

การทดสอบและการจำลองเครื่องกังหันน้ำขนาดเล็ก Testing and Numerical Simulation of Small Hydro Turbine

ยอชชัย เตียเป็น^{1*} นพพงศ์ ศรีตระกูล² อุดมเกียรติ นนทแก้ว² และ ประโมทย์ ฉามamahattana³

¹สาขาวิศวกรรมต่อเรือและเครื่องกลเรือ วิทยาลัยพาณิชยนาวินาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230 โทร 0-3835-4849 โทรสาร 0-3835-4849 *อีเมลล์ yodchai_tp@yahoo.com

²ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-2913-2500 โทรสาร 0-2586-9542 อีเมลล์ n_pp_ng@yahoo.com, unk@kmitnb.ac.th

³ฝ่ายก่อสร้างพลังน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.บางกรวย จ.นนทบุรี

โทร 0-2436-1054 โทรสาร 0-2436-1054 อีเมลล์ pramote.c@egat.co.th

Yodchai Tiaple^{1*}, Noppong Sritrakul², Udomkiat Nontakeaw², and Pramote Chamamahattana³

¹ Naval architecture and Marine Engineering, International Maritime Institute, Kasetsart University, Si-racha Campus,
Chonburi, 20230 Tel: 0-3835-4849, Fax: 0-3835-4849, *E-mail: yodchai_tp@yahoo.com

² RACE, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 10800
Tel: 0-2913-2500, Fax: 0-2586-9542, E-mail: n_pp_ng@yahoo.com, unk@kmitnb.ac.th

³ Hydro power construction division, EGAT Public company Limited, 11130
Tel: 0-2436-1054, Tel: 0-2436-1054, E-mail: pramote.c@egat.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือระหว่างกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่วมกับสถาบันการศึกษา เพื่อพัฒนาการมาตรฐานการออกแบบเครื่องกังหันพลังน้ำขนาดเล็กสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ที่เหมาะสมกับแหล่งน้ำในประเทศ และเน้นการพึ่งพาเทคโนโลยีภายในประเทศ เช่น แม่แรง โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง เป็นกรณีศึกษา เบื้องต้นอาศัยเทคนิคการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลช่วยในการออกแบบ ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ วิเคราะห์สนามการไหล และประสิทธิภาพ บทความนี้แสดงผลการออกแบบผ่านการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ที่ค่าหัวน้ำเฉลี่ย 13 เมตร และอัตราการไหล $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ กำลังผลิต 155 kW ประสิทธิภาพรวม 80 % ผลมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

Abstract

A research project is currently being undertaken in collaboration with Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) with several universities to develop a standard design procedure for small hydro turbines that can be manufactured locally in developing countries. Mae-Jang dam at Mae-moh Power plant, Lampang province, has been selected for small

hydro demonstration. The Computational Fluid Dynamics (CFD) was exploited as the design tool. The turbulence $k-\epsilon$ model is used for simulation to analyze flow pattern and fluid mechanical efficiency of hydro turbine. The CFD and field test results were well agreed at average head = 13 m and flow rate = $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$. The power output is 155 kW and overall efficiency is 80%.

1. บทนำ

ความต้องการการใช้พลังงานมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ตามการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจ หลายๆประเทศได้เร่งพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการผลิตไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาด (Green energy) อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานชีวมวล เป็นต้น ประเทศไทยก็เป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีทรัพยากรพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) อยู่มาก แต่ไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด พลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงสุดต่อการพัฒนาของประเทศไทยได้แก่ พลังน้ำ เนื่องจากมีทรัพยากรอยู่อย่างมากมาย และมีค่าการผลิตต่อหน่วยต่ำสุดเมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่น

ความเหมาะสมในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำของประเทศไทย ควรมุ่งเน้นกับแหล่งน้ำขนาดเล็ก หรือแหล่งน้ำตาม

ธรรมชาติ เพื่อลดกระแสต่อต้านจากสังคม ต่อการพัฒนาเขื่อนกักเก็บน้ำขนาดใหญ่ แหล่งน้ำขนาดเล็กที่มีอยู่จำนวน 6,618 โครงการ [1] ภายใต้ความดูแลของกรมชลประทาน ไม่เพียงแต่ใช้ประโยชน์สำหรับการเกษตรกรรม และการบริโภคเท่านั้น แต่เรายังสามารถนำน้ำที่ปล่อยจากเขื่อนมาผลิตไฟฟ้าได้ โดยนำเอาเครื่องกังหันน้ำมาติดตั้งบริเวณประตูระบายน้ำ ดังรูปที่ 1 เพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ และเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกทางหนึ่ง



ที่มา : <http://www.thamesweb.co.uk/windsor/thames/romneyhydro.html>

รูปที่ 1 การดัดแปลงสำหรับติดตั้งกังหันน้ำบริเวณประตูระบายน้ำ

บทความนี้จะนำเสนอแนวทางการออกแบบและพัฒนา การผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ชนิด Reaction axial bulb turbine และการทดสอบโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กไม่เกิน 200 kW อัตราการไหล $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ และความสูงหัวน้ำ (Pressure head) เฉลี่ย 13 m เพื่อเป็นกรณีตัวอย่างสำหรับการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กของประเทศไทยต่อไป

2. ทฤษฎี

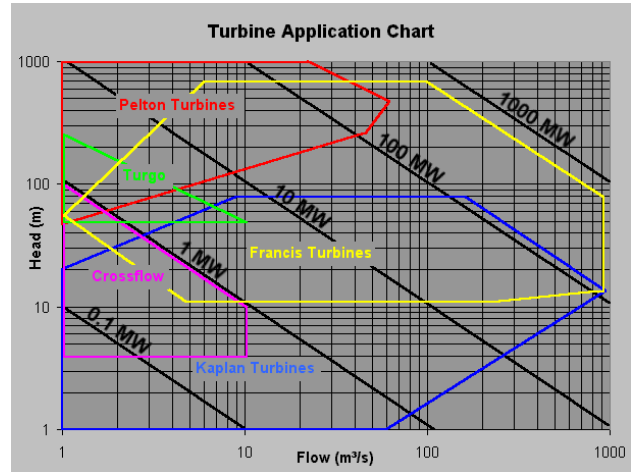
ตัวแปรที่สำคัญสำหรับพลังน้ำก็คือ ความสูงหัวน้ำ (H) และ อัตราการไหล (Volume flow rate, Q) โดยสามารถให้พลังงานออกมาได้เท่ากับ

$$P = \eta \rho g Q H \quad (1)$$

เมื่อ P คือ กำลังงานกลที่กังหันน้ำผลิตได้ [W]
 η คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
 Q คือ อัตราการไหล (m^3/s) และ
 H คือ ความสูงหัวน้ำ (m)

กังหันน้ำที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปสามารถแบ่งประเภทตามกลไกการสร้างแรงหมุน ได้ 2 ประเภท คือ *Impulse turbine* และ *Reaction turbine* สำหรับกังหันน้ำประเภท *Impulse* เหมาะกับเขื่อนที่มีความสูงหัวน้ำมาก ตัวอย่างของกังหันประเภทนี้ คือ *Pelton turbine*, *Turgo turbine*

และ *Crossflow turbine* สำหรับกังหันน้ำประเภท *Reaction* เหมาะกับเขื่อนที่มีความสูงหัวน้ำปานกลางถึงต่ำ นอกจากนี้ *Reaction* ยังแบ่งตามรูปแบบการไหลของน้ำภายในตัวกังหัน เป็นแบบ *Radial flow* หรือ *Mixed flow* เช่น *Francis turbine* และ *Kaplan turbine* และ แบบ *Axial flow* เช่น *Propeller turbine* และ *Bulb turbine* เป็นต้น รูปที่ 2 แสดงช่วงความเหมาะสมของกังหันน้ำแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับค่าอัตราการไหล และความสูงหัวน้ำ



ที่มา : <http://upload.wikimedia.org>

รูปที่ 2 ช่วงความเหมาะสมของกังหันน้ำแต่ละชนิด

ความเร็วจำเพาะ (Specific speed, n_s) เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการออกแบบ เพื่อเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างประสิทธิภาพกับความเร็วนอกการทำงานของกังหันน้ำ โดยความเร็วจำเพาะสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$n_s = \frac{n \sqrt{P}}{H^{1.25}} \quad (2)$$

เมื่อ n คือ ความเร็วรอบของกังหัน (rpm) P คือ กำลังการผลิต (kW) และ H คือ ความสูงหัวน้ำ (m) ช่วงค่าความเร็วจำเพาะของกังหันน้ำแต่ละชนิดมีค่าประมาณดังนี้

Pelton	10-30
Turgo	20-70
Crossflow	20-200
Francis	30-400
Propeller and Kaplan	200-1000

ความเร็วจำเพาะยังสามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชัน H เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้ [2]

$$\text{Pelton (1 jet)} \quad n_s = 85.49 / H^{0.243} \quad (3)$$

$$\text{Francis} \quad n_s = 3763 / H^{0.854} \quad (4)$$

$$\text{Cross flow} \quad n_s = 513.25 / H^{0.505} \quad (5)$$

$$\text{Propeller} \quad n_s = 2702 / H^{0.5} \quad (6)$$

$$\text{Kaplan} \quad n_s = 2283 / H^{0.486} \quad (7)$$

$$\text{Bulb} \quad n_s = 1520.26 / H^{0.2837} \quad (8)$$

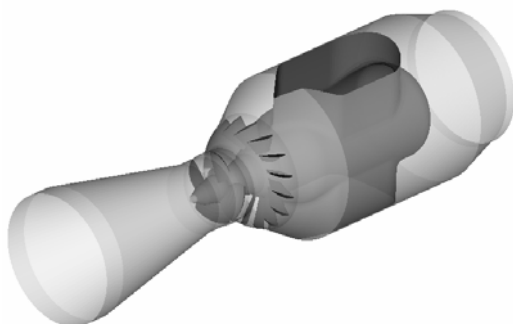
3. การออกแบบกังหันน้ำด้วย CFD

การศึกษาในครั้งนี้ นำเอาเขื่อนแม่จางเป็นกรณีศึกษา ซึ่งเป็นแหล่งน้ำใช้ในระบบของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยมีเงื่อนไขการใช้งานคือ ปลอยน้ำด้วยอัตราการไหล $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ และมีระดับความสูงหัวน้ำเฉลี่ยที่ 13 เมตร จากเงื่อนไขพิจารณาประกอบกับรูปที่ 1 ชนิดของกังหันน้ำที่เหมาะสมคือ Kaplan turbine การออกแบบในครั้งนี้เลือก Kaplan turbine แบบ Bulb turbine โดยมีส่วนประกอบดังนี้

Runner diameter	650 mm.
No. of Runner blades	4 pics
No. of Guide vanes	16 pics
Generator Speed	1500 rpm
Runner speed	625 rpm
Power	170 kW

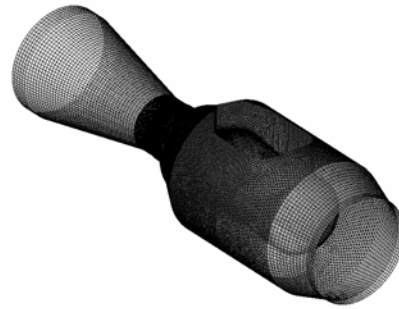
ปกติลักษณะการไหลภายในกังหันน้ำจะมีความซับซ้อนอย่างมาก โดยเฉพาะการไหลบริเวณของใบกังหัน เครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบเพื่อวิเคราะห์การไหลได้ดีก็คือ Computational Fluid Dynamics (CFD) การศึกษาในครั้งนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT ช่วยในการออกแบบ ผลจากการวิเคราะห์สามารถหาตำแหน่งมุมของ guide vane และ runner blade ที่เหมาะสม [3] และสามารถวิเคราะห์ช่วยหาประสิทธิภาพสูงสุดได้เป็นอย่างดี และแน่นอนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลเป็นสิ่งที่จำเป็น แต่ผลที่ได้จากการจำลอง จะสามารถช่วยลดจำนวนการทดลองได้โดยใช้วิธี parametric approach [4]

กังหันน้ำจะแบ่งโดเมนออกเป็นส่วนประกอบด้วย โดเมนของ Bulb case โดเมนของ Guide vane โดเมนของ Runner และโดเมนของ Draft tube ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โดเมนของ Bulb turbine

การเมสกังหันน้ำอาศัยโปรแกรม Gambit โดยชนิดของเมสเลือกใช้แบบ tetra mesh จำนวนเมสทุกโดเมนรวม 1,307,405 เมส แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เมสกังหันน้ำ

เงื่อนไขกำหนดที่ตำแหน่งทางเข้าเป็น Mass flow rate และ Pressure inlet ส่วนทางออกกำหนดเป็น Pressure outlet โดยแต่ละโดเมนจะเชื่อมโยงด้วยเงื่อนไข Grid interfaces สำหรับปัญหานี้ใช้การจำลองแบบ Steady Multi Reference Frame โดยโดเมนที่อยู่กับที่ ได้แก่ โดเมนของ Bulb case โดเมนของ Guide vane และโดเมนของ Draft tube ส่วนโดเมนที่เคลื่อนที่ได้แก่ โดเมนของ Runner โมเดลที่เลือกใช้คือ k-ε model และกำหนดค่าการลู่เข้า (Residual monitors) เท่ากับ 10^{-4}

4. การทดสอบกังหันน้ำ

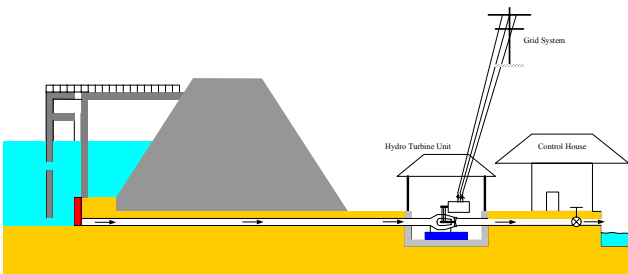
การทดลองโมเดลกังหันน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง จำเป็นต้องใช้ห้องปฏิบัติการ (Test rig) และเครื่องมือวัดที่มีราคาสูงมาก อีกทั้งการสร้างตัวโมเดลสำหรับการทดสอบก็มีราคาสูงมาก เทียบเท่าขนาดจริง เพื่อลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการพัฒนางานวิจัยนี้เลือกที่จะสร้างเครื่องกังหันน้ำต้นแบบ (Prototype) สำหรับทดสอบและสามารถผลิตไฟฟ้าได้จริง รูปที่ 5 แสดงชุด Runner blades ของกังหันน้ำ ขึ้นรูปจากเครื่อง CNC 3 แกน รูปที่ 6 แสดงเครื่องกังหันน้ำที่ประกอบเสร็จพร้อมทำการทดสอบ และรูปที่ 7 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกังหันน้ำ ณ เขื่อนแม่จาง จ.ลำปาง โดยจะติดตั้งอยู่บริเวณ



รูปที่ 5 Runner blades



รูปที่ 6 เครื่องกังหันน้ำ

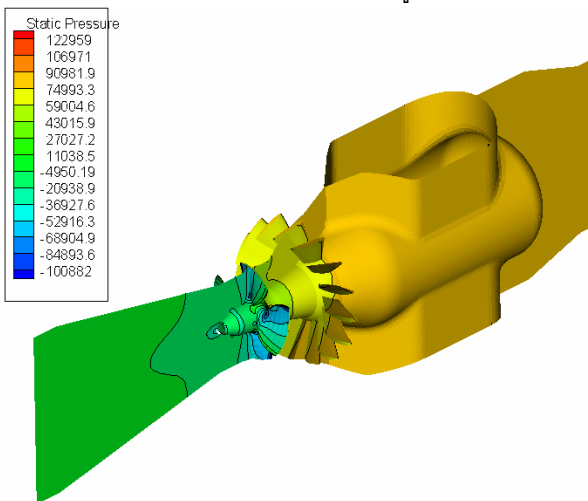


รูปที่ 7 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องกังหันน้ำ

ช่วงกลางระหว่าง สันเขื่อนกับชุดควบคุมวาล์วเปิดปิดน้ำ ซึ่งทางเขื่อนมีท่อ 2 ชุดวางขนานกัน สำหรับการบำรุงรักษา จึงสามารถเลือกติดตั้งท่อใดท่อหนึ่งตามตำแหน่งดังรูปได้

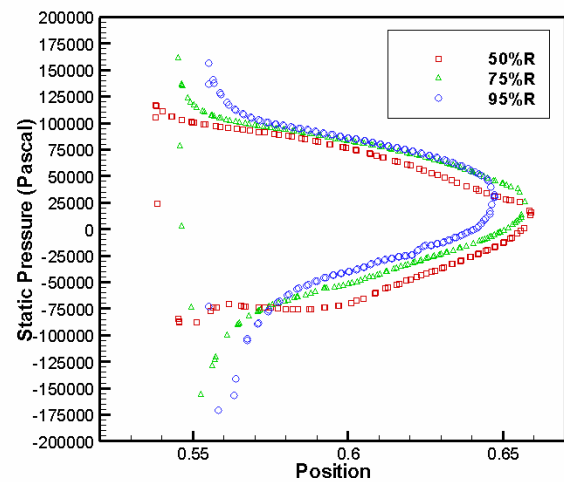
5. ผลและการวิเคราะห์ผล

การจำลองและการทดสอบมีเงื่อนไขที่ความเร็วรอบ 625-630 rpm ที่ความสูงหัวน้ำเฉลี่ย 13 m อัตราการไหลที่ 1.172, 1.263, 1.354, 1.445, 1.523, 1.593, 1.631 และ 1.641 m³/s รูปที่ 8 แสดงการกระจาย



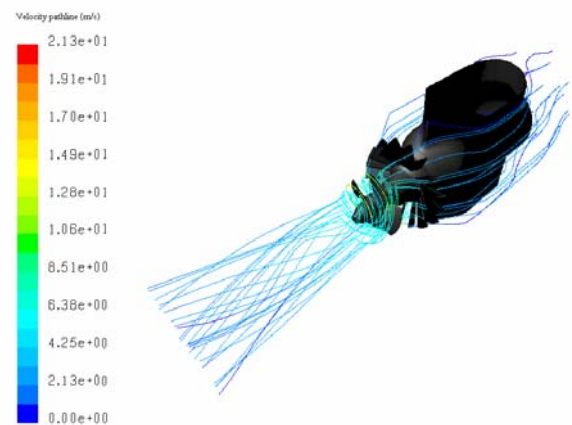
รูปที่ 8 การกระจายตัวของความดัน

ตัวของความดันตั้งแต่ปากทางเข้าผ่าน Guide vane ผ่าน runner blades และไหลออกไปบริเวณ draft tube รูปที่ 9 แสดงความดันที่กระทำบนใบกังหันที่ตำแหน่ง 50% 75% และ 95% ของรัศมี R จากรูปสามารถวิเคราะห์ได้ว่า การไหลจะเกิดพฤติกรรมที่เรียกว่า Cavitation เนื่องจากความดันบริเวณ Leading edge ด้านหลังใบมีความดันต่ำกว่าความดันไอของน้ำ (ความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 0.03166 bar) น้ำสามารถระเหยการเป็นไอได้ในสภาวะนี้ และรูปที่ 10



รูปที่ 9 ความดันด้านหน้าและหลัง runner blade

แสดงเส้นทางการไหลของน้ำ เมื่อน้ำไหลผ่านกังหันเส้นทางการไหลจะมีลักษณะการไหลแบบหมุนวน และความเร็วค่อยๆ ลดลงหลังจากผ่านใบกังหัน



รูปที่ 10 Path lines ของความเร็ว

จากการทดสอบได้จัดบันทึก ค่าอัตราการไหล ความดันหัวน้ำตก คร่อมระหว่างทางเข้ากับทางออก ความเร็วรอบของกังหันน้ำ และกำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Induction Generator) ที่สามารถผลิตได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบเครื่องกังหันน้ำ

Q (m ³ /s)	RPM	ΔH (m)	Power _{input} (kW)	Power _{output} (kW)	efficiency (%)
1.172	625	3.33	38.286	5.07	13.24
1.263	626	3.85	47.702	32.23	67.57
1.354	628	5.514	73.241	54.42	74.30
1.445	629	7.206	102.148	80.77	79.07
1.523	630	8.739	130.566	105.63	81.05
1.593	630	9.989	156.101	129.16	82.74
1.631	630	11.148	178.369	149.83	84.00
1.641	630	11.671	187.882	155.61	82.82

สำหรับการจำลองเพื่อเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบ เงื่อนไขในการจำลองมีความสำคัญต่อผลอย่างยิ่ง เบื้องต้นเลือกการจำลองโดยการกำหนดค่าอัตราการไหลทางเข้า และกำหนดให้ความเร็วรอบของกังหันมีความเร็วคงที่ ผลการจำลองตามตารางที่ 2 จากผลการจำลองเบื้องต้น ค่ากำลังที่ได้มีค่าแตกต่างกันมาก เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ เนื่องจากค่าความดันทางเข้าต่ำกว่าความเป็นจริงมาก จึงส่งผลให้ค่ากำลังที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

ตารางที่ 2 การจำลองเงื่อนไขอัตราการไหลทางเข้าคงที่

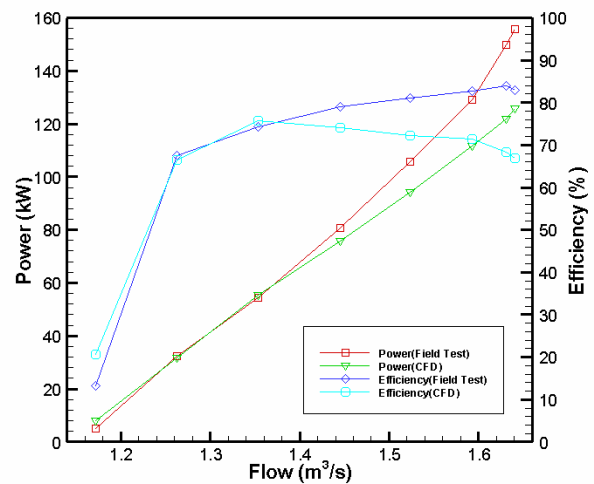
Q (m ³ /s)	RPM	ΔH (m)	Power _{input} (kW)	Torque (n-m)	Power _{output} (kW)	efficiency (%)
1.172	625	1.21	13.89	121.09	7.925322	57.05
1.263	625	2.26	28.00	138.38	9.05695	32.35
1.354	625	3.43	45.54	420.38	27.51	60.41
1.445	625	4.97	70.50	754.49	49.38126	70.04
1.523	625	6.34	94.79	1060.4	69.40302	73.22
1.593	625	6.61	99.84	1124.53	73.60032	73.72
1.631	625	8.21	131.41	1519.837	99.4731	75.70
1.641	625	8.39	135.10	1564.8	102.4159	75.81

เพื่อให้เงื่อนไขการจำลองใกล้เคียงกับการทดสอบมากที่สุด การจำลองชุดที่ 2 เลือกกำหนดความดันทางเข้า โดยใช้วิธีการปรับความเร็วรอบของกังหัน เพื่อให้ได้อัตราการไหลใกล้เคียงกับการทดสอบ ผลการจำลองตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การจำลองเงื่อนไขความดันทางเข้าคงที่

Q (m ³ /s)	RPM	ΔH (m)	Power _{input} (kW)	Torque (n-m)	Power _{output} (kW)	efficiency (%)
1.172	625	3.33	38.286	121.09	7.93	20.70
1.263	600	3.85	47.702	505.05	31.73	66.52
1.354	525	5.514	73.241	1008.4	55.44	75.69
1.445	520	7.206	102.148	1388.65	75.62	74.03
1.523	510	8.739	130.566	1765.007	94.26	72.20
1.593	515	9.989	156.101	2068.311	111.55	71.46
1.631	490	11.148	178.369	2372.483	121.74	68.25
1.641	475	11.671	187.882	2527.568	125.73	66.92

การกำหนดเงื่อนไขตามการจำลองชุดที่ 2 ส่งผลให้ค่าความเร็วรอบของกังหันต่างจากการทดสอบ แต่กำลังที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ รูปที่ 11 แสดงกำลังและประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำที่ได้จากการทดสอบ เทียบกับการจำลองชุดที่ 2 (ความดันทางเข้าคงที่)



รูปที่ 11 กำลังและประสิทธิภาพเครื่องกังหันน้ำ

6 สรุปผล

การจำลองทางด้าน CFD สามารถช่วยการออกแบบกังหันน้ำได้เป็นอย่างดี การกำหนดเงื่อนไขทางเข้ามีความสำคัญต่อการจำลองอย่างยิ่ง การกำหนดเงื่อนไขทางเข้าเป็น pressure inlet จะได้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่าการกำหนดทางเข้าเป็นแบบ Mass flow rate เนื่องจากการกำหนดทางเข้าเป็น pressure inlet สามารถปรับความเร็วรอบ เพื่อกำหนดค่าอัตราการไหลใกล้เคียงกับการทดสอบ

แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ให้เหมาะสมกับแหล่งน้ำภายในประเทศมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งบทความนี้ได้แสดงแนวทางการพัฒนาแบบพึ่งพาตัวเอง เริ่มจากการออกแบบ ผลิต และขั้นตอนการทดสอบ และสามารถจ่ายไฟฟ้าสู่สายส่ง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูง ใกล้เคียงกับบริษัทจากต่างประเทศ การขยายจำนวนโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กให้อยู่ตามแหล่งน้ำตามธรรมชาติจึงมีความเป็นไปได้อย่างสูง ถ้าได้รับการสนับสนุนจากทุกๆ ฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

7 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมงานวิจัยทุกท่าน โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ฝ่ายก่อสร้างพลังน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่เสียสละเวลาอันมีค่า ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมชลประทาน. www.rid.go.th
- [2] European small hydropower association. 1998. Layman's guidebook on how to develop a small hydro site.
- [3] ยอดชาย และคณะ, 2549. การออกแบบใบพัดสำหรับกังหันน้ำขนาดเล็กโดยอาศัยเทคนิคการจำลอง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20
- [4] Kiran, P. and Mahesh, S., 2006. New development of high head francis turbine at Jyoti Ltd. For small hydro power plant. Himalayan small hydropower summit, pp. 307-316.