การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลที่ไหลผ่านกังหันน้ำแบบคาปลาน สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

Computational Fluid Dynamic Analysis of Flow through a Kaplan Turbine for a Small Hydropower Plant

มูฮำมัดคอยรี หะยีบากา[1*] อาหมัด แวบือราเฮง[2] อีลีหย๊ะ สนิโซ[2] บุญธิดา จิรรัตนโสภา[3] และจักราวุธ เตโช[4]

Muhammadkhoiri Hayibaka[1†], Amad Waeberaheng[2], Eleeyah Saniso[2], Boontida Jirarattanatsopa[3], and Jakkrawut Techo[4]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 95000

[2]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 95000

[3]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 95000

[4] สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ 60000

[1]Renewable Energy Technology, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University 95000

[2]Physics, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University 95000

[3]Information Technology, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University 95000

[4]Energy Engineering, Faculty of Agriculture and Industrial Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University 60000

Received: 10 October 2020, Revised: 26 May 2021, Accepted: 15 June 2021, Published online: 23 August 2021

Abstract

A small hydropower plant is an environmentally-friendly and clean energy source that uses the kinetic and potential energy of water to generate electricity. This research aims to analyze and simulate the dynamic flow of fluid through a Kaplan turbine for small hydropower plants. The model was constructed using 3 types of Kaplan turbines, each consisting of 3, 4 or 5 blades with a radius of 180 mm as created by the Solid Works simulation program in order to define the initial conditions, goal or solution, as well as examine the solutions obtained from the analysis. The results showed that the turbulence of water and the torque of the turbine when flowing through a turbine with 5 blades, turbulence and maximum torque are achieved, where torque is 0.270 N-m. However, the torque increases when the number of blades increases, but the speed is low and the efficiency of the turbine decreases. The 4-blade propeller showed the highest efficiency at 54.6%.

Keywords: Computational Fluid Dynamic, Kaplan Turbine, Small-Hydro Power Plant

*Corresponding author: Tel.: 086 296 8790 E-mail address: muhammadkhoiri.h@yru.ac.th

บทคัดย่อ

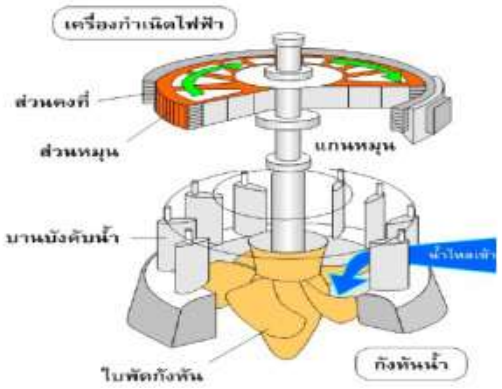
โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่ใช้พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของน้ำในการผลิตไฟฟ้า การวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลที่ไหลผ่านกังหันน้ำแบบคาปลาน โดยการออกแบบและสร้างกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวน 3 ลักษณะ ได้แก่ กังหันน้ำที่มีใบพัดจำนวน 3 4 และ 5 ใบ ขนาดรัศมีกังหัน 180 mm แล้ววิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยโปรมแกรม Solid Works Simulation โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการวิเคราะห์ กำหนดเป้าหมายหรือผลเฉลยที่ต้องการ และตรวจสอบเฉลยต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่า ความปั่นป่วนของน้ำและค่าแรงบิดของกังหันเมื่อไหลผ่านกังหันที่มีใบพัด 5 ใบ มีความปั่นป่วนและค่าแรงบิดสูงสุด โดยแรงบิดมีค่าเท่ากับ 0.270 N-m ทั้งนี้ เมื่อจำนวนใบพัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นแต่ความเร็วรอบต่ำและประสิทธิภาพของกังหันลดลง โดยที่ใบพัด 4 ใบ มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 54.6%

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหล กังหันน้ำแบบคาปลาน โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์รวมถึงการประกอบกิจการธุรกิจต่าง ๆ หลายประเทศทั่วโลกจึงให้ความสนใจในการคิดค้นพลังงานทางเลือกต่าง ๆ เพื่อนำมาทดแทนพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน รวมถึงประเทศไทยที่ได้มีการส่งเสริมและพัฒนาในด้านของพลังงานมาอย่างต่อเนื่อง แต่ในปัจจุบันประเทศไทยส่วนใหญ่มีการนำเข้าพลังงานประเภทเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เชื้อเพลิงเหล่านี้เมื่อใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าแล้วจะส่งผลกระทบต่อสภาวะบรรยากาศในรูปของมลพิษทางอากาศ ซึ่งจากข้อมูลของกระทรวงพลังงานประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในไตรมาสแรกของปี 2563 มีปริมาณ 22,355 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อน ร้อยละ 1.8 คิดเป็นมูลค่ากว่า 267,553 ล้านบาท การใช้พลังงานยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตทางเศรษฐกิจโดยที่น้ำมันสำเร็จรูปยังคงเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 45.5 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด รองลงมาประกอบด้วย ไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียน ถ่านหิน/ลิกไนต์ ก๊าซธรรมชาติและพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม คิดเป็นร้อยละ 19.1 11.7 12.4 6.1 และ 5.2 ตามลำดับ [1] ทั้งนี้กระทรวงพลังงานจึงมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล โดยที่หนึ่งในเป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงานคือพลังงานน้ำขนาดเล็ก

การผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก เป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่ใช้พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของน้ำในการผลิตไฟฟ้า ไม่ก่อให้เกิดมลพิษและมลภาวะ ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน จึงมีการสนับสนุนเพื่อให้มีการสร้างโรงไฟฟ้าหรือผลิตไฟฟ้าจากพลังน้ำให้มากขึ้น เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่น [2] ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบน้ำไหลผ่านตลอด จะใช้ความแตกต่างของระดับน้ำบนพื้นที่ที่ต่างกันในการผลิตกระแสไฟฟ้าและปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า ได้แก่ ความสูงของระดับน้ำ ปริมาณการไหลของน้ำ รวมถึงชนิดของกังหันน้ำ



ภาพที่ 1 ลักษณะการทำงานของกังหันน้ำแบบคาปลาน [4]

กังหันน้ำเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เพราะส่งผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงเพื่อผลิตใช้เองในชุมชน ตลอดจนอุตสาหกรรมด้านไฟฟ้าของประเทศจึงมีความสำคัญมากในทางปฏิบัติ การทำนายประสิทธิภาพของกังหันน้ำด้วยการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพนั้นจะได้เพียงค่าประสิทธิภาพ และไม่สามารถระบุถึงสาเหตุของประสิทธิภาพที่ไม่ดี และการทดสอบโมเดลต้องใช้งบประมาณและเวลาในการทำสูง วิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการทำนายสมรรถนะของกังหันน้ำ คือวิธีการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล CFD จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลที่ไหลผ่านกังหันน้ำแบบคาปลานสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก เพื่อทำนายรูปแบบของกังหันน้ำที่ให้ประสิทธิภาพสูง และนำไปใช้จริงในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำต่อไป โดยกังหันน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นกังหันน้ำแบบคาปลาน มีลักษณะใบพัดดังภาพที่ 1 เหมาะกับแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของหัวน้ำต่ำตั้งแต่ 1-70 m และมีหลักการทำงานโดยให้น้ำจะไหลผ่านใบพัดในทิศขนานกับแกนของกังหันน้ำ โดยใบพัดของกังหันน้ำแบบคาปลานสามารถปรับมุมเพื่อรับแรงฉีดของน้ำโดยอัตโนมัติทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนของกังหันน้ำได้ [3]

วิธีการดำเนินการวิจัย

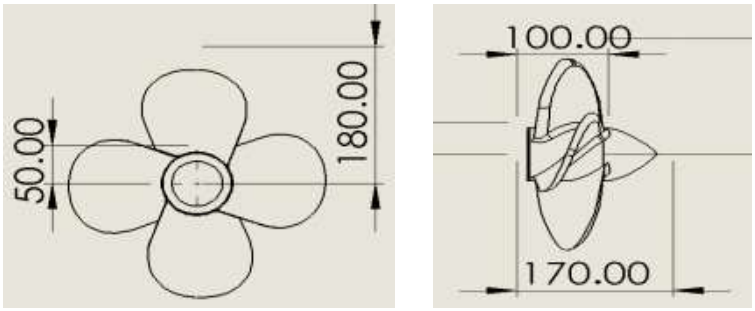
1. ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยเบื้องต้น

ศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาการออกแบบกังหันน้ำ การเขียนแบบสามมิติโดยใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์ และการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล

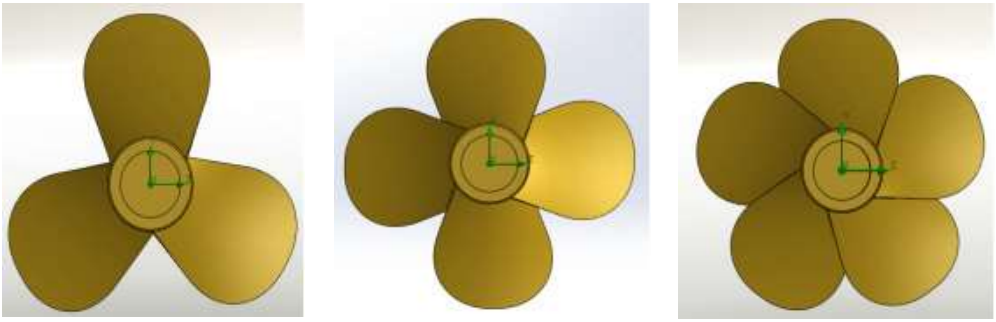
2. การออกแบบกังหันน้ำแบบคาปลาน

2.1 ออกแบบ และสร้างแบบจำลองกังหันน้ำแบบคาปลาน ขนาดรัศมีกังหัน 180 mm ดังภาพที่ 2 โดยการเขียนแบบสามมิติ ใช้โปรมแกรม Solid Works V.2016

2.2 สร้างโมเดลกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวน 3 แบบ ประกอบด้วย 3 4 และ 5 ใบ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ขนาดของกังหันน้ำแบบคาปลานที่ออกแบบ



(ก) 3 ใบ (ข) 4 ใบ (ค) 5 ใบ

ภาพที่ 3 ลักษณะจำนวนใบต่าง ๆ (ก) 3 ใบ (ข) 4 ใบ และ (ค) 5 ใบ

3. การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล

ขั้นตอนที่ 1 ใช้คำสั่ง Wizard ในโปรแกรม Solid Works Simulation V.2016 โดยเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์กังหันน้ำแบบคาปลานทั้ง 3 ค่า ใช้ตัวแปรควบคุมที่เหมือนกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์กังหันน้ำแบบคาปลาน

ระบบหน่วย	SI
ประเภทการวิเคราะห์	ภายนอก
ชนิดของของไหล	ของเหลว (น้ำ)
ความดันของของไหล	10^5 Pa
อุณหภูมิของของไหล	293.2 K
ความเร็วของของไหล	0.5 m/s

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดเป้าหมายหรือผลเฉลยที่ต้องการ การคำนวณด้วยโปรแกรม Solid Works Simulation มีลักษณะการวนลูบเพื่อหาคำตอบ หยุดคำนวณเมื่อค่าต่าง ๆ โดยภาพรวมมีการเปลี่ยนน้อยมาก ดังนั้นต้องมีเงื่อนไขให้หยุด วิเคราะห์ด้วยการใช้เป้าหมาย (Goal) [5] ที่กำหนดคือ แรง (Force) และแรงบิด (Torque)

ขั้นตอนที่ 3 การดูผลเฉลยต่าง ๆ เป็นการดูผลเฉลยที่ต้องการตรวจสอบหรือเพื่อนำเสนอ รวมทั้งตรวจสอบเป้าหมายที่ต้องการ

4. การคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดสอบนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพของกังหันน้ำ (η_T) ซึ่งเป็นอัตราส่วนกำลังงานของกังหันน้ำ (P_{Out}) กับพลังงานจลน์ของน้ำ (P_{in}) [6] ดังแสดงในสมการที่ (3) โดยในการคำนวณวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ จะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนตารางที่ 2

$$P_{in} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (1)$$

$$P_{out} = 2\pi N\tau \quad (2)$$

$$\eta_T = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3)$$

เมื่อ η_T คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ (%) P_{Out} คือ กำลังงานของกังหันน้ำ (W) P_{in} คือ พลังงานจลน์ของน้ำ (W) ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3) A คือ พื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน (m^2) v คือ ความเร็วน้ำ (m/s) N คือ ความเร็วรอบ (RPS) และ τ คือ แรงบิด (N-m)

ตารางที่ 2 ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ

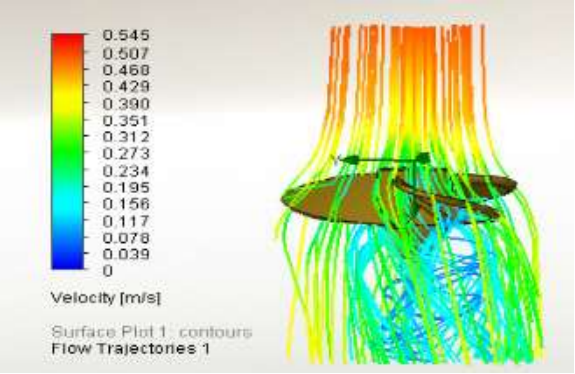
ความหนาแน่นของน้ำ		998 kg/m^3
พื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน		0.35 m^2
ความเร็วน้ำ		0.5 m/s
ความเร็วรอบของกังหัน	3 ใบ	2.5 RPS
	4 ใบ	8.6 RPS
	5 ใบ	5.8 RPS

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

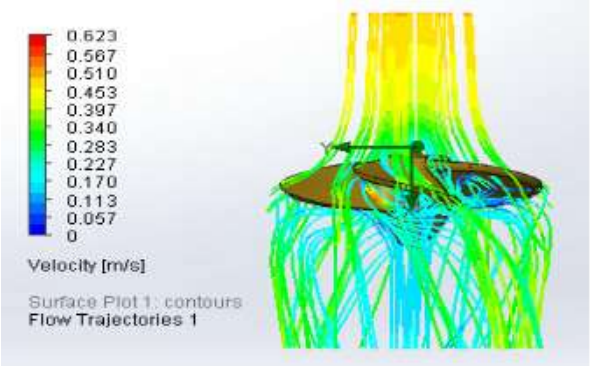
จากผลการจำลองการไหลของน้ำที่ไหลผ่านกังหันน้ำแบบคาปลาน สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก สามารถวิเคราะห์ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านกังหัน แรงบิดของแบบจำลองกังหันน้ำแบบคาปลาน และประสิทธิภาพของกังหันได้ดังต่อไปนี้

1. ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านกังหัน

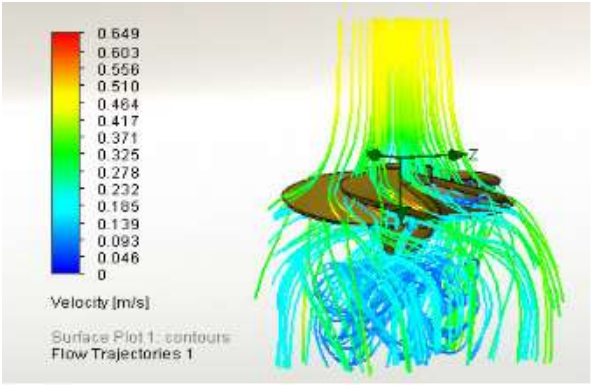
จากผลการจำลองการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแบบคาปลานทั้ง 3 แบบ พบว่าอัตราเร็วของน้ำที่ไหลมาปะทะใบพัดลดลงประมาณ 0.25 m/s จากเดิมก่อนที่น้ำจะไหลมาปะทะกังหันมีความเร็ว 0.5 m/s และเมื่อวิเคราะห์ความปั่นป่วนของน้ำ (Turbulence Flow) เมื่อไหลผ่านกังหันพบว่ากังหันน้ำที่มีใบพัด 5 ใบ จะมีความปั่นป่วนมากที่สุด เนื่องจากจำนวนใบพัดมากขึ้นพื้นที่รับแรงน้ำของใบพัดมีค่ามากกว่า ทำให้เกิดความปั่นป่วนจากการหมุนของกังหันมากกว่ากังหันน้ำที่มีใบพัด 3 ใบ และ 4 ใบ โดยผลการจำลองการไหลของน้ำผ่านกังหันดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4 ลักษณะการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวนใบพัด 3 ใบ



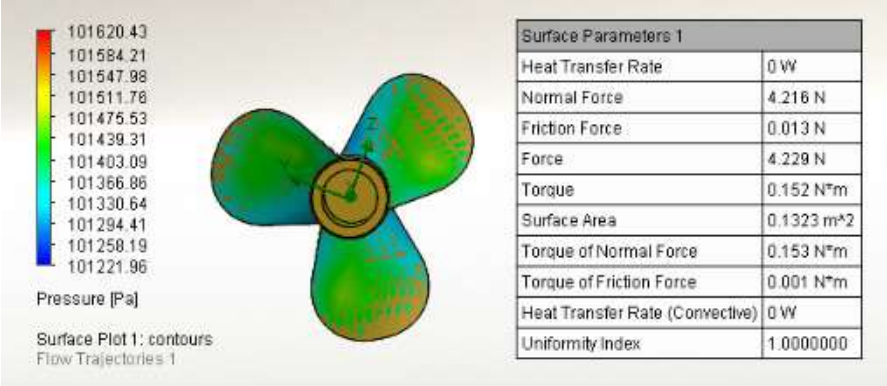
ภาพที่ 5 ลักษณะการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวนใบพัด 4 ใบ



ภาพที่ 6 ลักษณะการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวนใบพัด 5 ใบ

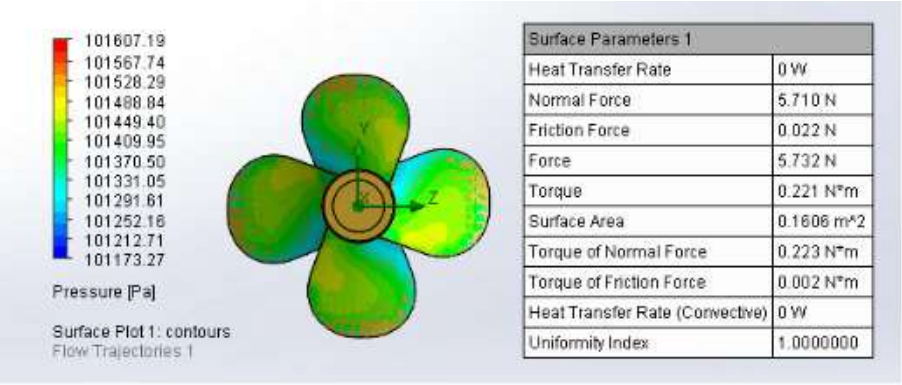
2. แรงบิดของกังหันน้ำ

จากผลการวิเคราะห์แรงบิดของกังหันน้ำ พบว่าจำนวนใบพัดเพิ่มขึ้นทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนใบพัดมากขึ้นพื้นที่รับแรงน้ำของใบพัดมีค่ามากกว่า ทำให้ต้องใช้แรงบิดที่สูงในการหมุนกังหัน ทั้งนี้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.270 N-m ที่จำนวนใบพัด 5 ใบ รองลงมาที่จำนวนใบพัด 4 ใบ และ 3 ใบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.221 N-m และ 0.152 N-m ตามลำดับ โดยผลการทำนายค่าต่าง ๆ ของกังหันน้ำดังภาพที่ 7-9



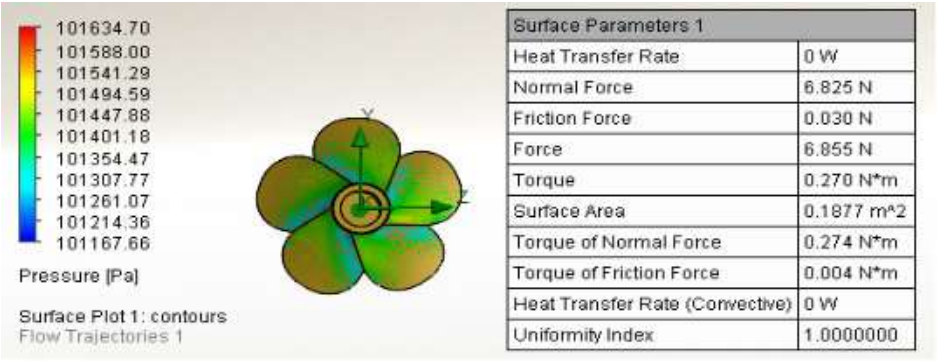
Surface Parameters 1	
Heat Transfer Rate	0 W
Normal Force	4.216 N
Friction Force	0.013 N
Force	4.229 N
Torque	0.152 N*m
Surface Area	0.1323 m^2
Torque of Normal Force	0.153 N*m
Torque of Friction Force	0.001 N*m
Heat Transfer Rate (Convective)	0 W
Uniformity Index	1.0000000

ภาพที่ 7 การทำนายค่าต่าง ๆ ของกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวนใบพัด 3 ใบ



Surface Parameters 1	
Heat Transfer Rate	0 W
Normal Force	5.710 N
Friction Force	0.022 N
Force	5.732 N
Torque	0.221 N*m
Surface Area	0.1606 m^2
Torque of Normal Force	0.223 N*m
Torque of Friction Force	0.002 N*m
Heat Transfer Rate (Convective)	0 W
Uniformity Index	1.0000000

ภาพที่ 8 การทำนายค่าต่าง ๆ ของกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวนใบพัด 4 ใบ

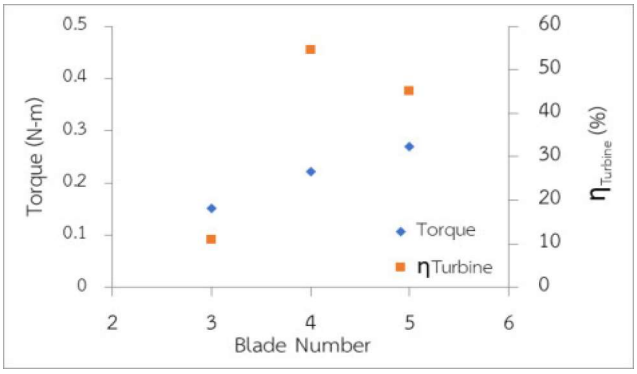


Surface Parameters 1	
Heat Transfer Rate	0 W
Normal Force	6.825 N
Friction Force	0.030 N
Force	6.855 N
Torque	0.270 N*m
Surface Area	0.1877 m^2
Torque of Normal Force	0.274 N*m
Torque of Friction Force	0.004 N*m
Heat Transfer Rate (Convective)	0 W
Uniformity Index	1.0000000

ภาพที่ 9 การทำนายค่าต่าง ๆ ของกังหันน้ำแบบคาปลานจำนวนใบพัด 5 ใบ

3. ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันโดยพิจารณาที่เพลากังหันพบว่า ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 36.88% โดยประสิทธิภาพสูงสุดมีค่า 54.6% ที่ใบพัด 4 ใบ จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนใบพัดมากขึ้นจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่เมื่อถึงจุดที่ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ใบพัด 4 ใบ ค่าประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อจำนวนใบพัดสูงขึ้นความเร็วรอบของกังหันลดลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนใบพัดกับแรงบิดและประสิทธิภาพของกังหันน้ำดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนใบพัดกับแรงบิดและประสิทธิภาพของกังหันน้ำ

จากข้อมูลภาพที่ 7-10 พบว่าที่จำนวนใบพัดมากจะให้ค่าแรงบิดที่สูงแต่ความเร็วรอบต่ำ ดังนั้นขึ้นอยู่กับว่าต้องการกำลังที่เพลาไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบใด หากต้องการใช้งานที่แรงบิดสูงๆ ก็ต้องทำการออกแบบกังหันให้ทำงานที่รอบต่ำ หรือหากต้องการทำงานที่ความเร็วรอบสูงก็ต้องยอมรับในข้อด้อยเรื่องของแรงบิดที่ต่ำ

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลที่ไหลผ่านกังหันน้ำแบบคาปลาน สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความปั่นป่วนของน้ำเมื่อไหลผ่านกังหันพบว่ากังหันน้ำที่มีใบพัด 5 ใบ จะมีความปั่นป่วนมากที่สุด
2. เมื่อจำนวนใบพัดเพิ่มขึ้นทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.270 N-m ที่จำนวนใบพัด 5 ใบ
3. เมื่อจำนวนใบพัดสูงขึ้นความเร็วรอบและประสิทธิภาพของกังหันลดลง โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 54.6% ที่ใบพัด 4 ใบ

ทั้งนี้ ขึ้นกับว่าต้องการกำลังที่เพลาไปใช้ประโยชน์ในลักษณะใดกล่าวคือ หากต้องการใช้งานที่แรงบิดสูงก็ต้องออกแบบกังหันให้ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำในขณะเดียวกันหากต้องการทำงานที่ความเร็วรอบสูงก็ต้องออกแบบให้มีแรงบิดที่ต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากเครือข่ายการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 (โครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนฐานรากเครือข่ายวิจัยภาคใต้ตอนล่าง)

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). **สถานการณ์พลังงานของประเทศ ไตรมาส 1/2563**. กระทรวงพลังงาน.

[2] Green Network. (2563). **โรงไฟฟ้าชุมชน.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.greennetworkthailand.com (25 กันยายน 2563).

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). **ไฟฟ้าพลังน้ำ.** สารานุกรมพลังงานทดแทน. กรุงเทพฯ: มีเดีย เอกซ์เพอร์ทีส อินเตอร์เนชั่นแนล.

[4] Y.P. Consultants Co., Ltd. (ม.ป.ป.). **hydroelectricity** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.yp.co.th/2010-10-03-06-35-34/88--hydroelectricity.pdf (29 กันยายน 2563).

[5] วสันต์ จันทร์หยวก (2559). “**เทคนิคการใช้งานวิเคราะห์การไหลด้วย Solid works Flow Simulation**”. หนังสือ **Solid works Flow Simulation**, กรุงเทพฯ: บริษัท แอพลิเคด จำกัด.

[6] เสาวลักษณ์ ทองดี, ชูรัตน์ ธารารักษ์, ณัฐวุฒิ ดุษฎี, Rameshprabu Ramaraj และธเนศ ไชยชนะ. (2561). “อิทธิพลของจำนวนใบต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวเนียส”. ใน **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19** วันที่ 26-27 เมษายน 2561.

[7] มูฮำหมัดนูร ยูนิ, อิสมาแอล เจ๊ะเต๊ะ, รอมซี มาหะ, ลุตฟี สือนิ และอีลีหย๊ะ สนิโซ. (2555). “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดจิ๋วอย่างง่าย : นวัตกรรมสำหรับชนบท”. **วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้**. 3 (1), 30-36.

[8] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล. (2561). “แบบจำลองความปั่นป่วน K-epsilon (k -ε) และ K-omega (k -ω) สำหรับการวิเคราะห์รอบการหมุนของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนสำหรับชุมชน”. **วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.** ปีที่ 11 ฉบับที่ 1, 95-104.

[9] กิตติพร โป้ชิ้ว และจิราภรณ์ อนันตชัยพัทธนา. (2555). “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำชนิดเพลตันโดยการใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ”. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี**. 11-18.

[10] Ardalan Javadi and Hakan Nilsson. (2017). Detailed numerical investigation of a Kaplan turbine with rotor-stator interaction using turbulence-resolving simulations. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 63, 1–13.

[11] Ajaz Bashir Janjua, M. Shahid Khalil, Muhammad Saeed, Fahad Sarfraz Butt and Abdul Waheed Badar. (2020). Static and dynamic computational analysis of Kaplan turbine runner by varying blade profile. **Energy for Sustainable Development**, 58, 90–99.