบกังหัน จะอยู่ในช่วงที่สามารถเกิดการปัดได้เนื่องจาก มุมปะทะมีค่าสูงกว่า 20° ดังนั้นหากต้องการให้กังหันทำงานโดยไม่เกิดการลดลงของแรงยกอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปัดจึงควรออกแบบให้กังหันทำงานที่อัตราส่วนความเร็วปลายปีกเท่ากับประมาณ 3 หรือมากกว่านั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของกังหันสูงสุด

4. สรุปและวิเคราะห์ผล

การจำลองการไหลแบบไม่คงตัวในสองมิติผ่านกังหันลมแกนตั้ง ด้วยโปรแกรม Fluent ถือว่าประสบผลสำเร็จในขั้นต้น โดยสามารถหาผลเฉลยซึ่งให้ความแม่นยำได้ในระดับที่น่าพอใจเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ถือได้ว่าโปรแกรมมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ออกแบบ และพัฒนากังหันลมแกนตั้งต่อไป ได้อีกหนึ่งการกำหนดปัจจัยต่างๆในกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเป็นสิ่งที่จะต้องลองผิดลองถูก ซึ่งเป็นกระบวนการที่ยุ่งยากและใช้เวลามากพอสมควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการไหลที่ซับซ้อนเช่นการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้ง จึงไม่อาจกำหนดเป็นกฎตายตัวได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวิจัยด้านการคำนวณเชิงตัวเลขในการไหลที่ซับซ้อนนั้นเป็นทั้งศาสตร์และศิลปะที่จะต้องสมดุลกันจนกว่าจะเกิดศาสตร์ที่แน่นอนกว่าปัจจุบันนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ekaterinaris, J. A. and Max, F. F., 1997. Computational Prediction of Airfoil Dynamic Stall. Prog. Aerospace Sci. Vol. 33, pp.759-846.

- [2] Jumper, E. J., Hugo, R. J., 1991. Simple Theories of Dynamic Stall that are Helpful in Interpreting Computational Results.
- [3] Templin, R. J., 1974. Aerodynamic Performance Theory for the NRC Vertical - Axis Wind Turbine. LTR-160, National Research council of Canada, Ottawa.
- [4] Strickland, J. H., 1975. The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Streamtube, Sandia Technical Report, Sandia75 - 0430
- [5] Paraschivoiu, I. 1988. Double-Multiple Streamtube Model for Studying Vertical - Axis Wind Turbine. Journal of Propulsion and Power, Vol.4, 370 - 378.
- [6] Gohard, J. D., 1987. Free Wake Analysis of Wind Turbine Aerodynamics, TR 184 -14, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [7] Wilson, R. E., 1978. Vortex Sheet Analysis of the Giromill. Transaction, ASME Journal of Fluid Engineering 340-100
- [8] Strickland, J. H., Webster, B. T., and Nguyen, T., 1980. A Vortex Model of the Darrieus Turbine: An Analytical and Experimental Study, Sandia Technical Report, Sandia70 - 7058
- [9] Ponta, F. L. and Jacovkis, P. M., 2000. A vortex model for Darrieus turbine using finite element techniques. Renewable Energy 24-1-8
- [10] Blazek, J., 2001. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications., Elsevier, Netherlands.
- [11] Oler, J. W., Strickland, J. H., Im, B. J., Graham, G. H., 1983. Dynamic Stall Regulation of the Darrieus Turbine. Sandia Technical Report, SAND83-7029.
- [12] Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., 1992. A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. AIAA Paper 92-0439.
- [13] Graham, G. M., 1982. Measurement of Instantaneous Pressure Distributions and Blade Forces on an Airfoil Undergoing Cycloidal Motion. M.S. Thesis, Texas Tech University.
- [14] Strickland, J. H., 1981. Vortex Model of the Darrieus Turbine: An Analytical and Experimental Study. Sandia Technical Report, Sandia81-7039.