

การประเมินสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหัน เพื่อใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

Performance Assessment of Small Centrifugal Pumps Running in Reverse Operation as Turbine for Electricity Generation in Pico-Hydro Station

แหลมทอง จันทร์พะวง* บรรชา บุคดาดี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี

34190

Lemthong Chanphavong* Bancha Buddadee

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,

Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

Tel : 0-4535-3308 E-mail: lemthong@hotmail.com

บทคัดย่อ

การใช้ปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ (Pump As Turbine- PAT) นับเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก เนื่องจากมีราคาถูก การติดตั้ง และดูแลรักษาง่าย ดังนั้น บทความนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอผลการทดลอง และประเมินสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งขนาด 65-40-264, 65-50-214 และ 80-65-205 (หน่วยทั้งหมดเป็น mm.) ที่ทำงานในโหมดของกังหันน้ำ (PAT) โดยทดลองที่ระดับแรงดันน้ำจ่ายคงที่ 1.2 bar (12.24 mH₂O) จากผลการทดลองพบว่าปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กสามารถทำงานในโหมดของกังหันน้ำได้ดี โดยมีค่าประสิทธิภาพร้อยละ 35.99 ร้อยละ 46.03 และ ร้อยละ 50.44 ที่อัตราการไหล 0.275 m³/min, 0.52 m³/min และ 0.763 m³/min ตามลำดับ กราฟสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งที่ทำงานในโหมดของกังหันน้ำมีลักษณะคล้ายกราฟสมรรถนะของกังหันน้ำจริง โดยค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำไหลผ่านปั๊มจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

คำหลัก โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ปั๊มหอยโข่ง พลังงานหมุนเวียน การประยุกต์ใช้ปั๊มเป็นกังหันน้ำ

Abstract

Using pump as turbine (PAT) is an attractive and suitable alternative for pico-hydro power. Pumps are relatively simple machines with no special designing while their installation, commissioning and maintenance are easy and cheap. The aims of this research are to present results and determine performance of small centrifugal pumps, models 65-40-264, 65-50-214 and 80-65-205 (all dimensions in- mm.) working in turbines mode. This experiment performed on a constant head of 1.2 bar. The results showed that the small centrifugal pumps reverse operation in turbine mode achieves good efficiency about 35.99%, 46.03% and 50.44% at flow rate up to 0.275 m³/min, 0.52 m³/min and 0.763 m³/min respectively. The performance curve of pumps as turbines are similar to that of conventional reaction turbines, where efficiency increased when increasing the flow rate of water through the pump until the maximum efficiency is reached. Then the efficiency is reduced when the flow rate increased.

Keywords: Pico-hydro power plant, centrifugal pump, renewable energy, pump as turbine

1. บทนำ

ประเทศไทยมีแหล่งน้ำตามธรรมชาติเป็นจำนวนมาก เช่น น้ำตกขนาดเล็ก แม่น้ำสายต่างๆ หรือ แหล่งเก็บน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้นแบบง่ายๆ เช่น ฝายกั้นน้ำ เขื่อนขนาดเล็ก และ ประตูน้ำต่างๆ แต่โดยทั่วไปแล้วแหล่งน้ำเหล่านี้มักมีระดับน้ำไม่สูงมากนัก นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำในแหล่งน้ำเหล่านี้ยังไม่คงที่โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล การจะใช้ประโยชน์ของพลังงานจากแหล่งน้ำเหล่านี้ ก็คือการนำกังหันน้ำขนาดเล็กมาติดตั้งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ปัญหาการใช้กังหันน้ำสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในแหล่งน้ำเหล่านี้ก็คือ การออกแบบกังหันน้ำยังมีความซับซ้อน และการผลิตภายในประเทศก็มีอยู่อย่างจำกัดเนื่องจากราคาสูง นอกจากนี้กังหันน้ำที่มีการผลิตออกมามาก จะออกแบบให้มีความเหมาะสมสำหรับแหล่งน้ำเฉพาะที่ทางเลือกของการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ การประยุกต์ใช้ปั๊มหอยโข่งทำหน้าที่เป็นกังหันน้ำแทน เนื่องจากว่ามีข้อดีหลายอย่าง และค่าใช้จ่ายค่อนข้างถูก การบำรุงรักษาบ่อย การติดตั้ง และใช้งานง่ายกว่า ปั๊มมีหลายแบบหลายขนาดให้เลือกมากกว่ากังหันน้ำ โดยหลักการทำงานพื้นฐานและส่วนประกอบสร้างของกังหันน้ำแรงปฏิกิริยา (reaction- turbine) มีความคล้ายคลึงกับปั๊มหอยโข่งหมุนกลับทิศทาง การประยุกต์ใช้ปั๊มทำงานในโหมดของกังหันน้ำเริ่มมีการศึกษามาแต่ประมาณปี ค.ศ. 1930 [1] ต่อมามีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก [2] โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปั๊มเป็นกังหันน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กจึงน่าจะยังมีความเหมาะสมสำหรับชุมชนห่างไกลที่มีเงื่อนไขใกล้เคียงกับแหล่งน้ำเช่น แม่น้ำ ในฟาร์ม และในระบบชลประทาน [3-4] โดยต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากการใช้ปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กเป็นกังหันน้ำ (small centrifugal pumps as turbines) มีค่าประมาณ US\$ 140/kW [5]

มีหลายงานวิจัยที่ได้อธิบายคุณลักษณะ และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสูงสุดของการทำงานในโหมดปั๊ม และกังหันน้ำบนพื้นฐานข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์ทางทฤษฎี [6, 9] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อทำนายประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งที่ทำงานใน

โหมดกังหันน้ำ [10, 11] นอกจากการยืนยันความถูกต้องของ CFD เทียบกับข้อมูลการทดลองแล้ว ผลการศึกษาเหล่านั้นยังมีความคลาดเคลื่อนสูง [12] และเมื่อศึกษาปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กชนิด Centrifugal Volute Pump และ Centrifugal Diffuser Pump พบว่า เมื่อทำงานในโหมดกังหันน้ำ ปั๊ม Centrifugal Volute Pump จะให้ค่าประสิทธิภาพเทียบเท่า หรือ สูงกว่าประสิทธิภาพของการทำงานในโหมดปั๊ม และมีศักยภาพดีกว่าปั๊มชนิด Centrifugal Diffuser Pump [13]

เนื่องจากปั๊มเมื่อทำงานในโหมดของกังหันน้ำ พฤติกรรมของมันจะเปลี่ยนไปทำให้การทำนายหาประสิทธิภาพมีความยุ่งยาก และข้อมูลการทดลองปั๊มเป็นกังหันน้ำยังมีไม่เพียงพอกับความหลากหลายของปั๊ม ดังนั้น การทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของปั๊มจึงมีความจำเป็นในการเลือกปั๊มให้เหมาะสมกับแหล่งน้ำตามธรรมชาติ บทความนี้ จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอผลการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ (pumps running in reverse operation as turbines) เพื่อใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

2. วิธีการศึกษา

ในการศึกษาดังนี้ เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (experimental research) เพื่อประเมินหาสมรรถนะการทำงานของปั๊มเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ โดยทำการทดสอบปั๊มหอยโข่งประเภท End Suction Centrifugal Pumps ที่มีใบพัดแบบปิด (closed impeller) ขนาด 65-40-264, 65-50-214 และ 80-65-205 (หน่วยทั้งหมดเป็น mm.) จากข้อมูลผู้ผลิต ปั๊มมีอัตราการไหลสูงสุด 0.40 m³/min, 0.60 m³/min และ 0.95 m³/min ตามลำดับ และ เฮด (head) สูงสุดของปั๊ม 12 m

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลองที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบสร้างขึ้นโดยมีลักษณะเป็นแหล่งน้ำเทียมในระดับห้องปฏิบัติการที่ประกอบด้วย อ่างกักเก็บน้ำที่มีปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับการขับเคลื่อนปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ โดยปั๊มจ่ายน้ำใช้มอเตอร์ขนาด 10 HP ที่อัตราการไหลสูงสุด 2.50 m³/min ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายน้ำให้กับชุดทดลอง ผ่านวาล์วที่ติดตั้งท่อด้านส่งเป็นตัวควบคุมอัตราการไหล และ ระดับน้ำตามที่ต้องการ อัตราการไหลของ

น้ำผ่านกังหันสามารถประเมินได้จากน้ำไหลผ่าน Weir (V-notch weir 90°) บั้มหอยโข่งขนาดเล็กได้ติดตั้งเข้ากับชุดทดลองในโหมดน้ำไหลกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ (reverse operation) สำหรับแรงบิดเพลลาของบั้มสามารถวัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดแบบเชือกรัด (rope brake) ที่ดัดแปลงจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ ความเร็วรอบที่เพลลาด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) และความดันที่ทางเข้า-ทางออกกังหันวัดด้วยมาตรวัดความดัน (pressure gauge) ขนาด 0 – 6 bar โดยอุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งรวมเป็นชุด ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณ

กำลังน้ำที่ใช้ขับบั้มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_w = \gamma Q H \quad (1)$$

โดยที่ P_w คือกำลังน้ำที่ใช้ขับบั้มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ มีหน่วยเป็น Watt Q คืออัตราการไหลของน้ำมีหน่วยเป็น m^3/sec H คือเฮด (head) คร่อมกังหันสุทธิมีหน่วยเป็น m และ γ คือน้ำหนักจำเพาะของน้ำมีหน่วยเป็น N/m^3

เฮดคร่อมกังหันสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + (Z_1 - Z_2) \quad (2)$$

โดยที่ Z_1 และ Z_2 คือระดับความสูงที่หน้าแปลนทางเข้า และ ทางออกของบั้มมีหน่วยเป็น m V_1 และ V_2 คือค่าความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านจุดหน้าแปลนทางเข้า และ ทางออกของบั้มมีหน่วยเป็น m/sec p_1 และ p_2 คือค่าความดันที่จุดหน้าแปลนทางเข้า และ ทางออกของบั้มมีหน่วยเป็น N/m^2 และ g คือค่าของแรงโน้มถ่วงโลกมีค่าเท่ากับ $9.81 m/sec^2$

สำหรับความเร็วน้ำที่ไหลผ่านกังหันสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำ โดยที่อัตราการไหลของน้ำวัดได้จากน้ำไหลผ่าน Weir (V-notch weir 90°) [14] ค่าคำนวณจากสมการ

$$Q = 4.28C \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (h + k)^{2.5} \quad (3)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลของน้ำผ่านฝายมีหน่วยเป็น m^3/sec C คือค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล θ คือค่ามุมปากของ weir มีหน่วยเป็นองศา h คือระดับน้ำใน V-notch weir มีหน่วยเป็น m และ k คือสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่าระดับน้ำ

แรงบิดเพลลาของบั้มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำสามารถวัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดแบบ Rope Brake [13] และคำนวณด้วยสมการ

$$T = (m_1 - m_2) g R \quad (4)$$

โดยที่ m_1 และ m_2 คือค่าที่อ่านได้จากตาชั่งของ Rope Brake มีหน่วยเป็น kg g คือค่าของแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ $9.81 m/sec^2$ และ R คือค่ารัศมีวงล้อของ Rope Brake ที่มีหน่วยเป็น m

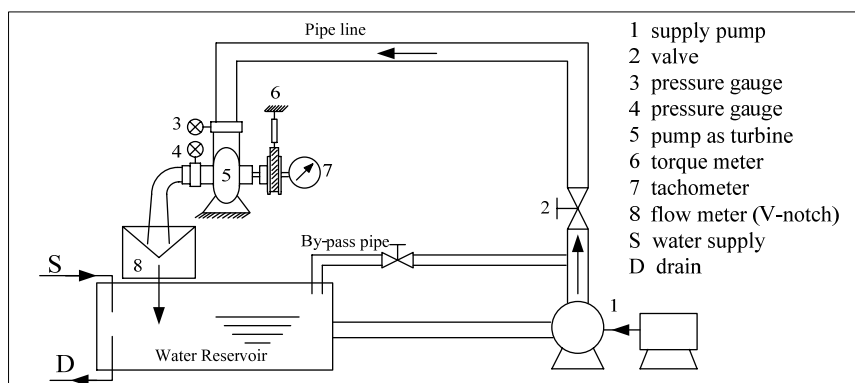
ดังนั้น กำลังที่บั้มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำผลิตได้ คือ

$$P_i = T \times \omega \quad (5)$$

โดยที่ ω คือค่าความเร็วเชิงมุม มีค่าเท่ากับ $2\pi n/60$ มีหน่วยเป็น rad/sec และ n คือค่าความเร็วรอบการหมุนของเพลลา มีหน่วยเป็น rpm

ประสิทธิภาพของบั้มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำสามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_{PAT} = \frac{P_i}{P_w} \quad (6)$$



รูปที่ 1 อุปกรณ์ของชุดทดลอง

3. ผลการทดลอง

ในการทดสอบนี้ดำเนินการทดสอบปั๊มขนาดเล็กในโหมตกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำจำนวน 3 ขนาดได้แก่ขนาด 65-40-264, 65-50-214 และ 80-65-205 (หน่วยทั้งหมดเป็น mm.) ที่เงื่อนไขระดับน้ำคงที่ 1.2 bar (12.24 mH₂O) ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 ถึง 3 และข้อมูลที่ได้เมื่อนำไปสร้างเป็นกราฟสมรรถนะของปั๊มที่ทำงานในโหมตของกังหัน จะได้ผลดังแสดงใน รูปที่ 2 ถึง รูปที่ 4

ตารางที่ 1 ผลการทดลองปั๊มขนาด 65-40-264

N (rpm)	P _t (W)	Q(m ³ /min)	H (m)	η (%)
815	62.76193	0.20120	13.13	14.53
770	122.5462	0.21839	13.25	25.91
695	164.1308	0.23032	13.34	32.68
625	195.7299	0.26184	13.59	33.64
560	215.6238	0.26843	13.65	35.99
420	194.0614	0.27513	13.71	31.47

ตารางที่ 2 ผลการทดลองปั๊มขนาด 65-50-214

N (rpm)	P _t (W)	Q(m ³ /min)	H (m)	η (%)
1275	183.2802	0.36743	13.13	23.24
1250	275.9471	0.40022	13.26	31.81
1230	347.3083	0.42592	13.37	37.32
1190	409.3258	0.46169	13.53	40.08
1145	464.3869	0.48023	13.62	43.43
1100	513.9034	0.50887	13.76	44.88
1040	539.2649	0.51864	13.82	46.03
982	559.6054	0.53850	13.92	45.65

จากการพิจารณากราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งขนาด 65-40-264 ที่ทำงานในโหมตกังหันพบว่ากำลังที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊มมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากกำลังเพลลาของกังหันน้ำเป็นอัตราส่วนขึ้นกับอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลกระทำต่อใบพัดตามหลักการโมเมนตัมของเครื่องจักรของไหล โดยกำลังที่ผลิตได้เริ่มต้นที่ 62.76 Watt เพิ่มขึ้นจนถึงค่ากำลังสูงสุด (P_{t,max}) 215.62 Watt ที่อัตราการไหล 0.27 m³/min และระดับความสูงน้ำคร่อมกังหัน 13.65 m จากนั้นจะมีค่าลดลงเป็น 194.06 Watt เมื่อค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้น สำหรับความสัมพันธ์ของอัตราการ

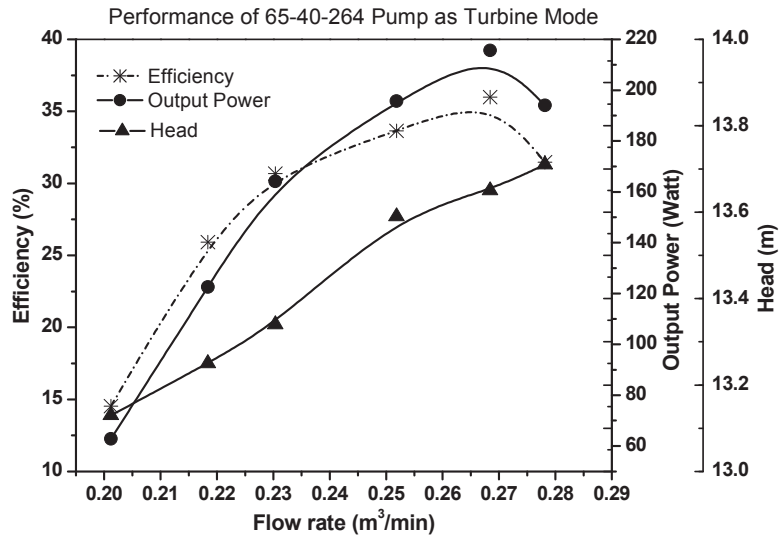
ไหลกับประสิทธิภาพก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับกำลังที่ผลิตได้ โดยผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของปั๊มที่ทำงานในโหมตของกังหันน้ำจะมีค่าสูงสุด (η_{max}) เท่ากับร้อยละ 35.99 ที่อัตราการไหล 0.27 m³/min และระดับความสูงน้ำคร่อมกังหัน 13.65 m (รูปที่ 2)

ตารางที่ 3 ผลการทดลองปั๊มขนาด 80-65-205

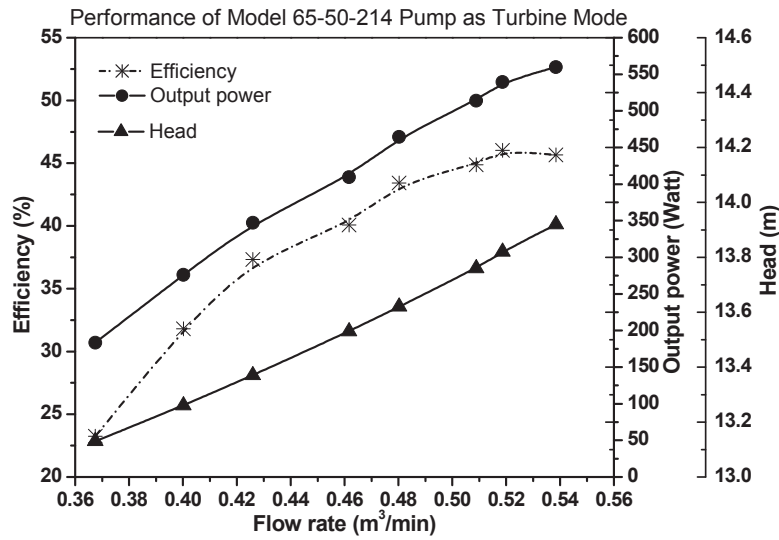
N (rpm)	P _t (W)	Q(m ³ /min)	H (m)	η (%)
1400	107.8119	0.52851	12.89	9.68
1375	204.7143	0.56915	12.96	16.97
1365	315.3498	0.60082	13.02	24.65
1344	407.0977	0.63353	13.08	30.04
1334	499.9494	0.65591	13.13	35.51
1326	592.257	0.69037	13.20	39.74
1314	667.8485	0.71393	13.25	43.17
1304	749.7958	0.73797	13.31	46.69
1289	840.4348	0.76248	13.37	50.44
1250	866.3456	0.78748	13.43	50.11

สำหรับกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งขนาด 65-50-214 และ ปั๊มหอยโข่งขนาด 80-65-205 ที่ทำงานในโหมตกังหันก็จะมีลักษณะคล้ายกัน โดยสำหรับปั๊มหอยโข่งขนาด 65-50-214 กำลังที่ผลิตได้สูงสุด (P_{t,max}) มีค่าเท่ากับ 559.6 Watt ที่อัตราการไหล 0.54 m³/min และระดับความสูงน้ำคร่อมกังหัน 13.92 m ส่วนประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) มีค่าเท่ากับร้อยละ 46.03 ที่อัตราการไหล 0.52 m³/min และระดับความสูงน้ำคร่อมกังหัน 13.82 m (รูปที่ 3) สำหรับปั๊มหอยโข่งขนาด 80-65-205 กำลังที่ผลิตได้สูงสุด (P_{t,max}) มีค่าเท่ากับ 866.35 Watt ที่อัตราการไหล 0.79 m³/min และระดับความสูงน้ำคร่อมกังหัน 13.43 m ส่วนประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) มีค่าเท่ากับร้อยละ 50.44 ที่อัตราการไหล 0.76 m³/min และระดับความสูงน้ำคร่อมกังหัน 13.37 m (รูปที่ 4)

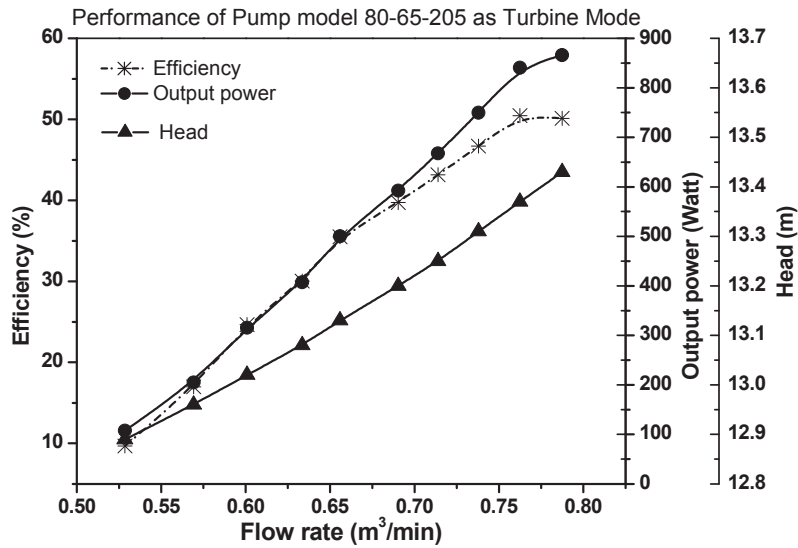
สำหรับกราฟเสดคร่อมกังหันพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มของอัตราการไหล เนื่องจากขอบเขตของการทดลองที่ควบคุมให้ระดับแรงดันน้ำมีค่าคงที่ จึงเป็นผลให้ค่าความสูงน้ำเปลี่ยนแปลงในช่วงที่สั้น ดังแสดงในรูปที่ 2 ถึง รูปที่ 4



รูปที่ 2 กราฟสมรรถนะของปั๊มขนาด 65-40-264 ในโหมดการทำงานเป็นกังหัน



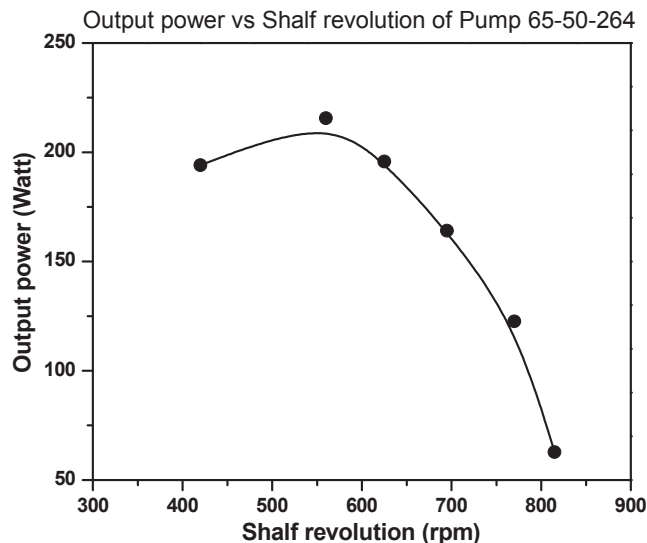
รูปที่ 3 กราฟสมรรถนะของปั๊มขนาด 65-40-214 ในโหมดการทำงานเป็นกังหัน



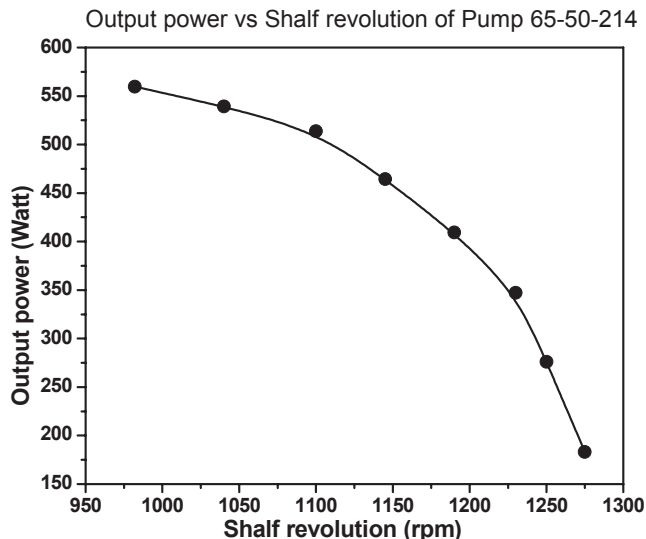
รูปที่ 4 กราฟสมรรถนะของปั๊มขนาด 65-40-205 ในโหมดการทำงานเป็นกังหัน

จากรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังที่ได้เทียบกับความเร็วรอบหมุนเพลลาของปั๊ม พบว่า เมื่อความเร็วรอบหมุนปั๊มสูงขึ้น ค่ากำลังที่ได้มีแนวโน้มลดลง และค่ากำลังสูงสุด ($P_{t,max}$) ของปั๊มโมเดล 65-40-264,

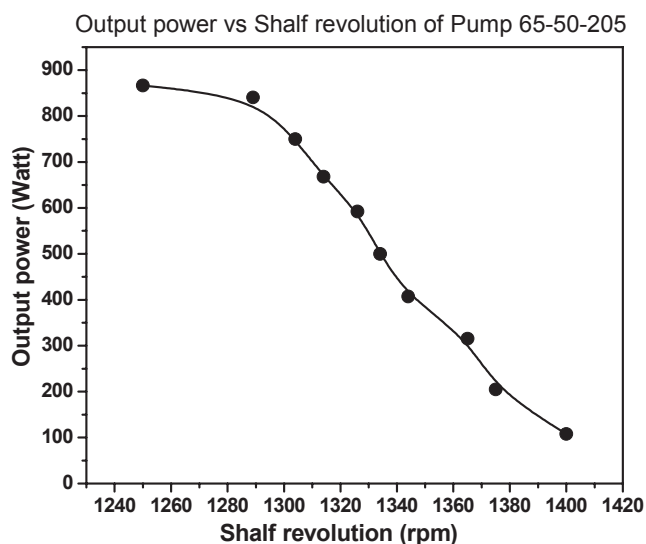
65-50-214 และ 80-65-205 มีค่าเท่ากับ 215.62 Watt, 559.6 Watt และ 866.35 Watt ที่ความเร็วรอบเพลลา 560 rpm, 982 rpm และ 1250 rpm ตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังกับความเร็วรอบหมุน ในโหมดการทำงานเป็นกังหันน้ำ



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังกับความเร็วยรอบหมุน ในโหมดการทำงานเป็นกังหันน้ำ



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังกับความเร็วยรอบหมุน ในโหมดการทำงานเป็นกังหันน้ำ

4. สรุป

จากผลการทดลองในกรณีระดับแรงดันน้ำคงที่ที่ 1.2 bar (12.24 mH₂O) แสดงให้เห็นว่า บั๊มหอยโข่งขนาดเล็ก สามารถทำงานในโหมดกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ระดับอัตราการไหลของน้ำระดับต่างๆ ได้ดี โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ ร้อยละ 35 ถึง ร้อยละ 50 กราฟสมรรถนะของบั๊มหอยโข่งที่ทำงานในโหมดของกังหันน้ำ มีลักษณะคล้ายกราฟสมรรถนะของกังหันน้ำจริงคือ ค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามการ

เพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำไหลผ่านบั๊มจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

กำลังของบั๊มที่ทำงานในโหมดของกังหันน้ำที่ผลิตได้ และสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม เกิดขึ้นในช่วงค่าความเร็วยรอบหมุนต่ำกว่า 1450 rpm ซึ่งเป็นความเร็วยรอบหมุนของเครื่องปั่นไฟทั่วไป ดังนั้น เมื่อนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อให้สอดคล้องกับความเร็วยรอบหมุนของเครื่องปั่นไฟ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และ สถานที่สำหรับการดำเนินการทดลอง รวมไปถึงอาจารย์ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Joshi, S., Gordon, A., Holloway, L., Chang, L. and Kojabadi, H. M. 2005. Development of a Stand Alone Micro-Hydro System using Pump as Turbine Technology for Low Head Sites in Remote Areas. Proceedings of the 20th International Power System Conference 2005.
- [2] Williams, A. A. 1996. Pumps as Turbines for Low cost Micro Hydro Power. World Renewable Congress, 9: 1227-1234.
- [3] Arriaga, M. 2009. Pump as Turbine – A pico-hydro alternative in Lao People's Democratic Republic. Renewable Energy, 35: 1109-1115.
- [4] Chuenchooklin, S. 2006. Development of Pico-Hydropower Plant for Farming Village in Upstream Watershed Thailand. Proceedings of the Prosperity and Poverty in a Globalised World Challenges for Agricultural Research, Tropentag, October 11-13, 2006.
- [5] Hline, P. T. and Wibulswas, P. 1987. The Feasibility of Using Small Centrifugal Pumps as Turbines. Renewable Energy Review Journal, 9: 13-20.
- [6] Gantar, M. 1988. Propeller Pumps Running as Turbines. Proceeding of the Hydraulic Machinery, Ljubljana, Yugoslavia, 1988.
- [7] Ramos, H and Borga, A. 1999. Pumps as Turbines: an unconventional solution to energy production. Urban Water, 1: 261-263.
- [8] Chapallaz, J. M., Eichenberger, P and Fischer, G. 1992. Manual on Pumps used as Turbines, Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- [9] Williams, A. 2003. Pumps as Turbines Users Guide, International Technology Publications, London, U.K.
- [10] Rawal, S and Kshirsagar, J. T. 2007. Numerical Simulation on a Pump Operating in a Turbine Mode. Proceedings of the 23rd International Pump Users Symposium, 2007.
- [11] Derakhshan, S and Nourbakhsh, A. 2008. Theoretical, Numerical and Experimental Investigation of Centrifugal Pumps in Reverse Operation. Experimental Thermal and Fluid Science, 32: 1620-1627.
- [12] Derakhshan, S and Nourbakhsh, A. 2008. Experimental Study of Characteristic Curves of Centrifugal Pumps Working as Turbines in Different Specific Speeds. Experimental Thermal and Fluid Science, 32: 800-807.
- [13] Suarda, M., Suarnadwipa, N and Adnyana, W. B. 2006. Experimental Work on Modification of Impeller Tips of a Centrifugal Pump as a Turbine. Proceedings of the 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment, Bangkok, Thailand, November 21-23, 2006.
- [14] LMNO Engineering, Research and Software Ltd. 2007. V-Notch (Triangular) Weir Calculator, available online: Dec. 11, 2009 <http://www.LMNOeng.com>