

การจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหัน

Simulation of Flow over a 3-Blade Vertical Axis Wind Turbine

จารุวรรณ ตั้งตันสกุลวงศ์ และ ทวีช 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 Tangtongsakulwong 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

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของ CFD ในการศึกษาการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้ง โดยจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศผ่านกังหันลมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การไหล FLUENT กังหันลมที่จำลองเป็นกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบแรงยก การจำลองเชิงตัวเลขกระทำโดยใช้กรรมวิธีปริมาตรจำกัดใน 3 มิติแบบไร้โครงสร้างประกอบด้วยเทคนิคการเลื่อนกริด (Sliding mesh technique) ในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ มวล และโมเมนตัม ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี โดยค่าแรงบิดมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วสัมพัทธ์และมุมปะทะที่เข้าสู่หน้าตัดกังหัน ผลเฉลยจากการคำนวณสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันได้ การศึกษาการไหลผ่านกังหันโดยใช้เทคนิคการเลื่อนกริดถือว่าประสบความสำเร็จในเบื้องต้นและสรุปได้ว่าโปรแกรมมีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้ในการทำนายการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้ง ซึ่งสามารถใช้ในการช่วยออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันได้ต่อไป

Abstract

This research aims to assess potentiality of CFD code in studying the flow field over a vertical axis wind turbine by numerically simulating the flow using the CFD software "FLUENT". The simulated turbine is small scale one of lift type. Simulation was carried out by using 3D unstructured-mesh finite volume method together with the sliding mesh technique to solve mass and momentum conservation equations. The results compare qualitatively well with theory. The simulated torque was

varied with azimuth angle in relations with the changing relative velocities and incidence angles. The power coefficient was calculated from those CFD results. The investigation is regarded as successful at the beginning and seems to suggest the potentiality of Fluent code. Consequently, it could be used as a tool for research and development of vertical axis wind turbine.

1. บทนำ

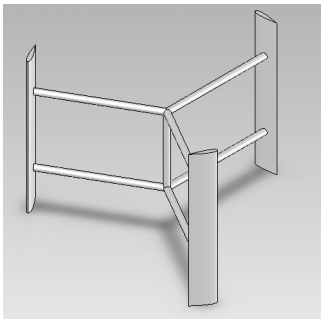
กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในลมให้เป็นพลังงานกล ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามทิศทางของแกนกังหันได้เป็นกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอน กังหันลมแกนตั้ง (VAWT) มีข้อดีที่เด่นชัดเหนือกังหันลมแกนนอน (HAWT) 2 ประการคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหรือชุดเฟืองทดสามารถติดตั้งที่ด้านล่างใกล้กับพื้นดินได้ และไม่มีความต้องการหันหน้าทิศทางลม ส่วนข้อเสียก็คือแรงบิดที่ได้มีค่าไม่คงที่ในการหมุนรอบแกนหนึ่งรอบ และไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ด้วยตัวเองเหมือน HAWT การหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันด้วยการทดลองมีความยุ่งยาก และมีต้นทุนสูง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายพฤติกรรมกริดการไหลของกังหันลมแกนตั้งโดยการสร้างแบบจำลองการไหลเริ่มต้นในปี 1974 [6] [7] และ [8] ได้สร้างแบบจำลองโดยอาศัยหลักการแบ่ง streamtube ประยุกต์เข้ากับ Blade element theory ผลการทำนายถูกต้องในระดับหนึ่งแต่ยังไม่สามารถครอบคลุมทุกเงื่อนไขการทำงานของกังหันได้ ต่อมา [3] [9] และ [10] ได้พัฒนาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นโดยพิจารณา vortex ที่เกิดขึ้นด้วยผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำกว่าแบบจำลองแบบ streamtube การวิเคราะห์ดังกล่าวนำไปสู่ความเข้าใจในบทบาทของอากาศพลศาสตร์

แบบไม่คงตัว (Unsteady aerodynamics) มากขึ้นแต่ก็ยังไม่สามารถทำนายการไหลผ่านกังหันแกนตั้งได้ครอบคลุมทุกช่วงการทำงานของกังหันเช่นเดิม นอกจากนี้เมื่อคอมพิวเตอร์มีศักยภาพสูงขึ้นตามยุคสมัยก็มีความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันแกนตั้งในเชิงประยุกต์มากขึ้น เช่น [4] ได้ผสมผสาน วิธีคิดของ [10] เข้ากับกรรมวิธีสมาชิกจำกัด(Finite-element analysis) ของการไหลรอบ ๆ ใบกังหัน ผลจากการทำนายด้วยแบบจำลองนี้มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้อาจการทดลองและให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าการใช้แบบจำลองแบบดั้งเดิมอีกด้วย

การคำนวณการไหลแบบพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamic:CFD) ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนามาจนมีความสามารถทำนายการไหลได้ถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ การใช้ CFD ทำนายพฤติกรรมการไหลผ่านกังหันลมได้สำเร็จจะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการช่วยวิเคราะห์วิจัยกังหันลมต่อไปได้งานวิจัยนี้ประเมินศักยภาพของ CFD ในการศึกษาการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้งเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบ วิจัยและพัฒนากังหันให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้ต่อไป

2. การจำลองเชิงตัวเลข

ลักษณะของกังหันที่ถูกจำลองเป็นกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบแรงยก (lift type) สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า มีเส้นผ่าศูนย์กลางของกังหัน 0.775 เมตร ความยาวใบกังหัน 0.5 เมตร หน้าตัดกังหันที่ใช้คือ NACA0018 ความยาวคอร์ด 0.08 เมตร ใบกังหันมีจำนวน 3 ใบ ในการจำลองนี้ความเร็วต้นลมถูกกำหนดให้คงที่ ที่ 3 เมตร / วินาที และความเร็วรอบของใบกังหันจะถูกแปรค่าเพื่อหาสัมประสิทธิ์กำลังเป็นฟังก์ชันของความเร็วปลายปีก ลักษณะของกังหันที่จำลองเป็นดังรูปที่ 1



รูปที่1 ลักษณะกังหันจำลอง

การจำลองการไหลใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลสามมิติ FLUENT ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดโปรแกรมหนึ่ง โดยใช้กรรมวิธีปริมาตรจำกัดและเทคนิคการเคลื่อนกริด (sliding mesh) ในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์มวลและโมเมนตัม การใช้เทคนิคนี้เกิดความยุ่งยากและเสียเวลาพอสมควร แต่เป็นความจำเป็นเนื่องจาก FLUENT ยังไม่สามารถใช้ระบบหมุนแกนอ้างอิง (rotating reference frame) ในการไหลแบบไม่คงตัวได้ สมมุติฐานในการจำลองก็คือ 1) การไหลไม่คิดความหนืด (inviscid) 2) การไหลแบบไม่อัดตัว (incompressible flow) 3) การไหลเป็นแบบชั่วรอบ (time

periodic) 4) การไหลบริเวณต้นลมก่อนเข้าสู่กังหันเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) และเป็นเอกรูป (uniform) การจำลองโดยใช้เทคนิคการเคลื่อนกริดนี้ โดเมนที่ใช้ในการคำนวณถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ โดเมนส่วนหุคหนึ่งและโดเมนส่วนหมุนซึ่งหมุนไปพร้อมกับแกนอ้างอิง ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมพัทธ์และความเร็วสัมบูรณ์สามารถเขียนได้เป็น

$$\vec{v}_r = \vec{v} - (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \tag{1}$$

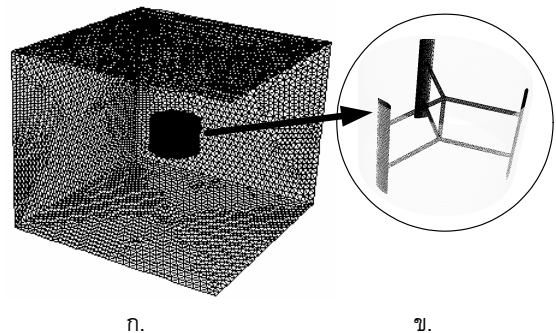
เมื่อ \vec{v}_r คือความเร็วสัมพัทธ์ \vec{v} คือความเร็วสัมบูรณ์ $\vec{\Omega}$ คือความเร็วเชิงมุมการหมุนของกังหันและ \vec{r} คือรัศมีของกังหัน การหมุนของโดเมนดังกล่าวทำให้เกิดแรงขึ้นอีกสองพจน์ในสมการอนุพันธ์โมเมนตัม [1] ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเร็วสัมพัทธ์ได้ดังนี้

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

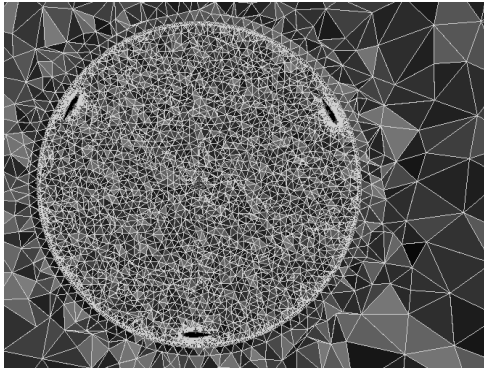
พจน์ $\rho(2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r)$ คือแรง Coriolis และ $\rho\vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}$ คือแรงหนีศูนย์กลาง โดย ρ คือ ความตันสถิตย์ $\vec{\tau}$ คือเทนเซอร์ของความเค้น $\rho \vec{g}$ เป็นแรงโน้มถ่วง ในที่นี้เทนเซอร์ของความเค้นหาจากกฎแรงเฉือนของนิวตัน ผนวกกับ Stokes' hypothesis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

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

โดย μ คือความหนืดของของไหล และ I คือยูนิทเทนเซอร์ เมื่อกำหนดสมมุติฐานว่าการไหลไม่มีความหนืด พจน์เทนเซอร์ของความเค้นจึงหมดไป ทำให้ทางขวามือของสมการอนุพันธ์โมเมนตัมลดรูปเหลือเพียงแรงที่เกิดจากความดัน ในระหว่างการคำนวณกริดในส่วนหมุนจะเคลื่อนที่ไปและโปรแกรมจะคำนวณพังก์ชระหว่างกริดที่สัมผัสกันของทั้งสองโดเมนด้วยการเฉลี่ยค่า (interpolation) กริดที่ใช้ในการจำลองการไหลเป็นกริดไร้โครงสร้าง (unstructured mesh) มีลักษณะในภาพรวมดังรูปที่ 2 ส่วนรูปที่ 3 แสดงกริดบริเวณรอบ ๆ ใบกังหัน



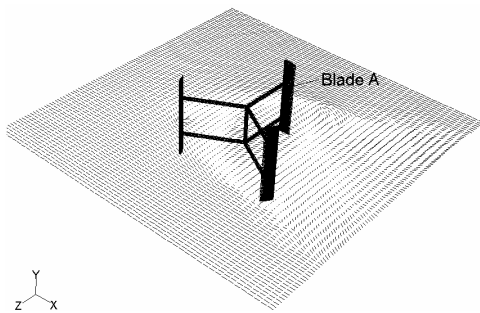
รูปที่ 2 กริดที่ใช้ในการคำนวณ ก. ส่วนหุคหนึ่ง และ ข. ส่วนหมุน



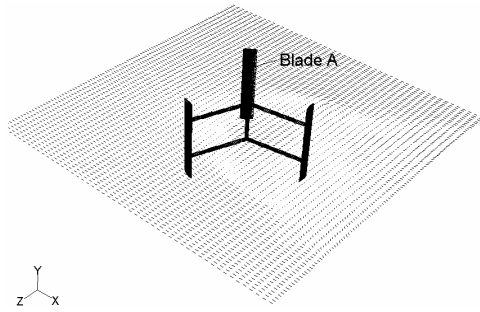
รูปที่ 3 ลักษณะกริดบริเวณรอบ ๆ ใบกังหัน

3. ผลลัพธ์และการวิจารณ์

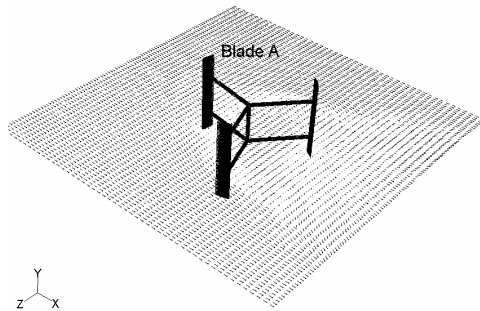
รูปที่ 4 แสดงเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ x-z ที่กึ่งกลางความสูงของกังหัน เมื่อกังหันหมุนไปที่มุม azimuth ต่าง ๆ โดยลมเข้ามาในทิศจากจุดกำเนิดไปในทิศทางของแกน x



ก.



ข.

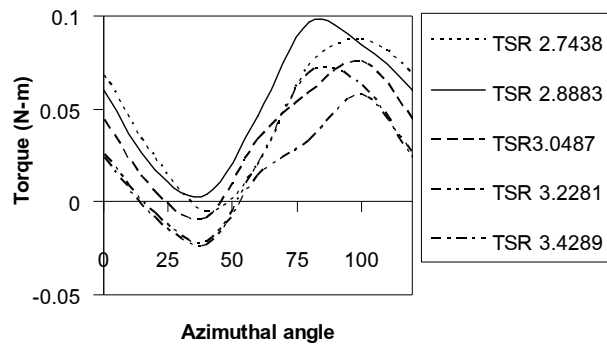


ค.

รูปที่ 4 เวกเตอร์ความเร็วของกังหันที่มุมหมุนต่าง ๆ

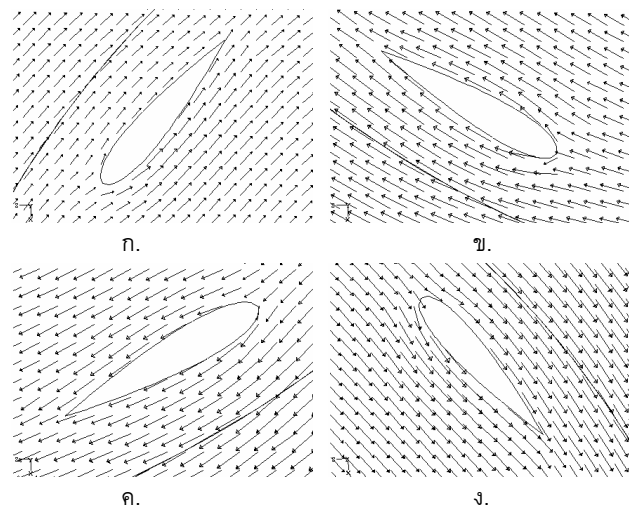
ในภาพรวมจะเห็นได้ชัดว่าความเร็วในบริเวณพื้นที่การกวาดของกังหันมีค่าต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง ซึ่งเป็นผลจากการดูดซับพลังงานจากลมของกังหัน และบริเวณความเร็วต่ำดังกล่าวบานออกหลังจากผ่านกังหัน พฤติกรรมโดดเด่นที่ควรแก่การสังเกตคือ มีการหมุนตัวของการไหลที่มุม azimuth ประมาณ 270 องศาเสมอ ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของกังหัน ซึ่งจัดว่ามีความถูกต้องตามหลักการของการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม

จากผลการคำนวณด้วย CFD สามารถหาค่าแรงบิดรวมที่กระทำต่อแกนกังหัน ได้ดังรูปที่ 5 เห็นได้ว่าแรงบิดมีการแปรค่าตามองศาการหมุนของกังหันซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี โดยค่าแรงบิดสูงสุดของกังหันมีค่าประมาณ 0.1 N-m เกิดขึ้นที่อัตราส่วนความเร็วปลายปีก 2.89 (หรือ Tip speed ratio, TSR) และช้ารอบทุก ๆ 120 องศา การหมุน



รูปที่ 5 แรงบิดรวมที่กระทำกับแกนกังหัน

การแปรค่าของแรงบิดเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะและความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าสู่หน้าตัดกังหัน รายละเอียดความเร็วสัมพัทธ์บริเวณใกล้ปีกกังหันที่มุม azimuth ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 6



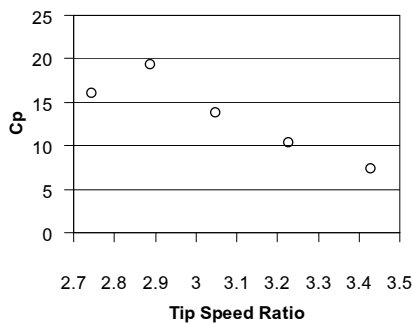
รูปที่ 6 ความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าสู่ปีกกังหันที่ตำแหน่ง Azimuth ก. 50° ข. 130° ค. 230° และ ง. 310°

ลมวิ่งเข้าสู่กังหันจากด้านบนของภาพ กำหนดให้มุม azimuth 0° เริ่มต้นในทิศขนานกับความเร็วดังกล่าวและมีค่าเป็นบวกในทิศทวนเข็มนาฬิกา จะเห็นว่าความเร็วสัมพัทธ์และมุมปะทะที่เข้าสู่ปีกกังหันมีความแตกต่างกัน แต่อยู่ในทิศที่ส่งเสริมการหมุนของกังหันทั้ง 4 ตำแหน่ง โดยความเร็วสัมพัทธ์ที่มุม 230° และ 310° มีค่ามากกว่าเนื่องจากอยู่ในตำแหน่งที่ทิศทางของความเร็วลมกับความเร็วของกังหันส่งเสริมกัน เมื่อกังหันหมุนความเร็วลมที่ปะทะกับใบกังหันมีทิศทางเปลี่ยนไปจึงทำให้มุมปะทะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและส่งผลถึงค่าแรงบิดด้วย

ในส่วนของการคำนวณสามารถหาได้จากค่าแรงบิดเฉลี่ยใน 1 รอบ คูณกับความเร็วเชิงมุม จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหัน [2]

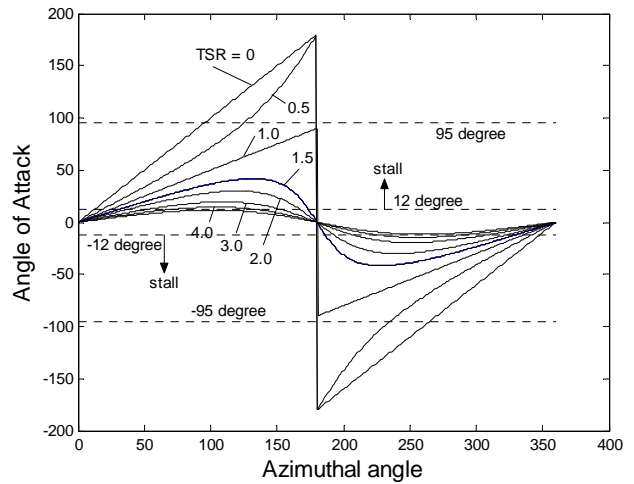
$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} \quad (4)$$

เมื่อ P คือ พลังงานที่กังหันสามารถสกัดได้ A คือพื้นที่กั้นลม (Frontal area) ในที่นี้เท่ากับความเร็วของกังหันคูณด้วยเส้นผ่าศูนย์กลาง ผลการคำนวณเป็นดังรูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของกังหันมีค่าประมาณ 19 % และเกิดขึ้นที่อัตราส่วนความเร็วปลายปีกเท่ากับ 2.889 โดยค่าประสิทธิภาพของกังหันที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่ากังหันแบบดาร์ริอุส (Darieus) ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ อัตราส่วนความเร็วปลายปีกต่าง ๆ

นอกจากนี้ได้หาความสัมพันธ์ของมุมปะทะกับมุมที่กังหันหมุนไป จาก 0-360 องศา เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความเร็วปลายปีกพบว่ามุมปะทะมีค่าน้อยลงตามค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีกดังรูปที่ 8 และจากข้อมูลการทดสอบใบกังหันแกนตั้งในอุโมงค์ลมของ Sandia National Laboratories [5] พบว่ากังหันหน้าตัด NACA0018 นั้นจะเกิด stall ที่มุม 12 องศาซึ่งจะทำให้แรงยกลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพของกังหันตกลง หากกังหันหมุนที่อัตราส่วนความเร็วปลายปีกสูงขึ้น โอกาสในการเกิดการป้อจะน้อยลง อย่างไรก็ตามหากอัตราส่วนความเร็วปลายปีกมีค่ามากเกินไป ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกซึ่งแปรตามมุมปะทะจะน้อยลงส่งผลให้แรงที่กระทำต่อใบกังหันจะลดและทำให้ประสิทธิภาพของกังหันตกลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะกับมุม Azimuth

เมื่อพิจารณาจากภาพ จะเห็นว่าใบกังหันที่ใช้หน้าตัด NACA 0018 นั้น ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีกที่เหมาะสมที่จะให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดน่าจะมีค่าประมาณ 3 ซึ่งถึงแม้จะมีบางช่วงที่เกิดการป้อเนื่องจากมุมปะทะเกิน 12 องศา แต่ก็เกินไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดเกิดขึ้นที่อัตราส่วนความเร็วปลายปีกมีค่าประมาณ 2.9 ซึ่งมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

4. สรุปและวิเคราะห์

การจำลองการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้งด้วยโปรแกรม Fluent โดยเทคนิคการเคลื่อนกริดถือว่าประสบความสำเร็จในขั้นต้น โดยสามารถหาผลเฉลยในรูปของ ความเร็วและ ความดัน ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์การออกแบบและพัฒนากังหันลมแกนตั้งต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Blazek, J., 2001. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications., Elsevier, Netherlands.
- [2] Freris,L.L.,1990. Wind Energy Conversion System. Prentice Hall,Great Britain.
- [3] Holme,O. 1976. A contribution to the aerodynamic theory of the vertical-axis wind turbine. Wind Energy Syst. BHR, Cambridge, U.K.,Paper
- [4] Ponta,F.L. and Jacovkis,P.M. 2000. A vortex model for Darrieus turbine using finite element techniques. Renewable Energy 24-1-8
- [5] Sheidahi, R.E. and Klimas, P.C. 1981. Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack of Use in Aerodynamic

Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. Sandia National Laboratories Energy Report.,USA

- [6] Strickland, J.H.1975. The Darrieus turbine:Aperformance prediction model using multiple streamtubes. SAND 75-0431, Sandia lab., Albuquerque, New Mexico
- [7] Templin,R.J. 1974. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine. National Aeronautical Establishment, Ottawa(Ontario)
- [8] Wilson, R.E. and .Lissaman, P.B.S 1974. Applied Aerodynamics of Wind Power Machines. Springfield, Virginia.
- [9] Wilson,R.E. 1978. Vortex sheet analysis of the Giromill. Journal of Fluid Engineering 340-100
- [10] Wilson,R.E. and Mckie,W.R. 1978. A comparison of aerodynamic analyses for the Darrieus rotor. Proc,Int. Wind Energy system, BHRA, Amsterdam.