



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

แบบจำลองความปั่นป่วน K-epsilon ($k - \epsilon$) และ K-omega ($k - \omega$) สำหรับการวิเคราะห์รอบการหมุนของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนสำหรับชุมชน

Application of K-epsilon ($k - \epsilon$) and K-omega ($k - \omega$) Turbulence Model for Rotation Analysis of Vertical Axis Water Turbine Generator for Community

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Werayoot Lahamornchaiyakul*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok Campus, Maung, Phitsanulok 65000

* Corresponding author.

E-mail: werayootmutl@gmail.com; Telephone: 09 7475 6120

บทคัดย่อ

รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นรูปแบบของสภาวะการไหลที่พบมากในงานวิศวกรรมของไหล เช่น การไหลของอากาศผ่านใบกังหันลม และการไหลของน้ำผ่านวงล้อของกังหันน้ำ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันเครื่องมือที่เข้ามาช่วยในการออกแบบและเข้ามาช่วยลดเวลาในการศึกษาวิเคราะห์ของวิศวกรนั้นคือ โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ วิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแกนนอนสำหรับชุมชนโดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของน้ำผ่านวงกังหันน้ำด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k - \epsilon$ และ $k - \omega$ SST ซึ่งกังหันน้ำที่จำลองเป็นกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแกนนอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อ 150 มิลลิเมตร ซึ่งการจำลองเชิงตัวเลขนั้น กระทำโดยใช้กรรมวิธีการจำกัดปริมาตรในแนวแกน 3 มิติ โดยสร้างปริมาตรควบคุม (control volume) ให้กับวงล้อกังหันน้ำเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ในการหาผลการทำงานโดยใช้สมการอนุพันธ์มวล และสมการโมเมนตัม ด้วยโปรแกรม Solidworks flow simulation 2014 โดยขนาดหัวน้ำที่ทำการศึกษามีความสูง 2.23 เมตร ความเร็วน้ำ 6.61 เมตรต่อวินาที ได้รอบการหมุนสูงสุด 214 rpm และได้แรงบิด 9.01 นิวตัน.เมตร กังหันน้ำเป็นชนิด กังหันน้ำขนาดเล็กแบบแกนนอน ผลที่ได้คือรอบการหมุนที่เหมาะสมที่สอดคล้องกับสภาพการไหลจริงมากที่สุด

คำสำคัญ

แบบจำลองความปั่นป่วน พลศาสตร์การคำนวณเชิงตัวเลข กังหันน้ำขนาดเล็ก

Abstract

Turbulence flows are often founded in the flow of fluid engineering works such as the air flow through a wind turbine blade and water flow through a wheel of water turbine. Computational fluid dynamics (CFD) is now recognized as an essential design tool for engineering. The research presents the proposed results of analyzing the performance of horizontal axis micro water turbine generator for community, using computational fluid dynamics (CFD) technique by application using K-epsilon ($k - \epsilon$) and K-omega SST ($k - \omega$ SST) Turbulence model for calculation and rotational analysis from the solidworks flow simulation program version 2014. The modeling is 150 mm. diameter using for the efficiency prediction in numerical method. The water turbine simulation producing the electricity is numerical modeled by varying flows through the wheel of vertical axis micro water turbine. The duplication of the numerical is modeled by the control volume methodology. Additionally, it is easier for solving of the conservations equations using mass and momentum

theory. It is found that average head is 2.23 m, water velocity is 6.61 m/s, wheel speed is 214 rpm and torque generate is 9.01 N.m. The micro water turbine type is designed to be horizontal axis micro water turbine. The result reveals that the designed RPM is suitable for this flow condition.

Keywords

turbulence model; computational fluid dynamics; micro water turbine.

1. บทนำ

การออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กให้มีประสิทธิภาพที่สูงเพื่อผลิตใช้เองในชุมชนตลอดจนอุตสาหกรรมด้านไฟฟ้าของประเทศจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ทันสมัยที่เข้ามาช่วยในการออกแบบระบบการทำงานเพื่อให้การออกแบบมีความรวดเร็วและมีความแม่นยำที่สูง [1,2] อย่างไรก็ตามจากข้อสมมุติฐานเชิงอุดมคติหลายประการทำให้วิธีเชิงทฤษฎีมีข้อจำกัดซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ [3] เครื่องมือที่ใช้กันอยู่ในหน่วยงานวิจัยทางด้านกลศาสตร์ของไหลจะอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปเข้ามาช่วยในการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหลภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดต่าง ๆ ที่เลือกใช้ให้เหมาะสมต่องานวิจัยนั้น ๆ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของปัญหาขอบเขต (boundary condition) เมื่อมีการป้อนค่าปัญหาขอบเขตที่ถูกต้อง ผลการจำลองเชิงตัวเลขที่ได้จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วน เพื่อทำการแยกรูปแบบการวิเคราะห์ส่วนแรกนั้นเป็นการศึกษาการสร้างต้นแบบของกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตกระแสไฟฟ้าแบบแกนนอนและทำการทดสอบวัดรอบการหมุนที่เกิดขึ้นจริงหลังจากที่มีแรงของการไหลของน้ำเข้ามากระทำกับใบพัดกังหันน้ำทำให้เกิดรอบการหมุน ซึ่งผลที่ได้นั้น ได้รอบการหมุนสูงสุดที่ 250 รอบต่อนาที ที่ความสูงของหัวน้ำ 2 เมตรน้ำ และไม่มีภาระโหลดเข้ามากระทำ [4,5] ส่วนที่สองเป็นการศึกษาแนวทางการเลือกใช้ชนิดของแบบจำลองความปั่นป่วน โดยผู้วิจัยได้เลือกแบบจำลองชนิดมาตรฐาน K-epsilon ($k-\epsilon$) และแบบจำลองชนิดมาตรฐาน K-omega SST ($k-\omega$ SST) เข้ามาทำการจำลองผลเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านของน้ำที่วิ่งผ่านวงล้อกังหันน้ำแบบแกนนอน [6] เพื่อทำการศึกษารูปร่างของคำตอบในแต่ละแบบจำลอง เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับการทดสอบจริงที่ได้จากต้นแบบ [7] เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง

เทียบกับการศึกษาขอบเขตของปัญหาที่ได้ป้อนภายใต้กรอบของสมมุติฐานต่าง ๆ ในเบื้องต้น [8] ปัจจุบันการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) ได้มีบทบาทสำคัญเนื่องจากช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาในการออกแบบ สำหรับการไหลในงานด้านวิศวกรรมของไหลขั้นสูง [9] โดยทั่วไปนั้นพบว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน สิ่งที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการศึกษาจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence models) โดยแบบจำลองความปั่นป่วนในปัจจุบันมีหลายแบบ เช่น ($k-\epsilon$) Spalart and Allmaras ($k-\omega$) Reynolds stress models และ large Eddy simulation (LED) เป็นต้น แบบจำลองความปั่นป่วนที่เป็นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันคือ ($k-\epsilon$) ซึ่งให้ค่าความถูกต้องผลในการคำนวณเป็นที่น่าพอใจใช้ระยะเวลาในการคำนวณไม่มาก และการเขียนโปรแกรมในการคำนวณไม่ซับซ้อน ส่วนแบบจำลอง ($k-\omega$ SST) ได้ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาใหม่ด้วยการผสมผสานข้อดีระหว่าง $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ [10]

จากหลักการดังกล่าว งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะทำการประเมินผลของแบบจำลองความปั่นป่วน ($k-\epsilon$) ในลักษณะของผลการศึกษาต่าง ๆ เทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน ($k-\omega$ SST) เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นต่อผลการทดสอบจริง

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแกนนอน
- 2) เพื่อเปรียบเทียบผลทางพลศาสตร์ของไหลของแบบจำลอง ชนิดมาตรฐาน K-epsilon ($k-\epsilon$) และแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST
- 3) เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา ออกแบบต่อไป

3. สมมุติฐานการวิจัย

- 1) ตัวแปรต้น : ขนาดวงล้อและโวลูตของกังหันน้ำ
ขนาด 75 มิลลิเมตร มุมใบกังหัน
น้ำ 25 องศา จำนวน 8 ใบ
- 2) ตัวแปรตาม : แรงบิดที่ผลิตได้จากกังหันน้ำ
- 3) ตัวแปรควบคุม : ความสูงของหัวน้ำ (head)
2.23 เมตร ความเร็วน้ำ 6.61
เมตรต่อวินาที
- 4) สมมุติฐาน : ความดัน (pressure) ทางเข้าและ
ทางออกเป็นศูนย์

4. ขอบเขตงานวิจัย

ทำการสร้างขนาดโดเมนการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลให้เหมาะสม หลังจากนั้นนำโดเมนที่ได้มาทำการวิเคราะห์สนามการไหลด้วยแบบจำลอง K-epsilon ($k-\epsilon$) และแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST เพื่อนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

5. ทฤษฎีและหลักการ

5.1 สมการพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วน

สมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนนั้น ประกอบไปด้วยสมการกฎทรงมวล และสมการโมเมนตัม เช่นเดียวกับการไหลแบบราบเรียบ แต่ด้วยลักษณะที่ต่างกันของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ที่ทำให้สมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนต่างจากสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบราบเรียบ โดยสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนมีความซับซ้อนมากกว่าเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในการไหล ในทางวิศวกรรม สิ่งที่เราสนใจส่วนใหญ่คือค่าเฉลี่ยของการไหล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ นำวิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds averaging) มาใช้กับสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อแปลงสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย โดยสมมุติฐานของงานวิจัยนี้ได้แก่ เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้, ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และเป็นสภาวะคงตัว สามารถเขียนเป็นสมการในรูปเทนเซอร์ได้ดังนี้

สมการกฎทรงมวล

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2)$$

โดยที่ μ คือค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด ρ คือความหนาแน่น สมการโมเมนตัมที่ถูกเฉลี่ยด้วยวิธีการของเรย์โนลด์ต่างจากสมการโมเมนตัมที่ยังไม่ได้ถูกเฉลี่ย เนื่องจากมีพจน์ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการใช้วิธีการเฉลี่ยของค่าเรย์โนลด์ คือ พจน์ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stresses) $\overline{u_i' u_j'}$ ซึ่งพจน์ที่เกิดขึ้นมาเป็นพจน์ที่เกิดจากค่าของความปั่นป่วนในรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในสภาวะการต่าง ๆ ซึ่งพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ จะมีรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการตามสมมุติฐานของ Boussinesq [2] ดังนี้

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

โดยที่ค่า Eddy viscosity (μ_t) เป็นความสัมพันธ์ของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) และอัตราการลดลงของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ϵ) สามารถเขียนได้ดังนี้ [5]

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

5.2 แบบจำลองปั่นป่วนชนิด Standard $k-\epsilon$

สมการของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (5)$$

อัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของค่าความปั่นป่วนเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$+ \left(C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) \right) \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k}$$

$$\text{โดยที่} \quad G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_T} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (8)$$

สำหรับค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการจะมีค่าคงที่ของ Launder และ Sharma [6] ดังนี้

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\varepsilon 3} = 1, \sigma_k = 1,$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9$$

5.3 แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard $k-\omega$ SST (SST, Shear Stress Transport Turbulence Model)

แบบจำลอง $k-\omega$ SST ของ Menter [1] สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta^* k \omega \quad (9)$$

สมการอัตราการผลิตของพลังงานจลน์ของค่าความปั่นป่วนจำเพาะ (ω) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) \\ &- \frac{\alpha}{\nu_i} \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta \omega^2 \\ &+ 2(1-F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (10)$$

โดยที่ค่า Eddy viscosity แสดงได้ดังนี้ [7]

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega F_2}{a1\omega} \right]} \quad (11)$$

$$\text{โดยที่} \quad \Omega = \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (12)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (14)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho \omega y^2} \right] \quad (15)$$

โดยที่พจน์ความเค้นเฉือนโนลด์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการตามสมมติฐานของ Boussinesq [7] ดังสมการที่ (3) ซึ่งค่าคงที่ในสมการได้แก่ $\beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ หาได้จากสมการที่ (16) โดยที่ค่า θ เป็นค่าคงที่ใด ๆ ที่ใช้ในสมการ, θ_1 เป็นค่าคงที่ที่มาจากแบบจำลองชนิด $k-\omega$, θ_2 เป็นค่าคงที่ที่มาจากแบบจำลองชนิด $k-\varepsilon$ ซึ่งค่า

$$(\theta) = F_1(\theta) + (1-F_1)(\theta_2) \quad (16)$$

$$\text{โดยที่} \quad F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (17)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{k}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right) \left(\frac{4 \rho k}{\sigma_{\omega 2} D_{\omega}^+ y^2} \right) \right] \quad (18)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[2 \rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right] \quad (19)$$

สำหรับค่าคงที่อื่น ๆ ในสมการมีดังนี้

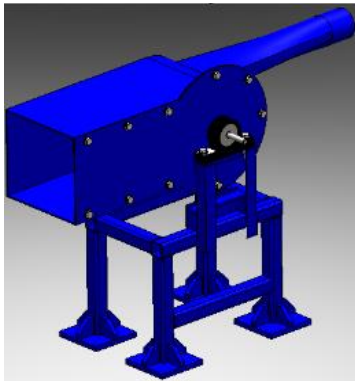
$$\beta_1 = 0.075, \beta_2 = 0.0826, a_1 = 0.31, \alpha^* = 1$$

6. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาผลของการจำลองเชิงตัวเลขที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการไหลของน้ำที่ไหลผ่านเส้น profile ใบของล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแกนนอน โดยทำการประเมินประสิทธิภาพของความแม่นยำและผลของการรู้เข้าของคำตอบที่รวดเร็วและมีถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนที่เกิดจากสภาวะการไหลของของไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกชนิดของแบบจำลองไว้ 2 ชนิด คือ แบบจำลองชนิด $k-\varepsilon$ Model และ แบบจำลองชนิด $k-\omega$ SST เพื่อนำผลการจำลองเชิงตัวเลขที่ได้มาทำการวิเคราะห์และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จากผลการทดสอบจริงที่ได้จากต้นแบบที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น ดังรูปที่ 1 และต้นแบบที่ใช้วิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในระบบการทำงานของกังหันน้ำ



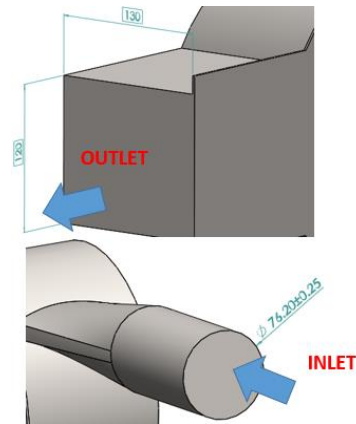
รูปที่ 1 กังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้าที่ทำงานวิจัย



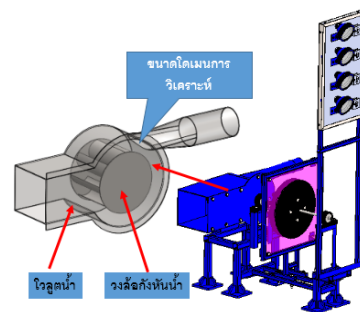
รูปที่ 2 แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

ในการจำลองผลเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์ผลทางด้านพลศาสตร์ของไหลนั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากที่สุด คือการกำหนดโดเมนและขนาดของโดเมนให้เหมาะสมต่อการศึกษาวิจัย ซึ่งชิ้นส่วนที่นำมาทำการวิเคราะห์ผลควรที่จะมีขนาดที่เหมือนจริงมากที่สุด เพื่อให้ได้รูปแบบการไหลที่คล้ายกับการทดสอบจริง ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดโวลูตน้ำให้มีขนาดทางเข้าของน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.20 มิลลิเมตร และทางออกมีความกว้าง 130 มิลลิเมตร สูง 120 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4

การกำหนดขนาดของโดเมนที่เหมาะสมในการวิเคราะห์จะมีผลต่อการสร้างเมชและผลของคำตอบที่ถูกต้อง เพราะขนาดของโดเมนจะเป็นตัวที่กำหนดสัดส่วนในการวิเคราะห์และสร้างขอบเขตของเมชเอลิเมนต์และการกำหนดปัญหาขอบเขตต่างๆ ทางการศึกษา (boundary condition) เพราะโดเมนที่มากเกินไปจะส่งผลในการสร้างเมชและการคำนวณผล เพราะจะใช้เวลาในการคำนวณผลที่มากขึ้น การเลือกขนาดของโดเมน



รูปที่ 3 ขนาดทางเข้าและทางออกของน้ำ

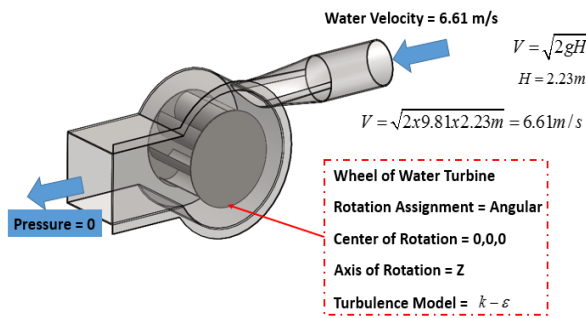
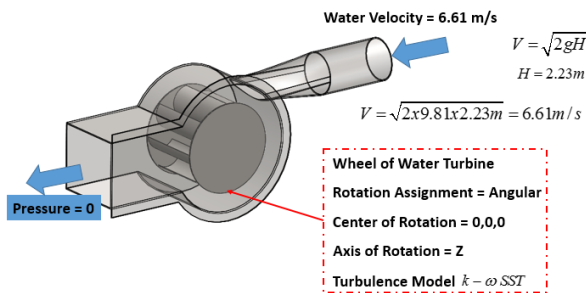


รูปที่ 4 ขนาดของโดเมนที่เลือกสำหรับการวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์ที่เหมาะสมควรที่จะเลือกเพียงโวลูตน้ำและวงล้อกังหันน้ำ [11] ซึ่งเป็นส่วนที่มีผลต่อรูปแบบการไหลมากที่สุด

นอกจากขนาดของโดเมนที่มีความเหมาะสมแล้ว สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการกำหนดปัญหาขอบเขตให้กับแบบจำลองเพื่อทำการจำลองผลให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นจริง ในการศึกษาวิจัยนี้ นอกจากความแตกต่างของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 ชนิดที่ใช้แล้ว สิ่งที่มีเหมือนกันคือการป้อนค่าตัวแปร เช่น ค่าความเร็วลำนํ้าที่เทียบกับระดับความสูงของหัวน้ำ การกำหนดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของล้อกังหันน้ำ การกำหนดค่า free motion เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบของแบบจำลองทั้งสองสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 5 และ 6

ชนิดของเมชเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามการไหลของน้ำเพื่อคำนวณการหมุนในงานวิจัยจะเลือกใช้ 3D Mesh แบบ Tetrahedral ดังแสดงในรูปที่ 7 จำนวนเมชเอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยมีจำนวน 1,400,000 เมชเอลิเมนต์ จากรูปที่ 5 และ 6 กำหนดลักษณะ

รูปที่ 5 แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับ $k-\epsilon$ รูปที่ 6 แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับ $k-\omega$ SST

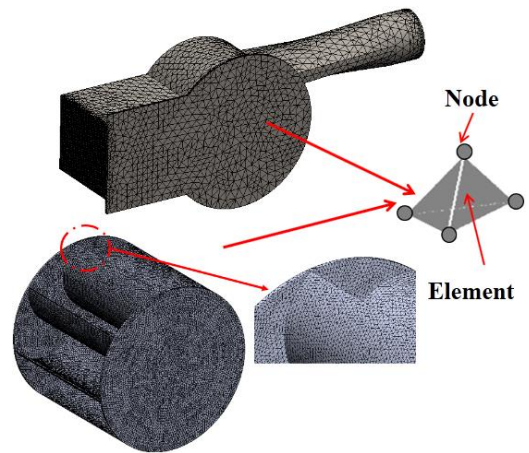
ของปัญหาสำหรับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล โดยการกำหนดคุณลักษณะทางกายภาพและสมมุติฐาน [11] ที่ใช้ในงานวิจัยโดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังตารางที่ 1

1. กำหนดให้น้ำไม่มีการเคลื่อนตัวที่ผนังของโวลูตน้ำ No-Slip Wall
2. กำหนดให้วงล้อกังหันน้ำเป็น Rotating Wall
3. พิจารณาน้ำให้เป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้
4. กำหนดให้การไหลของน้ำภายในโวลูตน้ำเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

ในการจำลองในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ระบบพิกัดฉากแบบ 3 มิติ (X,Y,Z) และแกนอ้างอิงจะยึดติดอยู่ที่แกนเพลากังหันน้ำ ซึ่งวงล้อกังหันน้ำจะหมุนในแนวแกน Z และการไหลเข้าของลำนํ้าจะไหลในแนวแกน X และไหลออกในแกน X เช่นเดียวกัน ระบบพิกัดของการหมุนของวงล้อจะอยู่ในพิกัด (0,0,0)

ตารางที่ 1 ขอบเขตเงื่อนไขเบื้องต้น

ชนิดโดเมน	กำหนด
ทางเข้า	Pressure Inlet
ทางออก	Pressure Outlet
โวลูตน้ำ	Wall
วงล้อกังหันน้ำ	Rotating Wall



รูปที่ 7 ชนิดของเมชเอลิเมนต์ Tetrahedral ที่ใช้สำหรับการ

ขอบเขตที่ทางเข้า (inlet) โดยช่องทางน้ำเข้าของใบพัดกังหันน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า 76.20 มิลลิเมตร โดยพื้นที่หน้าตัดหัวฉีดมีพื้นที่ 0.003161 ตารางเมตร จำนวน 1 ช่องทางเข้า อัตราการไหล 0.0209 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยกำหนดให้มีค่าความดันรวม และการไหลแบบปั่นป่วน ตลอดจนค่าอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เงื่อนไขที่วงล้อกังหันน้ำ กำหนดให้เป็น (free spinning) เงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง (wall) ผนังด้านในของโวลูตน้ำทั้งหมดกำหนดให้มีความเร็วเป็นศูนย์ เงื่อนไขขอบเขตที่ทางออก (outlet) ช่องทางออกของน้ำมีขนาด 120 x 130 มิลลิเมตร โดยมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในส่วนของการรู้เข้าของคำตอบจะถูกกำหนดโดย 2 เงื่อนไข คือขั้นตอนของการคำนวณซ้ำ (iterations) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 1,000 รอบการคำนวณ และค่าความผิดพลาดที่เหลือ (residual value) ของตัวแปรตามทุกตัวมีค่าน้อยกว่า 0.0001 [8] ถ้าการคำนวณเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว จะถือว่าการคำนวณเชิงตัวเลขได้รู้เข้าหาคำตอบ

7. ผลการวิจัย

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขทางด้านพลศาสตร์ของไหลของน้ำผ่านวงล้อกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองชนิด ทั้งในส่วนแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ SST ผลที่เกิดจากการจำลองนั้นมีความแตกต่างกันพอสมควร เพราะแบบความปั่นป่วน $k-\epsilon$ จะให้ที่คลาดเคลื่อนมากกว่าแบบความ

ตารางที่ 2 ผลการจำลองเชิงตัวเลข

Turbulence Model	CFD		Prototype Test
	Mash 0.01 mm	Mash 0.02 mm	
$k-\varepsilon$	243 RPM	252 RPM	214RPM
$k-\omega$ SST	235 RPM	241 PPM	

ตารางที่ 3 แรงบิดที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข

Turbulence Model	CFD		Prototype Test
	Mash 0.01 mm	Mash 0.02 mm	
$k-\varepsilon$	10.12N.m	11.21 N.m	9.01 N.m
$k-\omega$ SST	10.11 N.m	11.24 N.m	

ปั่นป่วน $k-\omega$ SST เนื่องจากแบบจำลองความขุ่น $k-\varepsilon$ จะมีผลต่อการคำนวณที่หยาบกว่า และใช้เวลาในการคำนวณผลที่น้อยกว่า เพราะจะใช้สมการในการคำนวณผลเพียงแค่ 2 สมการเท่านั้น [1-3] แต่ส่วนแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\omega$ SST ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากการผสมผสานข้อดีของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ ชนิด Standard ซึ่งผลของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ สามารถครอบคลุมปัญหาที่บริเวณส่วนที่ใกล้ผนังได้ดีแต่จะไวต่อการกำหนดค่าที่ขอบของทางเข้า จึงแก้ปัญหาด้วยการใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่สามารถคำนวณการไหลด้านนอกได้ดี เพื่อป้องกันไม่ให้คำตอบจากการคำนวณไวต่อการกำหนดค่าที่ขอบ และมีเสถียรภาพในการคำนวณ ผลการผสมผสานแบบจำลองทั้งสองชนิด สามารถทำได้โดยใช้การ blending function (F_1) [8] จากรูปแบบการคำนวณผลเพื่อคำนวณหาค่าการหมุนทั้งสองแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ผลการจำลองเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ผลของการคำนวณหาค่าการหมุนที่เกิดขึ้นจริง โดยได้จำลองสถานะของการไหลของน้ำที่ไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ ซึ่งเป็นไปตามกรอบการคำนวณของปัญหาขอบเขต ผลจากสนามการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ดังรูปที่ 8 และ 9

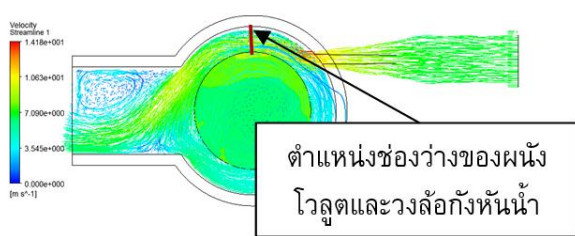
จากตารางที่ 3 แรงบิดที่ได้จากการคำนวณผลทางพลศาสตร์ของไหลพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST จะให้ค่าแรงบิดที่ใกล้เคียงผลการทดสอบจริงมาก

ที่สุด เพราะการสร้างเมชที่มีความละเอียดมากขึ้น จำนวนจุดต่อมากขึ้นผลต่างที่เกิดขึ้นจากตัวแปรอิสระ (DOF) จะสามารถแก้ปัญหาได้ผลลัพธ์ที่เข้าสู่คำตอบได้ดีมากกว่าจำนวนเมชที่หยาบ

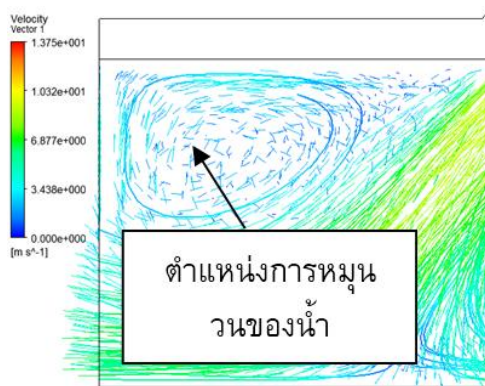
จากผลการจำลองทั้งสองแบบจำลองความปั่นป่วน ทำให้เห็นถึงรูปแบบและลักษณะของรูปแบบการไหลของน้ำก่อนเข้าและออกสู่สภาวะบรรยากาศของน้ำ [1] ตลอดจนโปรไฟล์การไหลของน้ำที่เกิดการหมุนวนเป็นวงกลม ตลอดจนการแยกตัวของแวกเตอร์การไหลภายในโวลูตน้ำ ผลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียภายในระบบการวิเคราะห์ ทำให้เกิดการต้านตัวของแวกเตอร์ของน้ำที่ไม่ได้ออกสู่บรรยากาศ

จากรูปที่ 10 และ 11 แสดงสนามการไหลและการหมุนวนของน้ำที่เกิดขึ้นของแบบจำลอง $k-\omega$ SST การหมุนวนที่เกิดขึ้นเป็นเพราะระยะห่างของวงล้อกับผนังของโวลูตน้ำที่มีระยะห่างกัน ทำให้ขณะที่วงล้อกั้นหมุน น้ำจึงถูกเหวี่ยงมาปะทะเป็นลักษณะของการตกกระทบกับพื้นผิวของผนังโวลูตด้านล่างประกอบกับปลายทางออกมีอากาศบางส่วนจากภายนอกเข้ามาแทนที่น้ำภายในโวลูตที่ไม่มีน้ำไหล ที่เกิดจากการเหวี่ยงจากการไหลจึงทำให้เกิดการไหลวนของน้ำที่ตกกระทบและกระดอนขึ้นด้านบนก่อนที่จะไหลออกสู่บรรยากาศ

ผลจากความเร็วที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองในรูปที่ 8 และ 9 คือผลแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และรูปที่ 10 และ 11 คือแบบจำลอง $k-\omega$ SST ผลที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากการพัฒนาแบบจำลอง $k-\omega$ SST ให้มีความสามารถในการวิเคราะห์รอบการหมุนและแก้ปัญหาในการหมุนวนได้ดีกว่า $k-\varepsilon$ ซึ่งการหมุนวนของน้ำเป็นผลโดยตรงที่ทำให้ประสิทธิภาพในการหมุนลดลง จากรูปที่ 12 ผลจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล สามารถอธิบายพฤติกรรมสนามการไหลของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 ได้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard $k-\varepsilon$ จะเข้าสู่ผลคำตอบได้เร็วกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST แต่ผลที่ได้ไม่ใกล้เคียงและไม่เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากได้ค่ารอบการหมุนที่ห่างจากการทดสอบจริง ส่วนแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST จะให้ผลคำตอบที่ใกล้เคียงมากกว่าแต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า



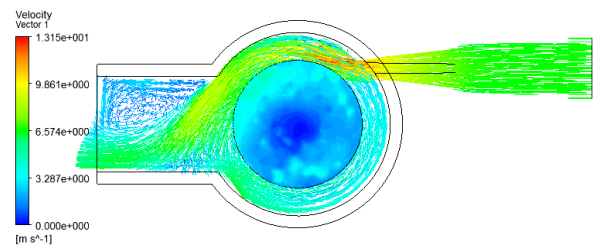
รูปที่ 8 ผลจากสนามการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง $k-\varepsilon$



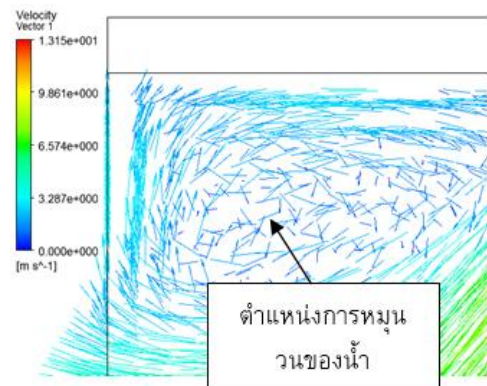
รูปที่ 9 แสดงผลการหมุนวนของน้ำในแบบจำลอง $k-\varepsilon$

8. การอภิปรายผล

การเกิด vortex ที่ทางออกนั้นเป็นผลจากการออกแบบรูปทรงโวลูตที่ยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปทำการสร้างจริง ในการออกแบบควรมีการลดช่องว่างที่ผนังบริเวณส่วนโค้งของตัวโครงสร้างโวลูตให้ลดลง ดังรูปที่ 7 และมีการปรับโครงสร้างที่ทางออกเล็กน้อยก็จะช่วยในการแก้ไขปัญหาในจุดนี้ได้ จากผลการจำลองการไหลเชิงตัวเลขพบว่า ในการเลือกใช้ชนิดของแบบจำลองความปั่นป่วนให้ถูกต้องกับรูปแบบปัญหาในการวิเคราะห์ต่าง ๆ จะทำให้ผลการจำลองปัญหานั้นมีความถูกต้องมากขึ้น และสอดคล้องกับต้นแบบที่ได้ทำการสร้างจริง งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองชนิดมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับกัน พบว่า แบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากแบบจำลองชนิด Standard $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ กลายเป็นแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega SST$ ให้ผลการทดสอบที่ได้ผลใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด เมื่อสอบเทียบผลกับต้นแบบดังตารางที่ 2 และ 3 แต่อาจจะใช้เวลาและทรัพยากรคอมพิวเตอร์มากขึ้น ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 2 จากการทดสอบจริงจากต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น ได้รอบการหมุน

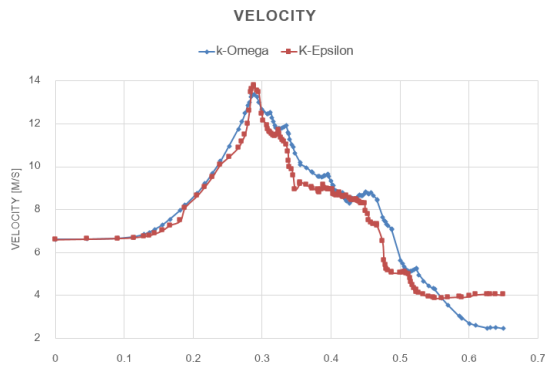


รูปที่ 10 ผลจากสนามการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง $k-\omega SST$



รูปที่ 11 ผลการหมุนวนของน้ำในโวลูตน้ำ ($k-\omega SST$)

สูงสุด 214 รอบต่อนาที และผลที่ได้จากการวิเคราะห์รอบการหมุนโดยอาศัยแบบจำลองชนิด standard $k-\varepsilon$ ได้รอบการหมุนสูงสุด ที่ขนาดของเอลิเมนต์มีความละเอียดมากที่สุด ได้รอบการหมุนสูงสุด 243 รอบต่อนาที ส่วนแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega SST$ ได้รอบการหมุนสูงสุด 235 รอบต่อนาที เมื่อนำผลที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega SST$ ซึ่งให้ผลคำตอบใกล้เคียงกับต้นแบบจริงมากที่สุดมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลจากการคำนวณจะแตกต่างกันอยู่ร้อยละ 8.9 ความคลาดเคลื่อน จากผลการศึกษาสามารถพิจารณาสมรรถนะของระบบการทำงานจากแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงและจากการจำลองผลเชิงตัวเลขในตารางที่ 3 ผลที่ได้ก็มีความแตกต่างกันระหว่างแบบจำลองทั้งสอง ซึ่งผลของพฤติกรรมการรู้เข้าของคำตอบ ที่ได้จากแบบจำลองทั้งสอง ทำให้ง่ายต่อการอธิบายรูปแบบการไหล ตลอดจนพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำที่เกิดขึ้นจากรอบของการหมุน และเวกเตอร์ของการหมุนวน ทำให้ปัญหาที่ซับซ้อน และยากต่อการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น มีการ



รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วภายในโวลูตน้ำของกรวยวิเคราะห์ทั้งสองแบบจำลอง

แก้ปัญหาได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ทำให้ผลการทดสอบลู่เข้าความเป็นจริง ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการวิจัยลง

9. สรุปผล

การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลถือเป็นเครื่องมือและเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกพัฒนามาช่วยในการออกแบบระบบการทำงานของเครื่องจักรกลของไหลได้เป็นอย่างดีในปัจจุบัน รูปทรงของวงล้อกังหันน้ำจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพของการไหลจริง ซึ่งแบบจำลองวงล้อกังหันน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีมุมใบกังหันน้ำ 25 องศา ความแม่นยำในการคำนวณผลจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้แบบจำลองที่มีพฤติกรรม การไหลเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนจึงมีบทบาทสำคัญที่จะทำให้ผลการจำลองเชิงตัวเลขมีค่าที่ใกล้เคียงจริง ผลจากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด standard $k-\epsilon$ และแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST มาทำการศึกษาและเปรียบเทียบกัน นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงจำนวนเมชที่จะใช้ในการวิเคราะห์ยิ่งคุณภาพและรายละเอียดการจัดเรียงเมชที่ดี ผลที่ได้ก็จะแม่นยำตามไปด้วย และจะส่งผลให้การเลือกใช้แบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด standard $k-\epsilon$ จะลู่เข้าผลคำตอบได้เร็วกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST แต่ผลที่ได้ไม่ใกล้เคียงความเป็นจริงและไม่เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากได้ค่ารอบการหมุน 243 RPM ที่เมชเอเลเมนต์ 0.01 mm. และได้แรงบิดอยู่ที่ 10.12 N.m ซึ่งห่างจากการทดสอบจริง ส่วนแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST จะให้ผลคำตอบที่ใกล้เคียงมากกว่า โดยได้รอบการหมุนสูงสุด 235 RPM ที่เมชเอเลเมนต์ 0.01 mm.

และได้แรงบิดอยู่ที่ 10.11 N.m แต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น และในส่วนขององศาเกิด vertex ที่ทางออกจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้ในส่วนของการสร้างโวลูตให้ระยะห่างระหว่างขอบผนังและชุดวงล้อมีระยะที่เหมาะสมมากขึ้นเพื่อให้การทำงานจริงมีประสิทธิภาพและเหมาะต่อการนำไปใช้งานจริงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเครือข่ายวิจัยภาคเหนือตอนล่างที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้พื้นที่และทรัพยากรต่าง ๆ งานวิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล. การประยุกต์ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน K-epsilon และ K-Omega สำหรับการวิเคราะห์รอบการหมุนของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบแกนตั้ง. ใน: *การประชุมวิชาการด้านงานวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ, 8-9 กันยายน 2554. กรุงเทพฯ; 2554. หน้า 345-562.*
- [2] Barrat JL, Bocquet L. Large Slip Effect at Nonwetting Fluid-Solid Interface. *Physical Review Letters*. 1999; 82: 4671-4674.
- [3] Lahamornchaiyakul W. Mechanical Design System of Vertical Axis Micro Water Turbine Generator Using Computational Fluid Dynamic (CFD). In: *The 25nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thai*; 2011. p. 1000-1008.
- [4] Abdullah B. Design of High Efficiency Cross-Flow Turbine for Hydro-Power Plant. *International Journal of Engineering and Advance*. 2004: 308-311.
- [5] Pereira HNC, Borges JE. Study of the Nozzle Flow in Cross-Flow Turbine. *International Journal of Mechanical Science*. 2009; 38(3): 283-302.
- [6] Tangjitsitchareon S. *Rapid Prototyping*. Bangkok: Chulalongkorn University; 2004.
- [7] Tragoonsubtavee S, Wangchai S. *SolidWorks and Cosmos Work*. Bangkok: SST; 2007.

- [8] Durgin WW, Fay WK. Some Fluid Flow Characteristic of cross-flow type turbine. In: *The Winter Annual Meeting of ASME, New Orleans*; 2007. p. 77–83.
- [9] Lahamornchaiyakul W. Design and Analysis of Two-Wheel Horizontal Axis Micro Water Turbine Generator Using Computational Fluid Dynamics Technique. *Engineering Journal Chiangmai University*. 2016: 20–29.
- [10] Lahamornchaiyakul W. Performance Testing of Vertical Axis Micro Water Turbine Generator for Driven of Available Storage Water on Building. *Engineering Journal Chiangmai University*. 2015: 9–17.
- [11] Lahamornchaiyakul W. Efficiency Evaluation and Test system of the Horizotal and Vertical Axis Micro Water Turbine Generator in a Community. In: *The 2nd MJU-Phrae National Research Conf*; 2011. p. 80–87.