



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การจำลองผลเชิงตัวเลขของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยแบบจำลอง K-epsilon และแบบจำลอง K-Omega

Numerical simulation of small water turbine generator using k-epsilon and k-omega model

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล^{1*} กัณตภณ โล่ณพันธ์²

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

² สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Werayoot Lahamornchaiyakul^{1*} Kantaphon Lonphan²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok Campus Phitsanulok 65000

² Department of Electrical Technology, Faculty of Industrial technology, Piboonsongkram Rajabhat University 65000

* Corresponding author.

E-mail: werayootrmutl@gmail.com; Telephone: 0-5529-8438

บทคัดย่อ

กังหันน้ำเป็นเครื่องจักรกลการไหลที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปของพลังงานจลน์ของน้ำให้กลายเป็นพลังงานกลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ในวัตถุประสงค์งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการไหลของน้ำภายในวงล้อกังหันน้ำ ด้วยกระบวนการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยอาศัยรูปแบบการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method, FVM) ซึ่งเป็นการคำนวณจากปริมาตรควบคุม ที่คำนวณผ่านปริมาตรควบคุมหรือเมชเอลิเมนต์บนฐานแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ เพื่อทำนายการไหลบริเวณที่ศึกษา ซึ่งการคำนวณแบบนี้เอลิเมนต์เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณผล ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาผลเอลิเมนต์สำหรับการคำนวณหาค่ารอบการหมุนแบบ Free Spinning เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงจากต้นแบบ ผลจากการศึกษาพบว่า การคำนวณผลด้วย (CFD) ที่ประสิทธิภาพเอลิเมนต์ 80 % ให้ความเร็วรอบการหมุนสูงสุดที่ความเร็วน้ำ 7 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 212 และ 213 รอบต่อนาที สำหรับแบบจำลอง $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ ตามลำดับ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไปจากการทดสอบจริง 0.46 %

คำสำคัญ

กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก พลศาสตร์ของไหลของไหลเชิงคำนวณ การคำนวณด้วยเทคนิค Free spinning

Abstract

This water turbine is the fluid machinery that changes kinetic energy of water into mechanical energy for electricity generation. The objectives of this research are to study flow of water inside water turbine wheel using computational fluid dynamics employing Finite Volume Method. Finite Volume Method was used to calculate velocities in the water turbine base on k-epsilon ($k-\epsilon$) and k-omega ($k-\omega$) model. Number of elements is an important variable affecting calculation accuracy. Then, the accuracy of element was studied and comparison was made with results from experiment and free spinning simulation. The calculation result of CFD show that the elements efficiency of 80 % results in the maximum rotation speeds of a 212-213 RPM at 7 m/s, calculated by k-epsilon ($k-\epsilon$) and k-omega ($k-\omega$) model, which shows percent error of 0.46 % as compared to the actual testing.

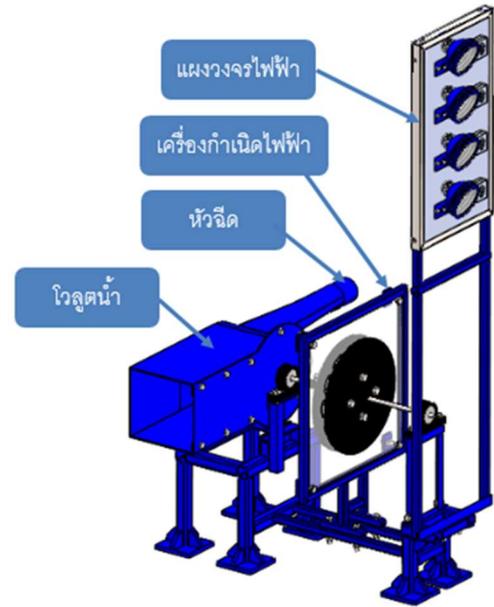
Keywords

small water turbine generator; computational fluid dynamics; free spinning simulation technique

1. บทนำ

ภายใต้วิกฤติทางด้านพลังงานที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้ราคาสินค้าที่ใช้ในปัจจุบันมีราคาที่แพงขึ้น จนกลายเป็นปัญหาหลักในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้พลังงานทดแทนจึงเป็นทางออกของพลังงานที่สำคัญของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานน้ำขนาดเล็ก ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงและมีต้นทุนต่ำ [1] น้ำเป็นสิ่งที่อยู่ในธรรมชาติไม่มีวันหมด เพราะน้ำมีวัฏจักรที่หมุนวนไปเรื่อย ๆ ไม่มีที่สิ้นสุด และน้ำยังเป็นสิ่งที่มีความสำคัญของมนุษย์อย่างมากทั้งในการอุปโภค บริโภค เมื่อมนุษย์มีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าขึ้น มนุษย์ได้นำคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำ เช่น แรงแดันน้ำ การไหล คลื่น เป็นต้น [2] ใช้เป็นพลังงานขั้นต้นเพื่อใช้เปลี่ยนเป็นพลังงานอื่น ๆ ที่ต้องการ พลังงานที่ได้นั้นเรียกว่า พลังงานน้ำ ในการดึงพลังงานน้ำเพื่อประโยชน์นั้นมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็จำเป็นต้องใช้เครื่องมือเพื่อทำการเปลี่ยนรูปพลังงานน้ำมาใช้ประโยชน์ เครื่องมือที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดก็คือกังหันน้ำ โดยกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า เป็นเครื่องจักรกลการไหลที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในน้ำไหลให้กลายเป็นพลังงานกลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า หลักการขั้นต้นของกังหันน้ำคือการใช้พลังงานน้ำช่วยในการหมุนของกังหัน และการหมุนที่ได้จะนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น การหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบการทำงานของกังหันน้ำ โดยเน้นไปที่การออกแบบรอบการหมุนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ระบบการออกแบบ จะใช้กระบวนการทางพลศาสตร์ของไหล ในโมดูลแบบ free spinning ซึ่งเป็นโมดูลหนึ่งที่สามารถนำมาช่วยในการวิเคราะห์รอบการหมุนและจำลองสนามการไหลของน้ำผ่านวงล้อกังหันน้ำขนาดเล็ก องค์ประกอบการวิเคราะห์จะทำการปรับขนาดของเมชเอลิเมนต์โดยในพื้นที่ทำการศึกษาให้มีความละเอียดมากที่สุด เพื่อผลการรู้เข้าของคำตอบที่ถูกต้องเพื่อใช้สำหรับเทียบผลจากการทดลองจริง กังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบในงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ต้นแบบจำลองกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า

2. ทฤษฎีพื้นฐานทางพลศาสตร์ของไหล**2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทางกลศาสตร์ของไหล [4,5,6]**

การคำนวณหาความเร็วลำน้ำ สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ของความสูงของหัวน้ำเป็นเมตร (m) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$V = \sqrt{2gH} \quad (1)$$

โดยที่ V = ความเร็วลำน้ำ (m/s)
 g = ความเร่ง (m/s²)
 H = ความสูงของหัวน้ำ (m)

การคำนวณหาความเร็วรอบการหมุนที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเริ่มต้นและรัศมีวงล้อที่ทำการหมุน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2 [5,6]

$$RPM = \frac{\omega \times 60}{2\pi} \quad (2)$$

เมื่อ $\omega = \frac{V}{R}$
 โดยที่ ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
 V = ความเร็วลำน้ำ (m/s)
 R = รัศมีวงล้อกังหันน้ำ (m)

ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบและวัดอัตราการหมุนของกังหันน้ำจากต้นแบบจริง ดังรูปที่ 2 โดยอาศัยเครื่องมือวัดรอบการหมุน Tachometer เพื่อนำผลที่ได้จากต้นแบบจริงมาทำการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 2 การจำลองการทดสอบกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า

ตัวแปรที่สำคัญสำหรับพลังงานน้ำ [7] ก็คือ ความสูงของหัวน้ำ (H) และอัตราการไหล Volume flow rate (Q) โดยสามารถให้พลังงานออกมาได้ดังสมการที่ (3)

$$P = \eta \rho g Q H \quad (3)$$

เมื่อ P	คือ กำลังงานกลที่กังหันน้ำผลิตได้ (watt)
η	คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ (%)
ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
g	คือ ความเร่ง (m/s^2)
Q	คือ อัตราการไหล (m^3/s)
H	คือ ค่าความสูงของหัวน้ำ (m)

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

สมการความต่อเนื่อง [5,6]

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial y_i} = 0 \quad (4)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho u_i v_j)}{\partial y_j} \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[\frac{\partial}{\partial x_i} u \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_j} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial y_j} \right] \right] \end{aligned} \quad (5)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน y

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u v_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial y_j} = \\ & \frac{\partial p}{\partial y_i} + \left[\frac{\partial}{\partial x_i} u \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_j} \mu \left[\frac{\partial v_i}{\partial y_j} \right] \right] + (\rho - \rho_0)g \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่ u, v เป็นตัวแปรที่ใช้แทนค่าความเร็วในแนวแกน x, y การไหลของสนามการไหลในระบบพิกัด 2 มิติของสมการโมเมนตัม ส่วนตัวแปร i, j เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงการเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบของเทนเซอร์ (Tensor) ส่วนตัวแปร μ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute or Dynamics Viscosity Coefficient)

สมการพลังงาน

$$\begin{aligned} & \rho c_p \left[\frac{\partial(u_i T_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial(v_i T_j)}{\partial y_j} \right] \\ & = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_i} \left[k \frac{\partial T_j}{\partial y_i} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

ค่าความเค้นเฉื่อยเนื่องจากความหนืด, \bar{t}_{ij} จะประมาณเป็น

$$\bar{t}_{ij} \cong \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

โดย μ คือ Laminar viscosity ส่วนค่าความเค้นเฉื่อยของ Reynolds Stress, \bar{t}_{ij} จะเขียนอยู่ในรูป

$$\bar{t}_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (9)$$

ค่า \bar{t}_{ij} ซึ่งยังไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องอาศัยแบบจำลอง $k - \varepsilon$ Model ในการหาค่า \bar{t}_{ij}

ใน $k - \varepsilon$ Model เทอมของ Reynolds Stress, จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ Mean Stress Rate โดย Eddy Viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ Turbulent Kinetic Energy, (k) และ Dissipation Rate (ε) โดยใช้ Bossiness's approximation (5, 6) คือ

$$t_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k) + u_i \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (10)$$

โดยที่ $u_i = \rho c_u k^2 / \varepsilon$ คือ Turbulent Eddy Viscosity

สมการของ Turbulent Kinetic Energy (TKE) (k) จะอยู่ในรูปสมการที่ (3,4)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (11)$$

สมการของ Dissipation Rate ของ Turbulent Kinetic Energy (3, 4) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (12)$$

ซึ่ง G แทน Generation Rate of Turbulent Kinetic Energy ขณะที่ $\rho \varepsilon$ เป็น Dissipation Rate โดย G จะเป็น

$$G = u_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (13)$$

ค่าขอบเขตสำหรับค่าต่างๆของ Turbulent ที่ใกล้เคียงสามารถหาค่าได้จาก Wall Function โดยมีค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับค่าสมการต่างๆที่ผ่านมามีดังนี้คือ

$\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $c_{\varepsilon 1} = 1.44$, $c_{\varepsilon 2} = 1.92$, และ $c_u = 0.09$ เป็นค่าคงที่ [5,6,7,8] โดยที่ $u_e = u_i + u$

แบบจำลอง Reynolds Stress Model (RMS) [7,8,9] Reynolds-Averaged Transport Equation สำหรับการแก้ปัญหา ซึ่ง \bar{t}_{ij} (8, 9) แล้วสามารถจัดรูปสมการต่างๆได้ใหม่เป็น

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial (u_k \tau_{ij})}{\partial x_k} = -G_{ij} - \phi_{ij} + D_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (14)$$

$$G_{ij} = \rho P_{ij} = - \left[\overline{\rho u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \rho u'_j u'_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right]$$

$$\phi_{ij} = \rho P_{ij} = -c_1 \frac{\rho \varepsilon}{k} \left[u'_i u'_j - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] - c_2 \left[G_{ij} - \frac{2}{3} G \delta_{ij} \right]$$

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\frac{u_e}{\sigma_T} \right) \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_k} \right] \dots = \varepsilon_{ij} = - \left[\frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \right]$$

2.3 หลักการวิเคราะห์ Free Spinning

2.3.1 หลักการของ Free Spinning

รูปแบบการวิเคราะห์แบบ Free spinning เป็นโมดูลการวิเคราะห์ที่ถูกพัฒนามาใช้งานกับการออกแบบเครื่องจักรกลของไหลในปัจจุบัน โดยมีหลักการที่ว่า ขณะทำการวิเคราะห์หัววงล้อจะไม่มีค่าความเร็วเริ่มต้นในการหมุน และจะเริ่มต้นทำการหมุนก็ต่อเมื่อมีไหลตภายนอกวิ่งมากระทำ ซึ่งวงล้อจะต้องถูกกำหนดด้วยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทางกล ดังสมการที่ 15 [10]

$$I = m r^2 \quad (15)$$

โดยที่ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (kg.m^2)

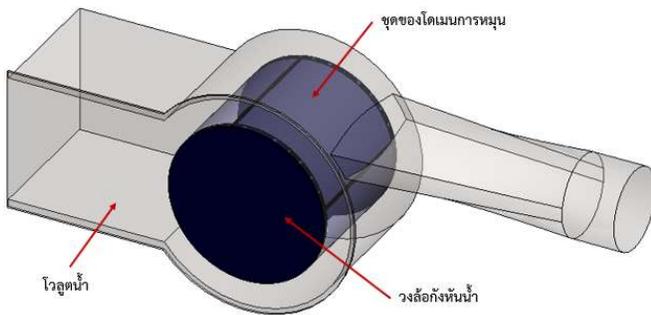
m คือ มวลของวัตถุที่หมุน (kg)

r คือ รัศมีวงล้อที่หมุน (m)

ค่าความเร็วสูงสุดและมีค่าคงที่ ที่วงล้อสามารถหมุนได้ จากแรงกระทำจากของไหลภายนอกถึงมากระทำ ก็ต่อเมื่อ แรงบิดของระบบเป็นศูนย์ [12,13]

2.3.2 หลักการวิเคราะห์การหมุน (MRF)

รูปแบบการหมุน Multiple reference frame (MRF) เป็นรูปแบบการวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคการอ้างอิงสัมพัทธ์ ภายในกรอบการหมุนของรูปทรงเรขาคณิตในแบบจำลองการวิเคราะห์ กล่าวคือ จะมีการสร้างวงกลมเพื่อครอบชิ้นงานที่จะ กำหนดการหมุน ซึ่งจะอธิบายได้จากรูปที่ 3



รูปที่ 3 เทคนิคการกำหนดการหมุนแบบ (MRF)

การวิเคราะห์การหมุนในเฟรมอ้างอิงการหมุนในระบบการวิเคราะห์จะต้องทำการกำหนดค่าความเร็วเพิ่มเติม ดังสมการที่ 16 ถึง 18

$$a_t = \vec{r} \times \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} \quad (16)$$

$$a_{centripetal} = \vec{\Omega} \times (\vec{r} \times \vec{\Omega}) \quad (17)$$

$$a_{coreolis} = 2(\vec{W} \times \vec{\Omega}) \quad (18)$$

เมื่อ	a_t	คือ ความเร่งสัมผัส
	$a_{centripetal}$	คือ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง
	$a_{coreolis}$	คือ ความเร่งเสมือน

การพิจารณาค่าความเร็วในกรอบอ้างอิงกับชิ้นงานที่ กำหนดการหมุนสามารถทำการอธิบายด้วยสมการที่ 19

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{\Omega} + \vec{r} \quad (19)$$

ซึ่งเงื่อนไขของความเร็ว ความเร่ง และโมเมนตัมของการ หมุนจะถูกนำมาใช้ในบริเวณพื้นที่การหมุนของสนามการไหลที่ ทำการวิเคราะห์ในแต่ละช่วงเวลา โดยพื้นที่หรือชิ้นงานที่ กำหนดการหมุน ตลอดจนขอบเขตการไหลที่ครอบพื้นที่การ หมุน จะทำการพิจารณาไปยังตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ไป ประมาณ 2 ถึง 3 องศา ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมได้ดัง สมการที่ 20 [12, 13]

$$\Delta \theta = 6\Delta(RPM) \quad (20)$$

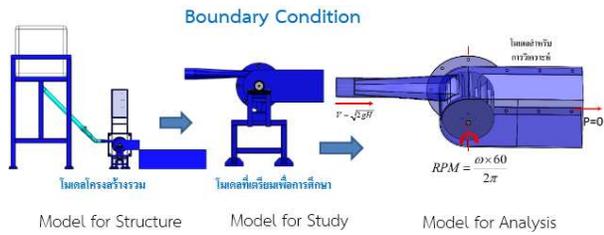
จากสมการที่ 19 จะมีการกำหนดให้รูปแบบการหมุนมี หน่วยเป็นรอบต่อนาที (RPM) เพื่อกำหนดให้เมชเอลิเมนต์ ให้ เกิดการหมุนในตำแหน่งต่าง ๆ โดยปริมาณสเกลาร์ทั้งหมดจะ ถูกจับคู่จากด้านที่หมุนไปยังด้านที่ไม่มีหมุนที่ถูกเชื่อมต่อกับ เมชเอลิเมนต์ที่มีการเคลื่อนที่ เมื่อไม่สามารถหาค่าหรือไม่ทราบค่าความเร็วในการหมุน ดังนั้นกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมจะใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมค่าความเร็วเชิงมุมใน ช่วงเวลาใด ๆ และสามารถอธิบายด้วยรูปแบบสมการที่ 21

$$I \frac{d\Omega}{dt} = T_{hyd} + T_{applied} \quad (21)$$

จากรูปแบบสมการที่ 20 เป็นสมการแรงบิดไฮดรอลิกส์ (T_{hyd}) และแรงบิดใช้งาน ($T_{applied}$) โดยระบบจะทำให้วัตถุที่ หมุนเกิดการหมุนที่ช้าลงเนื่องจากค่าความเร็ว และส่งผลให้เกิด การหมุนแบบฟรีที่ไม่มีภาระไหลหรือแรงบิดจากภายนอกมา กระทำ ซึ่งค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Inertia) จะถูกกำหนดโดยตัว แปรสัญลักษณ์ [12,13]

2.4 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล CFD

การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล จะอาศัยโมเดล ต้นแบบที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่ง โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะใช้เฉพาะส่วนที่สำคัญเพื่อลด เวลาในการสร้างเอลิเมนต์และลดเวลาในการคำนวณ ดังรูป ที่ 4

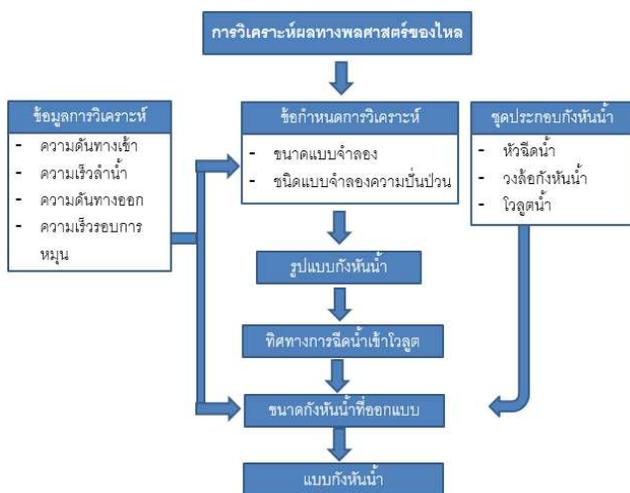


รูปที่ 4 โครงสร้าง Computational Fluid Dynamics [3]

จากรูปที่ 4 ผู้วิจัยได้ทำการจัดเตรียมโครงสร้างสำหรับวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งจะประกอบไปด้วยโครงสร้างหลัก ที่ได้ทำการออกแบบและเตรียมโมเดลให้พร้อมสำหรับการวิเคราะห์ โดยทำการลดรูปโครงสร้างให้เหลือแต่ชิ้นส่วนที่สำคัญ ตลอดจนคำนวณหาตัวแปรจากสมการที่จำเป็นเพื่อใช้สำหรับการป้อนลงสู่โปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหล

2.5 ระเบียบและกรอบวิธีการวิจัยเบื้องต้น

การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า พิจารณาข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ทั้งจากเอกสารตำราทางวิชาการและข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปเป็นกระบวนการออกแบบและวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยได้ดังนี้

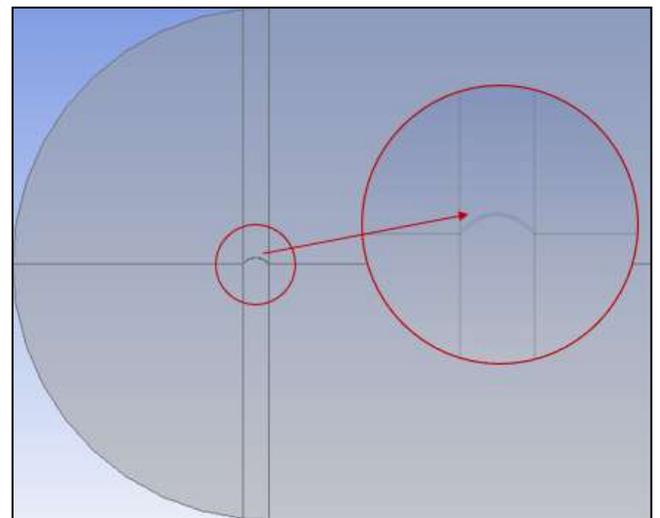


รูปที่ 5 กระบวนการออกแบบและวิเคราะห์กังหันน้ำ

3. ขั้นตอนงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบตามขั้นตอนการดำเนินการวิจัยที่แสดงดังรูปที่ 5 โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นจากงานวิจัยในปัจจุบัน
- ทำการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ที่จะทำการวิเคราะห์และจะทำการป้อนค่าตัวแปรวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณทั้งหมด 5 การทดสอบ คือที่มุม 0, 5, 10, 15 และ 20 องศาสำหรับวิเคราะห์หามุมใบพัดที่เหมาะสมในการติดตั้งตำแหน่งองศาในการวางใบพัด ขั้นตอนการออกแบบเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองอุโมงค์น้ำดังรูปที่ 6 และทำการคำนวณตัวแปรความเร็วในทิศทางแกน x และ y ดังตารางที่ 1
- คำนวณขนาดความเร็วลำนํ้าที่ทางเข้าหัวฉีดน้ำ
- คำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยทางกลด้วยสมการที่ 15
- นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับในแต่ละแบบจำลอง
- ทำการแก้ไขกังหันน้ำตามผลการทดลองจากแบบจำลองที่คำนวณได้
- วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 6 แบบจำลองของมุมใบพัดที่ใช้ในการวิเคราะห์หามุมองศาที่เหมาะสม

3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิจัยทั้งหมด 3 กรณีศึกษา คือกรณีศึกษาในส่วนที่หนึ่ง จะทำการศึกษาเรื่องมุมปะทะของ

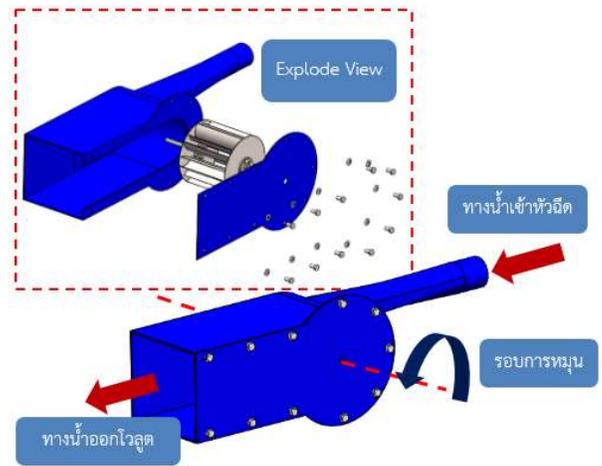
ความเร็วลำน้ำในการออกแบบเพื่อหาโมเมนต์ที่สามารถสร้างแรงยกตัว (Lift force) และมีแรงต้านการไหลที่น้อยที่สุด (Drag force) ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะทำการสร้างโมเดลตามรูปที่ 6 และจะทำการ คำนวณหาตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่าแรงยกและแรงต้าน ซึ่งตัวแปรที่คำนวณจะได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางการคำนวณค่าความเร็ว

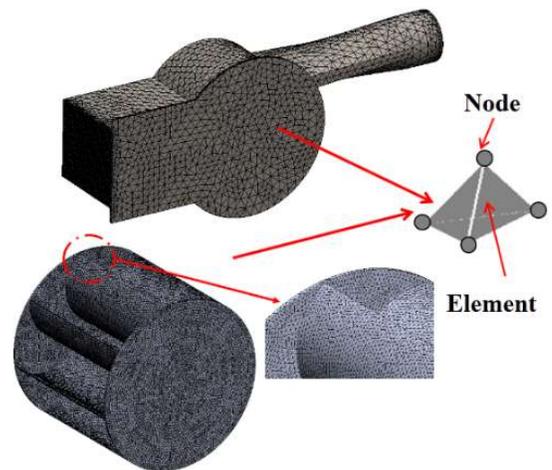
มุม (องศา)	Vx (m/s)	Vy (m/s)
0	7	0
5	6.97	0.61
10	6.89	1.21
15	6.76	1.81
20	6.57	2.39

กรณีศึกษาในส่วนที่สอง จะนำผลของมุมปะทะมาทำการสร้างวงล้อกังหันทั้ง 3 แบบจำลอง คือ วงล้อที่ติดตั้งใบพัด 4, 5 และ 6 ใบพัด พร้อมทำการวิเคราะห์เพื่อหาการหมุนสูงสุดด้วยโมดูลฟังก์ชัน Free spinning โดยอาศัยการปรับขนาดของเมชเอลิเมนต์ดังรูปที่ 8 เพื่อทดสอบผลการรูดูเข้าของคำตอบเทียบกับการทดสอบจริง กระบวนการวิจัยในส่วนที่สองเริ่มต้นจากการเขียนแบบชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยโปรแกรม CAD ในส่วนของ Solid Module โดยทำการสร้างโวลูตน้ำจำลอง [3] พร้อมรูปแบบวงล้อกังหันน้ำทั้ง 3 แบบ หลังจากนั้นจึงทำการออกแบบหัวฉีดน้ำที่มีขนาดกว้าง 109 มิลลิเมตร ยาว 29 มิลลิเมตร และมีความยาวท่อที่ต่อจากหัวฉีด 367 มิลลิเมตร, ขนาดของโวลูตน้ำ ขนาดกว้าง 186 มิลลิเมตร สูง 176 มิลลิเมตร ยาว 438 มิลลิเมตร และวงล้อกังหันน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร กว้าง 142 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

กรณีศึกษาในส่วนที่สาม เป็นส่วนสุดท้ายในงานวิจัยที่ผู้วิจัยจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาการหมุนที่เหมาะสมในแต่ละช่วงน้ำหนักของวงล้อที่ได้จากการวิเคราะห์ผลในส่วนของการ Free Spinning มาทำการป้อนค่าเพื่อใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณหาแรงบิดใช้งานต่อไป



รูปที่ 7 แบบจำลอง 3D ของกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 8 ชนิดของเมชเอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในกังหันน้ำ [3]

3.2 การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์

การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ สามารถแจกแจงรายละเอียดการตั้งค่าในการจำลองเชิงตัวเลขทั้ง 3 กรณีศึกษาได้ดังนี้

3.2.1 การศึกษาเรื่องมุมปะทะของความเร็วลำน้ำ

จากรูปที่ 6 ผู้วิจัยจะทำการกำหนดความเร็วในแกนต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 และจะกำหนดความดันที่ทางออกเท่ากับศูนย์ บริเวณผิวของใบกังหันน้ำกำหนดให้ไม่มีการลื่นไถล (No slip) แบบจำลองความปั่นป่วน เลือกใช้เป็นแบบ k-epsilon เพื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน k-omega

3.2.2 การจำลองการอบการหมุน

ทำการออกแบบรูปทรงวงล้อตามมุมมองศาการวางใบพัด กังหันน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากผลการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาที่หนึ่ง กรณีศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบวงล้อที่มีการวางใบพัดที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ 4, 5 และ 6 ใบพัดหลังจากนั้นทำการคำนวณหาหน้าหนักของวงล้อทั้ง 3 แบบ เพื่อนำตัวแปรมวลมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงกลเพื่อป้อนสำหรับคำนวณการอบการหมุน ซึ่งการตั้งค่าการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการกำหนดลักษณะของปัญหาสำหรับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล โดยการกำหนดคุณลักษณะทางกายภาพและสมมุติฐาน [11] ที่ใช้ในงานวิจัยโดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขอบเขตเงื่อนไขเบื้องต้น

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

ขั้นตอนการจำลองผลเชิงตัวเลขจะประกอบไปด้วยวิธีการทำดังต่อไปนี้

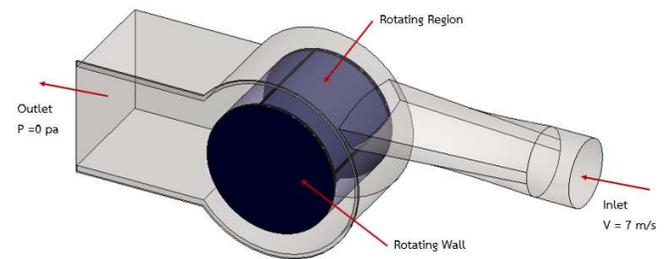
1. กำหนดให้หน้าไม่มีการเคลื่อนตัวที่ผนังของโวลูตน้ำ (No-Slip Wall)
2. กำหนดให้วงล้อกังหันน้ำเป็น Rotating Region
3. พิจารณาน้ำให้เป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้
4. กำหนดให้การไหลของน้ำในโวลูตน้ำเป็นแบบปั่นป่วน

ในการจำลองในงานวิจัย จะเลือกใช้ระบบพิกัดฉากแบบ 3 มิติ (X,Y,Z) และแกนอ้างอิงจะยึดติดอยู่ที่แกนเพลากังหันน้ำ ซึ่งวงล้อกังหันน้ำจะหมุนในแนวแกน Z และการไหลเข้าของน้ำจะไหลในแนวแกน X และไหลออกในแกน X เช่นเดียวกันระบบกึ่งกลางของการทำงานจะอยู่ในพิกัด (0,0,0) เงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหล สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 และมีรายละเอียดดังนี้

- เงื่อนไขที่ทางเข้า (Inlet) ช่องทางน้ำเข้าของใบพัดกังหันน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัดหัวฉีด 0.003161 ตารางเมตร (หรือขนาดความกว้าง x สูง) เท่ากับ 109 มิลลิเมตร สูง 29 มิลลิเมตร จำนวน 1 ช่องทางเข้า โดย

กำหนดให้มีค่าความดันเริ่มต้นการคำนวณ 101325 Pa และมีการไหลแบบปั่นป่วน ตลอดจนค่าอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

- เงื่อนไขที่วงล้อกังหันน้ำ กำหนดให้เป็น (Free Spinning)
- เงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง (Wall) ผนังด้านในของโวลูตน้ำทั้งหมดกำหนดให้มีความเร็วเป็นศูนย์
- เงื่อนไขขอบเขตที่ทางออก (Outlet) ช่องทางออกของน้ำมีขนาด 186 x 176 x 436 มิลลิเมตร โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส โดยรูปที่ 9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเบื้องต้น



รูปที่ 9 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition)

นอกจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแล้วยังมีการกำหนดเงื่อนไขอื่น ๆ อีก ภายในโปรแกรมคือ การกำหนดแบบจำลองความปั่นป่วนเป็นแบบ $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ Model โดยการไหลของน้ำเป็นการไหลในสภาวะที่ไม่คงตัว, ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [7] เป็นต้น ในส่วนของการเข้าสู่ของคำตอบจะถูกกำหนดโดย 2 เงื่อนไข คือ ขั้นตอนของการคำนวณซ้ำ (Iterations) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 1,000 รอบการคำนวณ และค่าความผิดพลาดที่เหลือ (Residual Value) ของตัวแปรตามทุกตัวมีค่าน้อยกว่า 0.0001 ถ้าการคำนวณเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว จะถือว่าการคำนวณเชิงตัวเลขได้ลู่เข้าหาคำตอบ

3.2.3 การจำลองการคำนวณหาแรงบิด (Torque)

เป็นขั้นตอนการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหลโดยนำความเร็วรอบการหมุนที่คำนวณหาได้จากโมดูล Free spinning มาทำการจำลองหาแรงบิดหลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหากำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานรายการสรุปในส่วนการตั้งค่าเริ่มต้นการคำนวณผลแต่ละกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 สรุปลักษณะขอบเขตในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหล สำหรับการวิเคราะห์

Turbulent Model	$k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ Model
Material Type	Fluid (Water liquid)
Fluid Density	1,000 kg/m ³
Viscosity	0.001003 kg/m-s
Operating Condition	101325 Pa
Boundary Condition	Total Pressure inlet 223,702 Pa
	Static Pressure Outlet = 0 Pa
	Wall, No Slip (โวลูตน้ำ ทางออก)
	Rotation Free Spinning

ตารางที่ 4 แสดงการกำหนดค่าสมการเพื่อแก้ปัญหาใน โปรแกรม

Solution Mode	Transient
Pressure	Standard
Residual	10 ⁻⁵
Time Step Size (s)	0.001
Stop Time	-1
Inner Iteration	1
Iteration	1,000

การจำลองการไหลของสนามการไหลภายในโวลูตน้ำด้วย รอบการคำนวณ 1,000 รอบ (Iteration) และกำหนด Time Step Size เป็น 0.001 วินาที ตัวแปรดังกล่าวจะถูกนำมาทำการหาประสิทธิภาพของกังหันน้ำ เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าการหมุนสูงสุด

4. การทดลองและการวิเคราะห์ผล

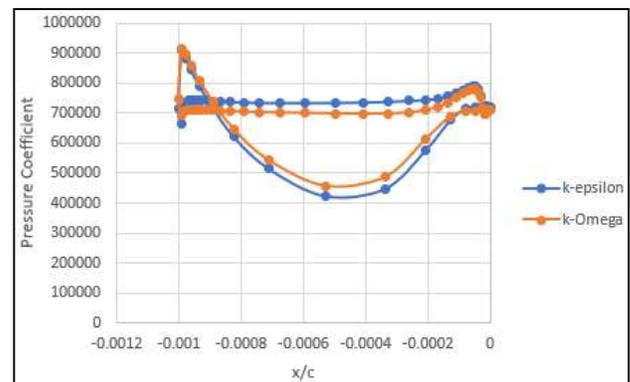
4.1 กรณีการศึกษาเพื่อคำนวณหามุมปะทะ

ในส่วนการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างโมเดล 2 มิติ ดังรูปที่ 6 เพื่อทำการจำลองสนามการไหลของน้ำที่ไหลผ่านใบพัดกังหันน้ำที่มีขนาดความยาวใบพัด 80 มิลลิเมตร ด้วยหลักการทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อหามุมปะทะที่เหมาะสมที่สามารถสร้างแรงยกตัวในการคำนวณหามุมที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์ที่ได้ทำการศึกษาแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\varepsilon$ และชนิด $k-\omega$ ในส่วนการทดลองนี้ได้ทำการแบ่งการวิเคราะห์ในมุมมองต่าง ๆ คือ 0, 5, 10, 15 และ 20 องศา ผลจากการจำลองพบว่าที่มุม 10 องศาจะได้ค่าแรงยก (Lift force) มากที่สุดและได้ค่าแรงต้าน (Drag force) น้อยที่สุด และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5

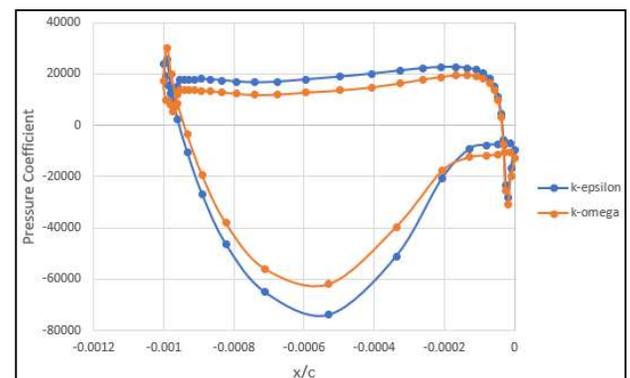
ตารางที่ 5 สรุปลผลการจำลองมุมปะทะ

Angle	Value	$k-\varepsilon$ Model	$k-\omega$ Model
0°	F _D	1,009 N	1,161 N
	F _L	8,863 N	6,098 N
5°	F _D	-99 N	-5.5 N
	F _L	2,992 N	2,417 N
10°	F _D	-481 N	-378 N
	F _L	3,907 N	3,639 N
15°	F _D	-627 N	-499 N
	F _L	3,599 N	3,457 N
20°	F _D	-596 N	-532 N
	F _L	3,317 N	3,272 N

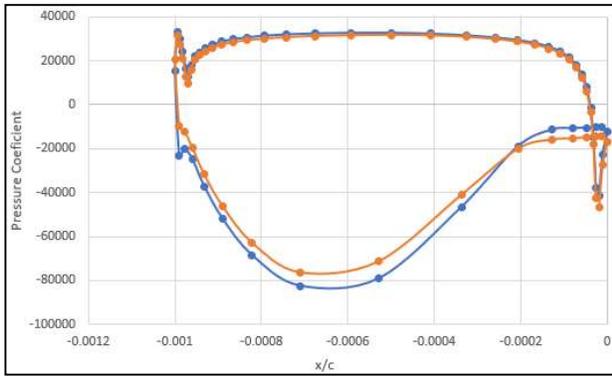
จากการศึกษามุมปะทะ และทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดัน (Pressure coefficient) รอบใบพัดกังหันน้ำทั้งสองแบบจำลอง พบว่าให้ค่าผลเฉลยเชิงตัวเลขที่ใกล้เคียงกัน ผลการจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันในแต่ละมุมมองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ถึง 14



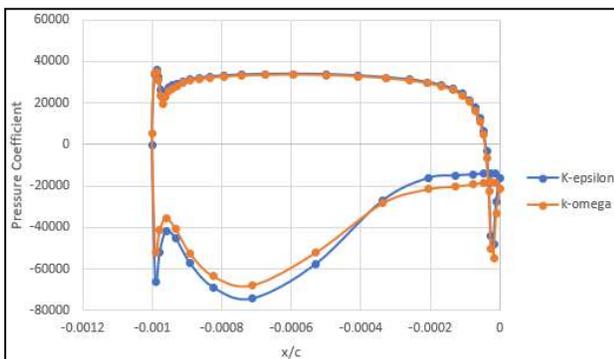
รูปที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันที่มุม 0 องศา



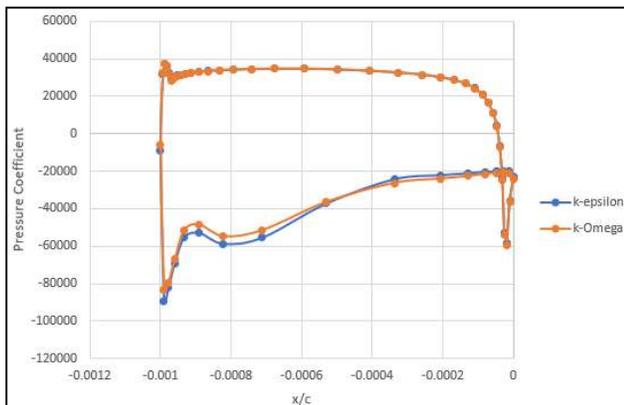
รูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันที่มุม 5 องศา



รูปที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันที่มุม 10 องศา

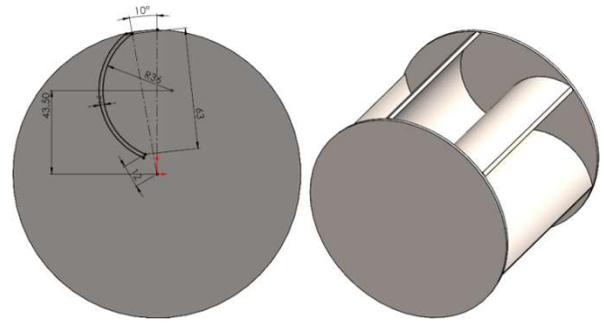


รูปที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันที่มุม 15 องศา



รูปที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความดันที่มุม 20 องศา

ผลจากการศึกษาพบว่าที่มุมไบกัณฑ์น้ำ 10 องศา สามารถสร้างแรงยกตัวได้ดีที่สุด จึงนำผลที่ได้มาทำการออกแบบการวางใบพัดในคีมวงล้อของกังหันจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 15

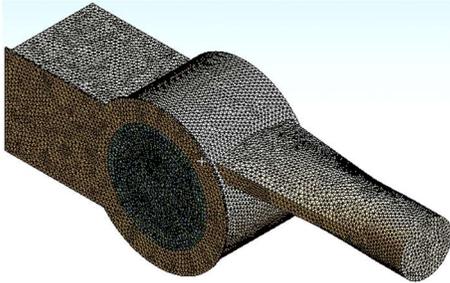


รูปที่ 15 การสร้างแบบจำลองวงล้อกังหันน้ำจากข้อมูลการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล

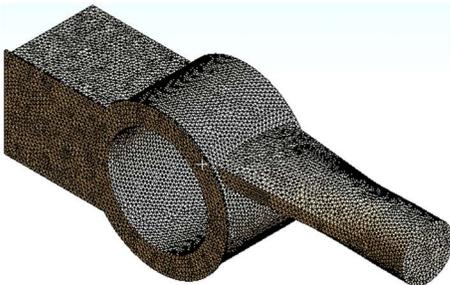
4.2 กรณีการศึกษาเพื่อคำนวณหารอบการหมุน

การศึกษานี้ผู้วิจัยจะทำการคำนวณหาตัวแปรของค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวงล้อกังหันน้ำที่ได้จากการออกแบบในรูปที่ 15 โดยการทดสอบจะทำการศึกษาวงล้อที่มีจำนวนใบพัดกังหันน้ำ 4, 5 และ 6 ใบพัด โดยมวลของวงล้อกังหันน้ำในแต่ละแบบจำลองสามารถทำการวัดค่าได้จากโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดวัสดุที่ใช้ในการสร้างวงล้อกังหันน้ำเป็น Stainless และทำการวัดค่ามวลของวงล้อจากโปรแกรม Autodesk Inventor Professional เวอร์ชัน 2014 พบว่าวงล้อที่ติดตั้งใบพัด 4, 5 และ 6 ใบพัด มีมวลเท่ากับ 1.15, 1.31 และ 1.46 กิโลกรัมตามลำดับ

หลังจากรู้ค่ามวลของแบบจำลองแล้ว ผู้วิจัยจึงนำมวลที่วัดได้มาคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงกล โดยสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 15 ดังนั้นจะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงกลของวงล้อที่มีจำนวนใบพัดกังหันน้ำ 4, 5 และ 6 ใบพัด คือ 0.006468, 0.007368 และ 0.008213 kg.m^2 ตามลำดับ ขั้นตอนการจำลองผลเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณหารอบการหมุนด้วยโมดูล Free spinning จะใช้เทคนิคการปรับค่าเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดในส่วนบริเวณพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วและความดันที่สูง ในการศึกษาี้ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองและทำการสร้างเมชที่มีความละเอียดที่แตกต่างกันในส่วนของชิ้นงานโวลูต ชิ้นงานวงล้อกังหันน้ำ และในส่วนของชิ้นงานโดเมนการหมุน โดยทำการกำหนดรูปแบบเมชเป็นแบบ CFD และในส่วนของ Element order กำหนดเป็นแบบ Quadratic จะได้ผลลัพธ์ขององค์ประกอบเมชเอลิเมนต์ วงล้อกังหันน้ำ และชุดของโดเมนการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 16 ถึง 19



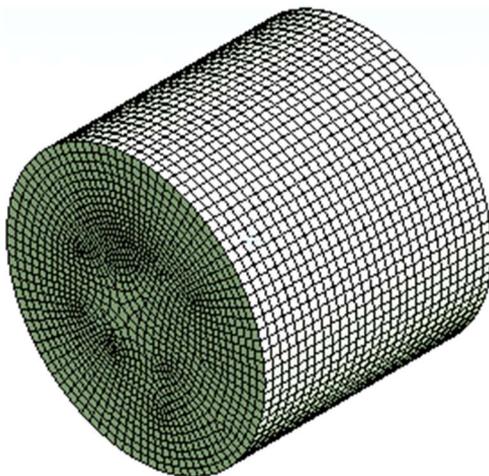
รูปที่ 16 ภาพรวมเมชเอลิเมนต์ในงานวิจัย



รูปที่ 17 ตัวอย่างเมชเอลิเมนต์ของโรลลิ่งท่อน้ำที่อยู่กับที่



รูปที่ 18 ตัวอย่างเมชเอลิเมนต์ที่วงล้อกังหันน้ำ



รูปที่ 19 ตัวอย่างเมชเอลิเมนต์ที่ชุดของโดเมนการหมุน

รูปแบบการแบ่งเมชเอลิเมนต์ในงานวิจัยที่ได้สร้างขึ้น ในแต่ละแบบจำลองจะมีขนาดและประสิทธิภาพของเมชเอลิเมนต์ โดยแต่ละแบบจำลองจะมีจำนวนเมชเอลิเมนต์ดังนี้ โรลลิ่งท่อน้ำเท่ากับ 267,410 เอลิเมนต์ วงล้อกังหันน้ำเท่ากับ 117,410 เอลิเมนต์ และชุดของโดเมนการหมุนเท่ากับ 75,410 เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในส่วนของ Free spinning เพื่อคำนวณหารอบการหมุนที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ นำไปทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์หารอบการหมุน

แบบจำลองใบพัด	$k-\varepsilon$ Model (RPM)	$k-\omega$ Model (RPM)	ทดสอบจริง	Error % ($k-\varepsilon$)	Error % ($k-\omega$)
4	218	217	211	3.21	2.76
5	214	216	209	2.33	3.24
6	212	213	208	1.88	2.34

จากตารางที่ 6 ผลการจำลองเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง แต่เมื่อนำผลการจำลองทั้งสองแบบมาทำการเปรียบเทียบการลู่เข้าคำตอบโดยทำการปรับค่าเอลิเมนต์และจำนวนชั้นของเลเยอร์เอลิเมนต์ พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\varepsilon$ จะให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากที่สุด

4.3 การวิเคราะห์ผลและคำนวณหาแรงบิด

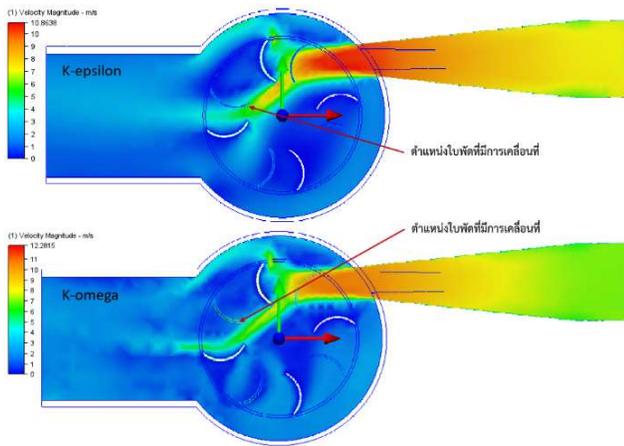
จากการวิเคราะห์รอบการหมุนของวงล้อกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าทั้งสามต้นแบบ คือ แบบ 4, 5 และ 6 ใบ และต้นแบบทั้ง 3 มาทำการปรับค่าเมชเอลิเมนต์ พบว่าที่วงล้อกังหันน้ำที่ติดตั้งใบพัด 6 ใบ สามารถสร้างแรงบิดใช้งานได้สูงสุดที่ 15.23 N.m ที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\varepsilon$ และเมื่อนำผลการจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\omega$ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีส่วนที่แตกต่างกันเล็กน้อยในการคำนวณช่วงเริ่มต้นและจะลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันในช่วงเวลา 3 วินาที ที่ Step time 0.003058,

0.003823 และ 0.004587 ในเรื่องของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 7

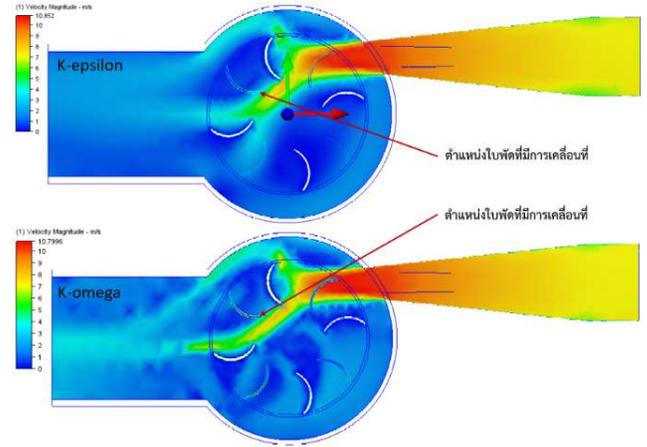
ตารางที่ 7 สรุปค่ากำลังงานที่ผลิตได้

ใบพัด	$k-\epsilon$	$k-\omega$	Power	Power	(η)	(η)
	Model	Model	$k-\epsilon$ (วัตต์)	$k-\omega$ (วัตต์)	$k-\epsilon$	$k-\omega$
4	8.14	8.16	185.73	185.34	0.62	0.61
5	9.23	9.27	206.74	209.58	0.69	0.70
6	10.15	10.26	225.22	228.74	0.75	0.76

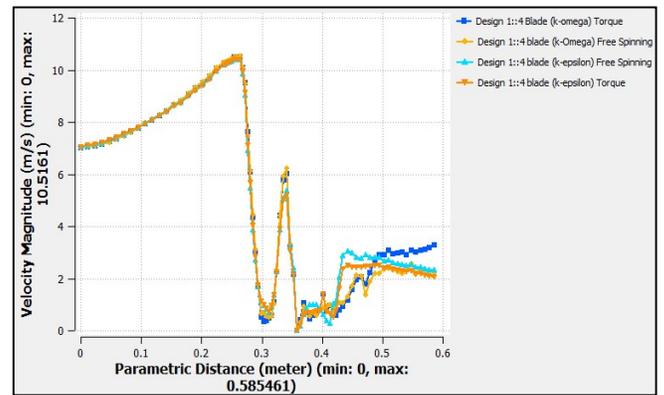
จากตารางที่ 7 เป็นค่ากำลังงานของกังหันที่ผลิตได้และประสิทธิภาพ (η) การทำงานของกังหันที่คำนวณได้จากการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งยังไม่คิดอัตราการสูญเสียในระบบการทำงาน ที่อาจจะเกิดขึ้นจากการสูญเสียจากการหมุน การสูญเสียเนื่องจากภาระทางไฟฟ้า เป็นต้น



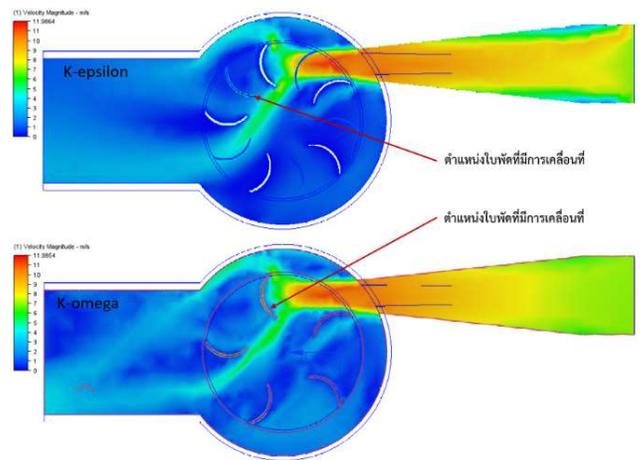
รูปที่ 20 ผลการวิเคราะห์ Free Spinning ที่จำนวนใบกังหันน้ำ 4 ใบพัด



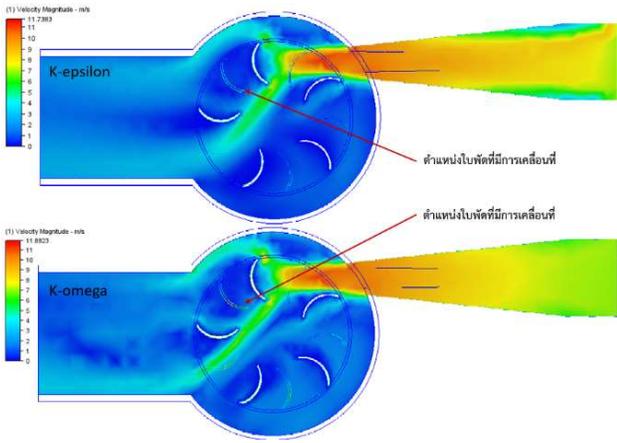
รูปที่ 21 ผลการวิเคราะห์แรงบิดที่จำนวนใบกังหันน้ำ 4 ใบพัด



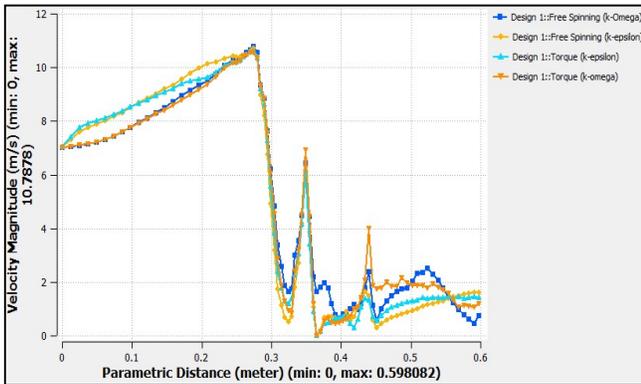
รูปที่ 22 จำลองผลค่าความเร็วที่ตำแหน่งตามความยาวโวลูตน้ำในส่วนจำนวนใบพัด 4 ใบ



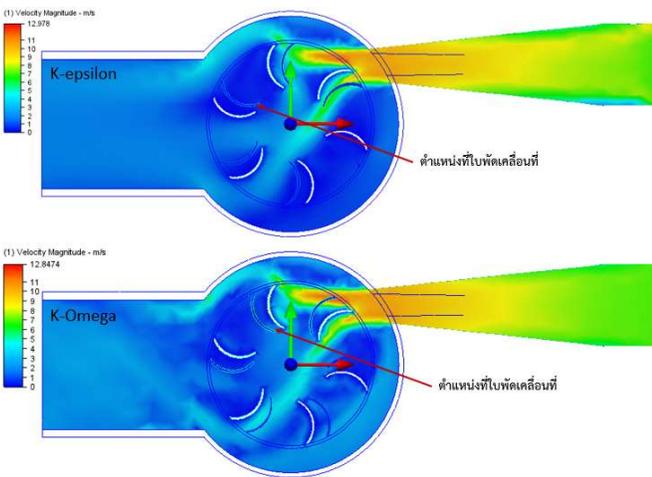
รูปที่ 23 ผลการวิเคราะห์ Free Spinning ที่จำนวนใบกังหันน้ำ 5 ใบพัด



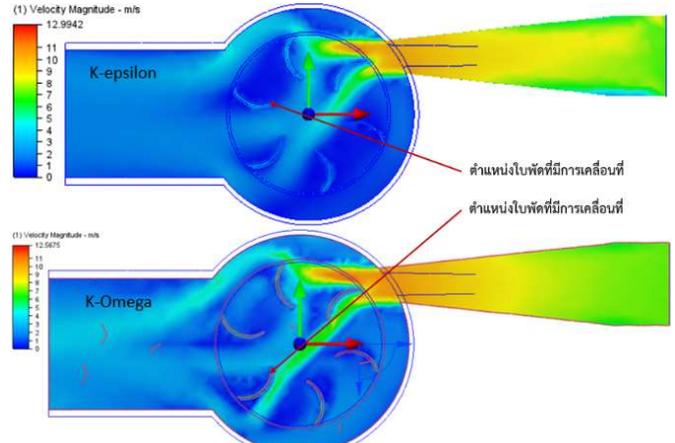
รูปที่ 24 ผลการวิเคราะห์แรงบิดที่จำนวนใบกังหันน้ำ 5 ใบพัด



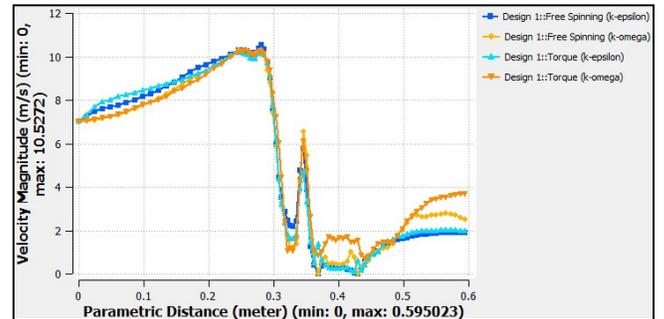
รูปที่ 25 จำลองผลค่าความเร็วที่ตำแหน่งตามความยาวโวลูตน้ำในส่วนจำนวนใบพัด 5 ใบ



รูปที่ 26 ผลการวิเคราะห์ Free Spinning ที่จำนวนใบกังหันน้ำ 6 ใบพัด



รูปที่ 27 ผลการวิเคราะห์แรงบิดที่จำนวนใบกังหันน้ำ 6 ใบพัด



รูปที่ 28 จำลองผลค่าความเร็วที่ตำแหน่งตามความยาวโวลูตน้ำในส่วนจำนวน 6 ใบพัด

จากรูปที่ 20, 23 และ 26 เป็นการแสดงการกระจายตัวของค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำภายในสนามการไหลของโวลูตกังหันน้ำในส่วนของการวิเคราะห์แบบ Free Spinning ที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองชนิด ส่วนรูปที่ 21, 24 และ 27 เป็นการแสดงการกระจายตัวของค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำภายในสนามการไหลของโวลูตกังหันน้ำในส่วนของการวิเคราะห์แบบแรงบิดที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองชนิด ซึ่งการวิเคราะห์หาแรงบิด จะกระทำโดยผ่านกระบวนการจำลองภายใต้สนามความเร็วของลำน้ำที่วิ่งเข้ามาปะทะ วงล้อกังหันน้ำจนเกิดการหมุนในสนามการไหลภายในโวลูตน้ำ แถบสีที่เกิดขึ้น จึงแสดงอยู่ในรูปแบบของแถบสีความเร็ว แต่ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปแรงบิดที่โปรแกรมสร้างขึ้นในรูปแบบไฟล์ Excel และรูปที่ 22, 25 และ 28 เป็นการแสดงตำแหน่งของค่าความเร็วเฉลี่ยตามความยาวของโวลูตน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายตัวของค่าความเร็วที่ได้พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน มีเพียงบางตำแหน่งในแต่ละ

แบบจำลองที่มีระดับการกระจายตัวที่แตกต่างกัน แต่ในช่วงการลู่เข้าของคำตอบจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสอบแบบ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่า ผลจากการปรับค่าของเมชเอลิเมนต์ในส่วนของชิ้นงานโดเมนการหมุนให้ความละเอียดมาก และในส่วนของชิ้นเลเยอร์ของเมชเอลิเมนต์ในส่วนของโดเมนไหลและโดเมนการหมุนให้มีจำนวนชั้นที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นส่วนของเชื่อมต่อกันของเมชเอลิเมนต์ที่อยู่กับที่และเมชเอลิเมนต์ที่มีการหมุน โดยค่าผลลัพธ์ของคำตอบก็ส่งผลกระทบต่อค่าการลู่เข้าใกล้เคียงกับการทดสอบจริง เมื่อทำการเปรียบเทียบกัน

5. สรุปผลการวิจัย

ผลจากงานวิจัยได้ทำการแบ่งการศึกษาไว้ 3 กรณี คือ กรณีศึกษาในการคำนวณหาแรงยกตัว (Lift force) ตัวและแรงต้าน (Drag force) ที่เหมาะสมในมุมมองเสาต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์พบว่าที่มุม 10 องศา สามารถสร้างแรงยกได้สูงที่สุด และมีอัตราแรงต้านน้อยที่สุด หลังจากนั้นจึงนำมุมมองเสาที่เหมาะสมมาทำการขึ้นรูปแบบจำลองวงล้อโดยทำการติดตั้งใบพัดที่ 4, 5 และ 6 ใบพัดที่มุมการวางใบ 10 องศา และทำการปรับขนาดความละเอียดของเมชเอลิเมนต์และชิ้นเลเยอร์ของเมชเอลิเมนต์ที่เชื่อมต่อกันระหว่างเมชอยู่กับที่และส่วนของเมชที่มีการหมุนหรือเคลื่อนที่ เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาที่สองในการคำนวณหาการหมุนในส่วนของการ Free spinning และกรณีศึกษาที่สามเพื่อคำนวณหาค่าแรงบิดใช้งาน ผลจากการศึกษาในกรณีที่สองและสามพบว่ามีค่าที่ลู่เข้าของคำตอบที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงทั้งในส่วนของการแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์แบบ Free Spinning ไปประยุกต์ใช้งานกับการศึกษา วิจัย เพื่อทำการออกแบบเครื่องจักรกลของไหลได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนจาก “โครงการวิจัยภาคเหนือตอนล่าง มหาวิทยาลัยนเรศวร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Costra H, Pereira N, Borges JE. Study of the nozzle flow in cross-flow turbine. *International Journal of Mechanical Science*. 2009; 38(3): 283-302.
- [2] Vishal C, Jaymin D. Evaluation of hydro turbine forebay using CFD, In: *The 11th Asian International Conference on Fluid Machinery, 2011 November 21- 23, IIT Madras, Chennai, India*; 2011. P.1-10.
- [3] Suppachai T, Sataporn W. *Solid Works and Cosmos Work*. Bangkok: SST; 2007. P. 1-26.
- [4] Durgin WW, Fay WK. Some fluid flow characteristic of cross-flow type turbine. *The Winter Annual Meeting of ASME, New Orleans, 1984*; P.77-83.
- [5] Werayoot L. Design and analysis of two-wheel horizontal axis micro water turbine generator using computational fluid dynamics technique, *Engineering Journal Chiangmai University*. 2016; 23(1): 20-29.
- [6] Werayoot L. Performance testing of vertical axis micro water turbine generator for driven of available storage water on building. *Engineering Journal Chiangmai University*, 2015; 21(1): 9-17.
- [7] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล. การออกแบบอย่างเหมาะสมของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเสถียรด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [วิทยานิพนธ์], วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2552.
- [8] Werayoot L. Efficiency evaluation and test system of the horizontal and vertical axis micro water turbine generator in a community, In: *The 2nd MJU- Phrae National Research Conf; 2011 September 1-2. Phrae, Thailand*; 2011. P. 80-87.
- [9] Nuthawut J, Chirakarn S. Performance testing of vertical axis water turbine with friction reduction: blade performance comparison, In: *The 9th*

National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conf; 2012 December 6-7. Kasetsart University Kamphaeng Saen, Thailand; 2012. P.121-128.

- [10]. Abdullah BN. Design of high efficiency cross- flow turbine for hydro- power plant. *International Journal of Engineering and Advance*. 2004;2(3): 308-311.
- [11] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล. แบบจำลองความปั่นป่วน K-epsilon และ K-omega สำหรับการวิเคราะห์รอบการหมุนของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนสำหรับชุมชน. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์*. 2561; 11(1), 95-104
- [12] สว่างชาติทอง, วีระชัย โรยนรินทร์. การออกแบบระบบทางกลสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์. ใน: *งานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6*. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ: เพชรบุรี; 2553. หน้า 128-132.
- [13] Autodesk. 2018. CFD Support and learning. เข้าถึงได้จาก : <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learnexplore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/SimCFD-UsersGuide/files/GUID-423C0084-6DEA-4164-951A-96446997747C-htm.html>.