

การประเมินสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ

Assessment Performance of Centrifugal Pump Running in Reverse Operation as Hydro-Turbine

แหลมทอง จันทรพิวง* และ บรรณา บุคดาดี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 045 353 308, โทรสาร: 045 353 309

E-mail: lemthong@hotmail.com

บทคัดย่อ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก (Pico Hydro Power Station) เป็นระบบที่อาศัยแรงดันจากน้ำที่ถูกปล่อยลงจากที่สูงไปปั่นกังหันน้ำเพื่อขับเครื่องปั่นไฟ ซึ่งพลังงานที่ได้เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด ไม่มีมลพิษ ไม่ทำลายระบบนิเวศ ช่วยแก้ไข และ บรรเทาปัญหาการขาดแคลนพลังงานในเขตชนบทที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นอย่างดี การประยุกต์ใช้ปั๊มหอยโข่งที่มีการกลับทิศทางการไหลของน้ำ (Centrifugal Pump Running in Reverse Operation as Hydro-Turbine) นับเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นกังหันน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก เนื่องจากมีราคาถูก การติดตั้งดูแลรักษาง่าย และ ปั๊มหอยโข่งได้มีการผลิตออกมาหลายขนาด ทำให้สามารถควบคุมช่วงการทำงานของระดับแรงดันน้ำ และ อัตราการไหลที่กว้างขึ้น บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอผลการทดลองและประเมินสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งขนาด 65-40-264 (All dimensions in mm.) ที่มีการกลับทิศทางการไหลของน้ำเพื่อทำงานในโหมดของกังหันน้ำ โดยทดลองกับแหล่งน้ำที่มีแรงดันระหว่าง 100 - 150 kN/m² จากผลการทดลองพบว่าปั๊มหอยโข่งที่ทำงานในโหมดของกังหันน้ำ สามารถทำงานได้ดีโดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) เท่ากับ 40.89 % ที่อัตราการไหล 0.279 m³/min และ เหนือคร่อมปั๊มเมื่อใช้เป็นกังหันมีค่าเท่ากับ 15.78 m โดยกราฟสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งที่ทำงานในโหมดของกังหันน้ำ มีลักษณะเหมือนกราฟสมรรถนะของกังหันน้ำจริงคือค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำไหลผ่านปั๊มจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

คำหลัก: โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก, กังหันน้ำ, ปั๊มหอยโข่ง, พลังงานหมุนเวียน, การประยุกต์ใช้ปั๊มเป็นกังหันน้ำ

Abstract

Pico hydro-power plant is the very small hydro power station which utilizes the energy from falling water. It is considered as an environmental friendly energy technology since it produces no pollution to

the environment. Pico-hydro technologies are the technology that suitable to be used to provide electricity to isolated communities where the electricity grid is not available. Using pump as turbine (PAT) is attractive because this technology is relatively simple machines with no special designing while their installation, commissioning and maintenance are easy and cheap. Besides of that, the production of centrifugal pump is a mass production with various types and sizes, which make it available for a wide range of heads and flows. The aims of this research are to present results and determine performance of a small centrifugal pump model 65-40-264 (All dimensions in mm.) working as turbine. This experiment performed on water pressure between 100 - 150 kN/m². The results showed that the small centrifugal pump running in reverse operation as turbine achieves maximum efficiency of about 40.89% with the flow rate of 0.279 m³/min and head of about 15.78 mH₂O. 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 Station, Hydro Turbine, Centrifugal Pump, Renewable Energy, Pump as Turbine.

1. บทนำ

ประเทศไทยมีแหล่งน้ำตามธรรมชาติเป็นจำนวนมาก เช่น น้ำตกขนาดเล็ก แม่น้ำสายต่างๆ หรือ แหล่งเก็บน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้นแบบต่างๆ เช่น ฝาย เขื่อนขนาดเล็ก ประตูน้ำต่างๆ แต่โดยทั่วไปแล้ว แหล่งน้ำ เหล่านี้มักมีระดับน้ำไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ อัตราการไหลของน้ำในแหล่งน้ำเหล่านี้ยังไม่คงที่โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล การจะใช้ประโยชน์ของพลังงานจากแหล่งน้ำเหล่านี้ ก็คือการนำกังหันน้ำขนาดเล็กมาติดตั้งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ปัญหาของการใช้กังหันน้ำสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในแหล่งน้ำเหล่านี้ก็คือ การออกแบบกังหันน้ำยังมีความซับซ้อน และ การผลิตภายในประเทศก็ยังมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากราคาสูง อีกอย่างกังหันน้ำที่มีการผลิตออกมาส่วนมาก จะ ออกแบบให้มีความเหมาะสมสำหรับแหล่งน้ำที่มี ศักยภาพเฉพาะ ทางเลือกของการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ การประยุกต์ใช้ปั๊มหอยโข่งทำหน้าที่เป็นกังหันน้ำแทน เพราะหลักการทำงานพื้นฐาน และ ส่วนประกอบสร้างของกังหันน้ำแรงปฏิกิริยา (Reaction turbine) มีความคล้ายคลึงกับปั๊ม

หอยโข่งหมุนกลับทิศทาง การใช้ปั๊มทำงานในโหมดของกังหันน้ำ (Pumps Working as Turbines) เริ่มมีการศึกษาเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1930 [1] ต่อมา มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้เพื่อลดต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก [2] การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปั๊มเป็นกังหันน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า พลังน้ำขนาดเล็กก็ยังคงมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นสำหรับ ชุมชนห่างไกลที่มีเงื่อนไขใกล้เคียงกับแหล่งน้ำ เช่น แม่น้ำ ในฟาร์ม และ ในระบบชลประทาน [3-4] ทั้งนี้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากการใช้ปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กเป็นกังหันน้ำ (Small Centrifugal Pumps as Turbines) อยู่ที่ US\$ 140/kW [5]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้อธิบายคุณลักษณะ และ ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสูงสุดของการทำงานในโหมดปั๊ม และ กังหันน้ำบนพื้นฐานข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และ การวิเคราะห์ทางทฤษฎี [6-9] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อทำนายประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งที่ทำงานในโหมดกังหันน้ำ [10, 11] นอกจากการยืนยันความถูกต้องของ CFD เทียบกับข้อมูลการ

ทดลองแล้ว ผลการศึกษาเหล่านั้นพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนสูง [12] และเมื่อศึกษาปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กชนิด Centrifugal Volute-Pump เมื่อทำงานเป็นกังหันน้ำจะให้ค่าประสิทธิภาพเทียบเท่า หรือ สูงกว่า ประสิทธิภาพของการทำงานในโหมดปั๊ม และมีศักยภาพดีกว่าปั๊มชนิด Centrifugal Diffuser-Pump [13]

เนื่องจากปั๊มเมื่อทำงานเป็นกังหันน้ำ พฤติกรรมของมันจะเปลี่ยนไปทำให้การทำงานหาประสิทธิภาพมีความยุ่งยาก และ ข้อมูลการทดลองปั๊มเป็นกังหันน้ำ ยังมีไม่เพียงพอกับความหลากหลายของปั๊ม ดังนั้น การทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของปั๊มจึงมีความจำเป็นในการเลือกปั๊มให้เหมาะสมกับแหล่งน้ำตาม ธรรมชาติ บทความนี้จึงมีจุดมุ่งหมาย เพื่อนำเสนอผลการทดลองและประเมินสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กที่มีการกลับทิศทางการไหลของน้ำเพื่อ ทำงานในโหมดของกังหันน้ำ (Pump Running in Reverse Operation as Turbine)

2. ระเบียบวิธีวิจัย

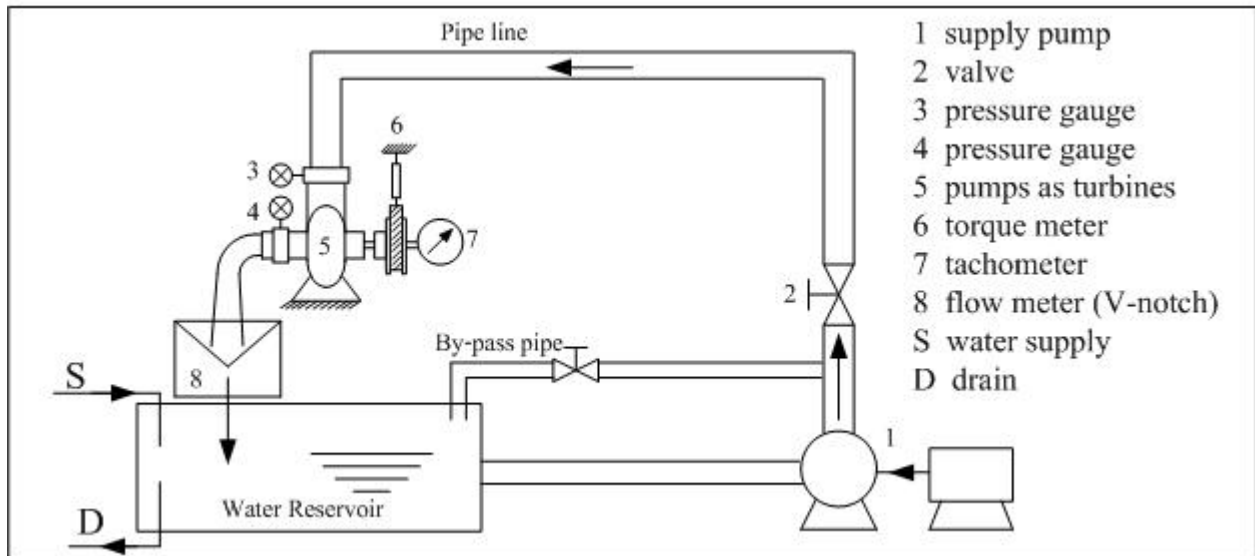
ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อประเมินหาสมรรถนะการทำงานของปั๊มเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ โดยทำการทดสอบปั๊มหอยโข่งประเภท End Suction Centrifugal Pumps ที่มีใบพัดแบบปิด

(Closed Impeller) ขนาด 65-40-264 (All dimensions in mm.) จากข้อมูลผู้ผลิตปั๊มมีอัตราการไหลสูงสุด

0.40 m³/min และ เสด (Head) สูงสุดของปั๊มเท่ากับ 12 m

2.1. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

ชุดทดลองที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบสร้างขึ้น โดยมีลักษณะเป็นแหล่งน้ำเทียม ในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ประกอบด้วย อ่างกักเก็บน้ำที่มีปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับการขับเคลื่อนปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำ โดยปั๊มจ่ายน้ำใช้มอเตอร์ขนาด 10 HP ที่อัตราการไหลสูงสุด 2.50 m³/min ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายน้ำให้กับชุดทดลอง ผ่านวาล์วที่ติดตั้งท่อด้านส่งเป็นตัวควบคุมอัตราการไหล และ ระดับน้ำตามที่ต้องการอัตราการไหลของน้ำผ่านกังหันสามารถประเมินได้จากน้ำไหลผ่าน Weir (V-notch Weir 90°) ปั๊มหอยโข่งขนาดเล็กได้ติดตั้งเข้ากับชุดทดลองในโหมดน้ำไหลกลับทิศทาง เป็นกังหันน้ำ (Reverse Operation) สำหรับแรงบิดเพลลาของปั๊มสามารถวัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดแบบเชือกรัด (Rope Brake) ที่ดัดแปลงจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ ความเร็วรอบที่เพลลาวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) และความดันที่ทางเข้า-ทางออกกังหันวัดด้วยมาตรวัดความดัน (Pressure Gauge) ขนาด 0 ห้า 6 bar โดยอุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งรวมเป็นชุด ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์ของชุดทดลอง

2.2. ทฤษฎี

กำลังน้ำทางทฤษฎีที่ใช้ขับเคลื่อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ

P_w = กำลังน้ำทางทฤษฎี (Watt)

Q = อัตราการไหลของน้ำ (m^3/sec)

H = เฮดคล่อมกั้นน้ำสุทธิ (m)

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (N/m^3)

เฮดคล่อมกั้นน้ำสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ

Z_1, Z_2 = ระดับความสูงที่หน้าแปลนทางเข้าและทางออก (m)

V_1, V_2 = ความเร็วน้ำที่หน้าแปลนทางเข้าและทางออก (m/sec)

p_1, p_2 = ความดันที่หน้าแปลนทางเข้าและทางออก (N/m^2)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (m/sec^2)

ความเร็วน้ำที่ไหลผ่านกั้นน้ำคำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำ โดยอัตราการไหลของน้ำวัดได้จาก น้ำไหลผ่าน Weir (V-notch Weir 90°) [14] โดยที่

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

Q = อัตราการไหลของน้ำ (m^3/sec)

C = สัมประสิทธิ์อัตราการไหล

θ = มุมปากของ Weir (Degrees)

h = ระดับน้ำใน V-notch Weir (m)

k = สัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่าระดับน้ำ

แรงบิดเพลของปั๊มเป็นกังหันน้ำสามารถคำนวณจากสมการของเครื่องวัดแรงบิดแบบ Rope Brake [13] ดังนี้

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

เมื่อ

m_1, m_2 = ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งของ Rope Brake (Kg)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (m/sec^2)

R = รัศมีวงล้อของ Rope Brake (m)

ดังนั้น กำลังที่ปั๊มเป็นกังหันน้ำผลิตได้ คือ

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

$$\omega = 2\pi n / 60 \quad (6)$$

โดยที่

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

n = ค่าความเร็วรอบของเพล (rpm)

ประสิทธิภาพของปั๊มเป็นกังหันน้ำสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 6

$$\eta_{PAT} = \frac{P_t}{P_w} \quad (7)$$

2.3. การดำเนินการทดลอง

ติดตั้งเครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับดำเนินการทดลองต่างๆตามรูปที่ 1 และดำเนินการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของปั๊มเป็นกังหันน้ำตามขั้นตอนดังนี้

1. เปิดวาล์วหมายเลข 2 ทางท่อด้านส่งน้ำของปั๊มจ่ายน้ำหมายเลข 1 แล้วกดสวิตช์เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

2. ปรับวาล์วหมายเลข 2 เพื่อให้ได้ระดับแรงดัน

น้ำจ่ายตามที่ต้องการ ($100 - 150 \text{ kN/m}^2$) โดยสังเกตจากมาตรวัดความดัน (Pressure - gauge) หมายเลข 3

3. เพิ่มภาระเบรกให้กับปั๊มเป็นกังหันน้ำ (หมายเลข 6) จะพบว่าระดับแรงดันน้ำจ่ายจะลดต่ำลงโดยสังเกตจากมาตรวัดความดัน หมายเลข 3 จากนั้นทำการปรับวาล์วหมายเลข 2 เพื่อให้ได้ระดับแรงดันน้ำจ่ายมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการตามข้อ 2.

4. ทำการบันทึกข้อมูลเช่น ภาระเบรก ความดันที่ทางเข้า และทางออกของปั๊ม ความเร็วรอบหมุนระดับน้ำเหนือ Weir

5. ทำการทดลองขั้นตอนที่ 3 และ 4 ซ้ำอีกครั้ง โดยเพิ่มภาระที่เบรก (หมายเลข 6) ขึ้นเรื่อยๆ จากภาระต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุด ที่สามารถคงระดับแรงดันน้ำจ่ายที่ได้

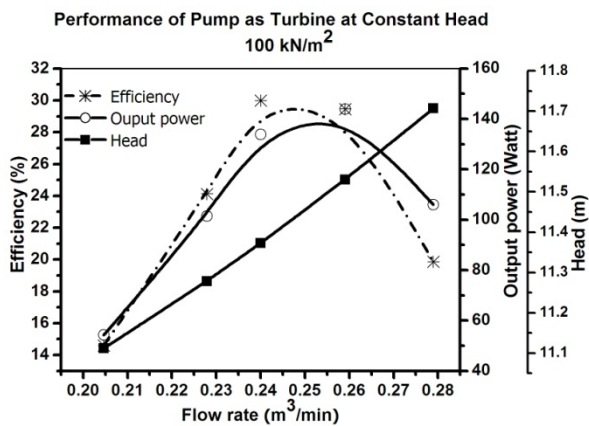
โดยในการทดสอบนี้ดำเนินการทดสอบที่ระดับแรงดันน้ำจ่ายทั้งหมด 6 ค่า คือ 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 kN/m^2 ตามลำดับ

3. ผลการทดลอง และ การวิเคราะห์ผล

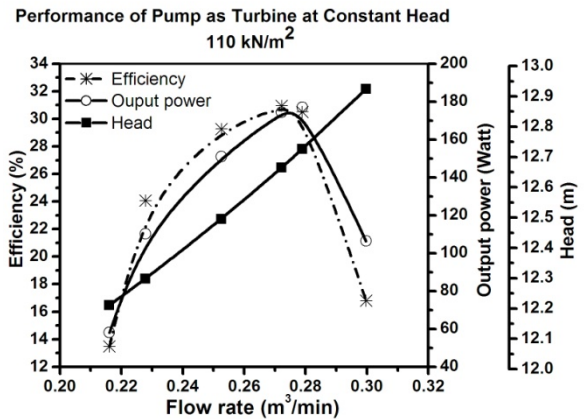
ผลการทดลองปั๊มหอยโข่งเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำจ่ายที่ระดับแรงดันน้ำจ่าย $100 - 150 \text{ kN/m}^2$ เมื่อนำมาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะพบว่ากราฟสมรรถนะที่ทุกระดับความดันน้ำจ่ายจะมีลักษณะคล้ายกันคือ เมื่ออัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น เฮดคร่อมปั๊มเป็นกังหันน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ส่วนกำลังที่เพลของปั๊มในโหมดกังหันน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊ม เนื่องจากกำลังของกังหันน้ำเป็นอัตราส่วนขึ้นกับอัตราการไหลเชิงมวลตามหลักการโมเมนตัม ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับประสิทธิภาพพบว่าค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำไหลผ่านปั๊มจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง แม้ว่าจะเพิ่มอัตราการไหล นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟแสดงสมรรถนะของ

ปั๊มเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟแสดงสมรรถนะของกังหันน้ำจริงอีกด้วย โดยกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำจ่าย 100 – 150 kN/m² ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 7 ตามลำดับ

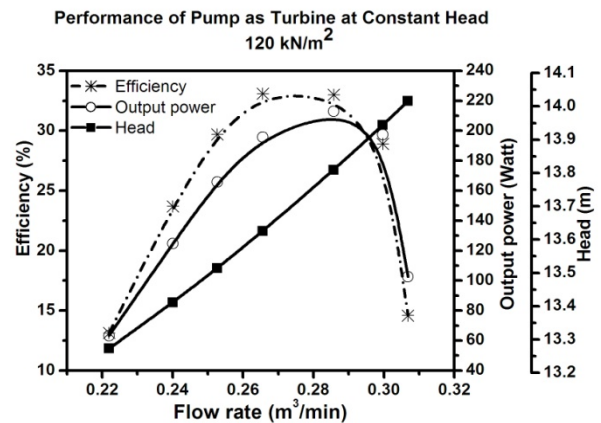
เมื่อพิจารณารายละเอียดของกราฟแสดงสมรรถนะที่ทุกระดับความดัน (รูปที่ 2 – 7) พบว่ากำลังของปั๊มเมื่อใช้หมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันน้ำจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในเรื่องประสิทธิภาพพบว่าที่ระดับแรงดันน้ำจ่าย 140 kN/m² มีศักยภาพเหมาะสมกว่าแหล่งน้ำระดับอื่น ทั้งนี้เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) คือ เท่ากับ 40.89 % ที่อัตราการไหล 0.279 m³/min และ ระดับเฮดคร่อมปั๊มในโหมดกังหันน้ำเท่ากับ 15.78 m โดยที่จุดดังกล่าวปั๊มในโหมดกังหันน้ำสามารถผลิตกำลังงานได้ 294.32 Watt ดังแสดงในรูปที่ 6



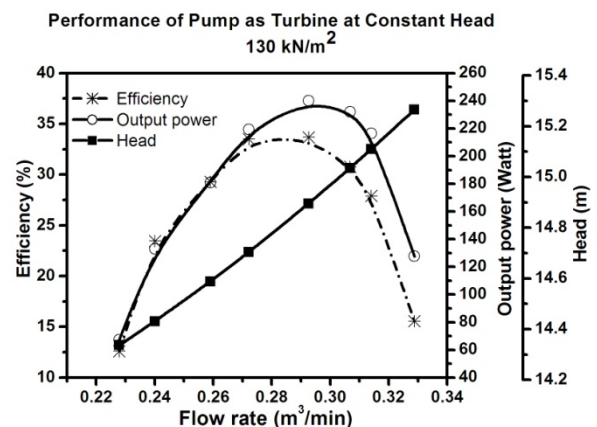
รูปที่ 2 กราฟสมรรถนะของปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำคงที่ 100 kN/m²



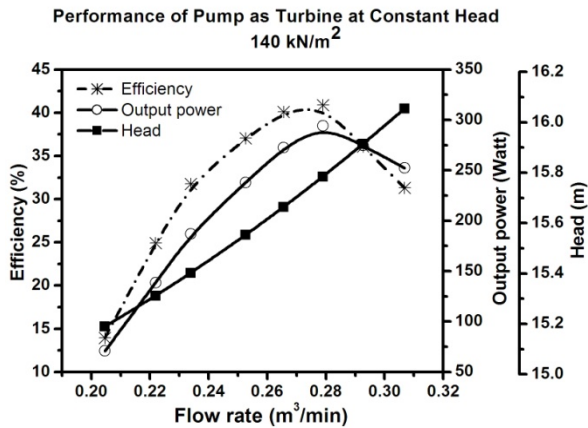
รูปที่ 3 กราฟสมรรถนะของปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำคงที่ 110 kN/m²



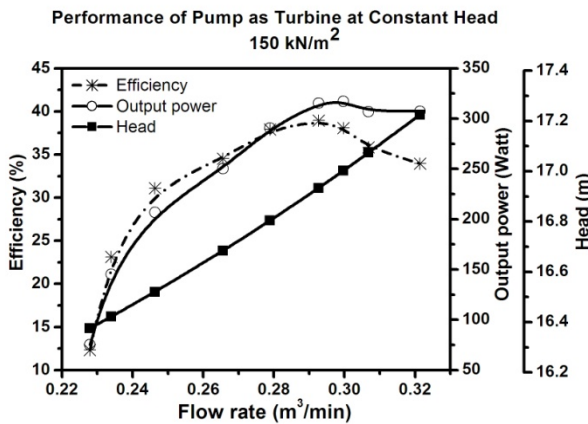
รูปที่ 4 กราฟสมรรถนะของปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำคงที่ 120 kN/m²



รูปที่ 5 กราฟสมรรถนะของปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็นกังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำคงที่ 130 kN/m²



รูปที่ 6 กราฟสมรรถนะของปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็น
กังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำคงที่ 140 kN/m²



รูปที่ 7 กราฟสมรรถนะของปั๊มหมุนกลับทิศทางเป็น
กังหันน้ำที่ระดับแรงดันน้ำคงที่ 150 kN/m²

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า ปั๊มหอยโข่งขนาด 65-40-264 สามารถทำงานในโหมดของกังหันน้ำ (PAT) ได้เป็นอย่างดี การทำงานเชิงกลเรียบ และ เรียบ ประสิทธิภาพสูงสุดของปั๊มเมื่อใช้เป็นกังหันน้ำมีค่าอยู่ใน ระดับที่น่าพอใจ (η_{max} เท่ากับ 40.89 %) กราฟสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งที่ทำงานในโหมดของกังหันน้ำ มีลักษณะคล้ายกราฟสมรรถนะของกังหันน้ำจริงคือ ค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำไหลผ่านปั๊มจนถึงค่าสูงสุด

หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ รวมไปถึงอาจารย์ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยครั้งนี้

6. 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*, Vol. 9(1-4), December 1996, pp. 1227-1234.
- [3] Arriaga, M. (2009). Pump as Turbine – A pico-hydro alternative in Lao People's Democratic Republic, *Renewable Energy*, Vol. 35(5), May 2010, pp. 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 2006*.
- [5] Hline, P. T. and Wibulswas, P. (1987). The Feasibility of Using Small Centrifugal Pumps as Turbines, *Renewable Energy Review Journal*, Vol. 9(1), June 1987, pp. 13-20.
- [6] Gantar, M. (1988). Propeller Pumps Running as Turbines, *Proceeding of the Hydraulic Machinery 1988*, Ljubljana, Yugoslavia.
- [7] Ramos, H and Borga, A. (1999). Pumps as Turbines: an unconventional solution to energy

production, *Urban Water*, Vol.1(3). September 1999, pp. 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.

[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*, Vol. 32(8), September 2008, pp. 1620-1627.

[12] Derakhshan, S and Nourbakhsh, A. (2007). Experimental Study of Characteristic Curves of Centrifugal Pumps Working as Turbines in Different Specific Speeds, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32(3), January 2007, pp. 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 2006*, Bangkok, Thailand.

[14] LMNO Engineering, Research and Software Ltd. (2007). *V-Notch (Triangular) Weir Calculator*, available online at <http://www.LMNOeng.com>