

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำ ของระบบสูบน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง

The Mathematical Modeling for a Study of Suction Heads of a Continuous Operation Thermal Water Pump with Steam System

จิรวัดน์ สิตรานนท์^{1*} กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์² ณัฐพล รุ่งประแสง³

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี, 20110

²ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ, 10800

³กองกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

17 ถนนพระราม 1 แขวงรอบเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ, 10300

Jirawat Sitranon^{1*} Kittiwoot Sutthivirode² Natthaphon Roonprasang³

¹School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bang Phra Sub-district, Siracha District, Chonburi 20110

²Department of Mechanical Education, Faculty of Industrial Education, King Mongkut's University
of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

³Bureau of Energy Regulation and Conservation, Department of Alternative Energy Development
and Efficiency, Ministry of Energy

17 Rama 1 Road, Rong Muang, Pathum Wan, Bangkok 10330

*Corresponding author Email: Jirawat_solar@hotmail.com

(Received: April 29, 2020; Accepted: December 28, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำของระบบสูบน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ ซึ่งระบบประกอบด้วย ถังผลิตไอน้ำ ถังสูบน้ำ ถังน้ำหล่อเย็น โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2-8 เมตร เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง และเปรียบเทียบความแตกต่างกับการทดลองของ อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิถังสูบน้ำ และความดันในถังสูบน้ำ จากการศึกษาพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง ระบบใช้เวลานาน แต่ในรอบถัดไปจะใช้พลังงานและระยะเวลาในการทำงานน้อยลง เมื่อระดับความสูงในการสูบน้ำเพิ่ม มากขึ้นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูบน้ำได้จะลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อระยะเวลาในการทำงานแต่ละรอบเพิ่มมากขึ้นและ จำนวนรอบจะลดลง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพปั๊มน้ำยังคงเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงในการสูบน้ำเพิ่มขึ้น ผลของระดับความสูง 8 เมตร พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ 112 กิโลจูล ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ 1.86619% ปริมาณน้ำที่สูบน้ำได้ 1,428 ลิตร และผลที่ ระดับความสูง 2 เมตร พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ 40 กิโลจูล ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ 0.66649% ปริมาณน้ำที่สูบน้ำได้ 2,040 ลิตร สรุปได้ว่าการเพิ่มระดับความสูงในการสูบน้ำช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพปั๊มน้ำให้สูงขึ้น จากงานวิจัยของ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.7145, 1.8714 และ 8.3831% สำหรับอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิถังสูบน้ำ และความดันในถังสูบน้ำ

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ ปั๊มน้ำความร้อน

ABSTRACT

The objectives of this article was to study the suction heads of a thermal water pump with steam system. The system consisted of a steam tank, condenser tank and feed water tank. However, in this research we studied the suction head of 2 - 8 m for 10 hours per test. However, in this research we studied the suction head of 2 - 8 m for 10 hours per test and compare the different with the experiments of the water temperature in the steam tank, temperature in the condenser tank and pressure inside the condenser tank. From the study we found a long beginning operating time. However, for the next cycle, it might use less energy and had short operating time. When the suction head increased, the total pumped water volume was reduced. But on the contrary the pumping cycle time was increased. The number of pumping cycles then decreased. However, pumping efficiency increased with the suction heads increases. At 8 m head, we got 112 kJ potential energy stored, 1.86619% pump efficiency and 1,428 L pumped water and at the 2 m head: the potential energy stored was 40 kJ, the pump efficiency was 0.66649% and the pumped water was 2,040 L. In conclusion, increasing the suction head enhanced the pump efficiencies. From this research of the mathematical model were different from the measured values by 0.7145, 1.8714 and 8.3831% for the water temperature in the steam tank, temperature in the condenser tank and pressure inside the condenser tank.

Keyword: Mathematical model, Pump efficiency, Thermal water pump.

1. บทนำ

น้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งกับชีวิตของพืชและสัตว์บนโลกรวมทั้งมนุษย์เราด้วย เป็นทรัพยากรที่สามารถเกิดหมุนเวียนได้เรื่อย ๆ ไม่มีวันหมด เป็นแหล่งกำเนิดชีวิตของสัตว์และพืช คนเรามีชีวิตอยู่โดยขาดน้ำได้ไม่เกิน 3 วัน และยังมีความจำเป็นทั้งในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศ ดังนั้นการนำน้ำมาใช้ก็นับว่าเป็นปัญหาอย่างหนึ่งที่จะต้องตอบสนองความเพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งปัจจัยสำคัญในการชลประทานก็คือการสูบน้ำ โดยใช้พลังงานส่วนใหญ่จาก น้ำมัน และไฟฟ้า

การสูบน้ำเพื่อการเกษตร ถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นมากสำหรับประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการพื้นฐานด้านเกษตรกรรม การเพาะปลูก 1 ไร่ ต้องใช้น้ำ 1,000 m³/year โดยประมาณ [1] ปัจจุบันเกษตรกรใช้เครื่องสูบน้ำด้วยพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นส่วนใหญ่ มีบางท้องที่ใช้เครื่องสูบน้ำด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในพื้นที่ที่มีไฟฟ้าใช้ การสูบน้ำด้วยไฟฟ้าก็ยังมีข้อจำกัด เฉพาะบริเวณที่มีสายส่งถึงส่วนบริเวณที่ไม่มีสายส่งถึง ที่เป็นบริเวณการเกษตรทางไฟฟ้าหลายกิโลเมตร และมีความต้องการน้ำ จะไม่สามารถสูบน้ำด้วยไฟฟ้าได้ แต่เนื่องจากการเกษตรส่วนใหญ่ที่ใช้เครื่องสูบน้ำแบบใช้

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคมพ.ศ. 2563

น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง มีต้นทุนภายใต้เงื่อนไขราคา น้ำมันที่เป็นอยู่ปัจจุบัน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิงมากขึ้น เมื่อต้องการสูบน้ำในปริมาณที่มากขึ้น การใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ในการสูบน้ำโดยวิธีการเปลี่ยนพลังงานโดยตรงผ่านเซลล์รังสีอาทิตย์ และปั๊มไฟฟ้า พบว่าระบบดังกล่าวมีต้นทุนการสูบน้ำต่อหน่วยสูง

การออกแบบเครื่องสูบน้ำ โดยที่ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทำงานอัตโนมัติแบบซาเวรี ใช้อุณหภูมิมากกว่า 100 °C โดยให้ใช้ตัวรวมแสงในการผลิตไอน้ำ โดยมีประสิทธิภาพปั๊มประมาณ 4.5% แต่ยังมี การสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่ง ในขณะที่ทำให้น้ำจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกลายเป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 100 °C และการสูญเสียไปกับการกลั่นตัวของไอน้ำ [2]

การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเพื่อการขับเคลื่อนน้ำ โดยควบคุมการไหลของของเหลวด้วยวาล์วกันกลับ อาศัยกลไกการขยายตัวของไอและของเหลว ที่เกิดขึ้นจากความร้อนเป็นการทำงานของระบบปั๊มน้ำ และการควบแน่นของการระบายความร้อนด้วยอากาศ จนทำให้เกิดความดันสุญญากาศในการสูบน้ำ การเคลื่อนของของเหลวทำหน้าที่เป็นลูกสูบเหลวในการปั๊มน้ำ [3]

การออกแบบปั๊มความร้อน ขึ้นอยู่กับแหล่งความร้อนและความสูงในการส่งน้ำ ถ้าเกิดจากการสูบน้ำ ระดับความสูงในการสูบน้ำจะมีความสำคัญอย่างมากในการเลือกแหล่งความร้อน หากแหล่งความร้อนถูกกำหนดแล้ว การเลือกสารทำงานเป็นทางเลือกเดียวที่จะกำหนดระดับความสูงในด้านส่งและด้านสูบได้ ตามความดันในการทำงาน [4]

การเลือกสารทำงานที่เข้ากันได้กับวัสดุของไดอะแฟรม ซึ่งการเลือกสารทำงานจะส่งผลโดยตรงกับอุณหภูมิของการระเหย และการควบแน่น ทำให้จำเป็นต้องเลือกแหล่งความร้อนที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้ปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นไดอะแฟรมให้สอดคล้องกับสารทำงาน ซึ่งจะกระทบกับการออกแบบปั๊มน้อยที่สุด เพื่อเป็นการประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำได้ [5] ปั๊มไดอะแฟรมมักถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งใน

การสูบน้ำขนาดเล็กกระหว่างสารทำงาน 2 ชนิด ที่ไม่ต้องการให้สารทำงานทั้งสองชนิดรวมตัวกัน การออกแบบปั๊มที่ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่โดยใช้ความร้อนและแรงโน้มถ่วงช่วยในการขับเคลื่อนสารทำงาน และนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนจากชีวมวล [6]

การปั๊มน้ำโดยอาศัยการขยายตัวของไอน้ำ ความดันที่ตั้งไว้สำหรับใช้ในการส่งน้ำแปรผันตรงกับปริมาตรในการส่งน้ำ สมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับปริมาตรน้ำที่สูบได้ และความสูง ประสิทธิภาพในการสูบน้ำมีค่าประมาณ 0.03% ที่ความสูงรวม 2-3 m [7] ในปี พ.ศ. 2555 ได้มีการจดอนุสิทธิบัตรเรื่อง ปั๊มน้ำพลังงานความร้อน ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [8]

การประยุกต์การนำระบบปั๊มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ โดยการใช้ไอน้ำขับเคลื่อนอากาศ ไปทดลองใช้งานจริงสำหรับการเกษตร โดยการแทนที่ปริมาตรอากาศด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้พลังงานความร้อนจากฟืน เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพปั๊มน้ำของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ไอน้ำเป็นสารทำงาน และหล่อเย็นด้วยอากาศ จากวัฏจักรคาร์โนต์สามารถสูบน้ำได้ที่ระดับความลึก 10.3 m และมีค่าประสิทธิภาพปั๊มน้ำสูงสุด 4.5% การพัฒนาระบบสูบน้ำโดยใช้ไอน้ำเป็นสารทำงาน และหล่อเย็นด้วยน้ำโดยตรง สามารถสูบน้ำได้ที่ระดับความลึก 2-6 m และมีค่าประสิทธิภาพปั๊มน้ำอยู่ในช่วง 0.028-0.0489% ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรน้ำที่สูบได้ และการเพิ่มความสูงในการสูบน้ำจะส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพปั๊มน้ำ เป็นที่มาของระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำที่ใช้ถังสูบน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งพบว่ามีค่าประสิทธิภาพปั๊มน้ำ 0.041% สามารถสูบน้ำได้ที่ระดับความลึก 3 m แต่ระบบดังกล่าวยังไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ระบบสามารถสูบน้ำได้เพียงแค่อบเดียว [9]

การจำลองอุณหภูมิผสมที่ทำให้เกิดความดันสุญญากาศ โดยมีขนาดถังสูบน้ำ ตั้งแต่ 100-1,000 L พบว่าความดันสุญญากาศไม่มีการเปลี่ยนตามขนาดของถังสูบน้ำ แต่กลับพบว่าต้องใช้ปริมาณน้ำหล่อเย็นมากขึ้น

ตามขนาดถังสูบน้ำ และประสิทธิภาพปั้มน้ำเฉลี่ยสูงขึ้นตามขนาดถัง [10]

การทดลองการสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ ปริมาตรถังสูบน้ำ 240 L ควบคุมการทำงานด้วยมือ ที่การจำลองการให้พลังงานความร้อนด้วยไฟฟ้าจนถึงสูบน้ำมีอุณหภูมิ 97 °C และระบายความร้อนด้วยอากาศ ประสิทธิภาพปั้มเพิ่มขึ้นตามความสูง 0.03, 0.09 และ 0.15% ที่ระดับความลึกในการสูบน้ำ 1, 3 และ 5 m ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมลดลงจะเกิดการควบแน่นภายในถังสูบน้ำได้ง่ายขึ้น และจะใช้ระยะเวลาในการระบายความร้อนลดลง ซึ่งส่งผลเพียงเล็กน้อยกับประสิทธิภาพปั้ม ดังนั้นการใช้น้ำหล่อเย็นแทนการระบายความร้อนด้วยอากาศ จะลดระยะเวลาในการระบายความร้อนลง 87.5% แต่ก็ไม่ส่งผลกระทบกับประสิทธิภาพปั้มมากนัก [11] การศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อความสูงในการส่งน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนสะสมจะลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลงตามไปด้วย แต่อุณหภูมิที่ผลิตได้จะสูงขึ้นตามความสูงในการส่งน้ำ [12]

การเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน โดยใช้อุณหภูมิอ้างอิงของเหลวอิ่มตัวของสารทำงาน เพื่ออธิบายพฤติกรรมของเอนทัลปี ในช่วงที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นไอ เมื่อป้อนพลังงานเข้าไป แต่ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนสถานะของไอเป็นของเหลวก็จะคายพลังงานออกมา เป็นการกำหนดเพื่อให้ได้มาของสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของไออิ่มตัวและของเหลวอิ่มตัวของเพนเทน [13] ปั้มที่ขับเคลื่อนด้วยความร้อนถูกประยุกต์ใช้กับวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ขนาดเล็ก ทดแทนปั้มไฟฟ้าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับแหล่งพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ [14]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา เครื่องสูบน้ำด้วยพลังงานความร้อนแบบใช้กำลังไอน้ำขับเคลื่อนอากาศ ไม่สามารถสูบน้ำได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้สามารถทำงาน

ได้อย่างต่อเนื่อง และศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพปั้มน้ำ โดยการเพิ่มจำนวนถังสูบน้ำ และเพิ่มขนาดถังผลิตไอน้ำให้สามารถผลิตไอน้ำเพียงพอกับความต้องการของไอน้ำในระยะเวลา 10 h ที่ความสูงในการสูบน้ำ 2 ถึง 8 m โดยเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 3 m

2. ทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลในการสูบน้ำ โดยอาศัยการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานในระบบปั้มน้ำ เริ่มจากการให้ความร้อนกับของเหลวจนกลายเป็นไอ เพื่อไล่อากาศจนหมด และหล่อเย็นด้วยน้ำโดยตรง จะทำให้เกิดการควบแน่น และเกิดความดันสุญญากาศภายในระบบ ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถสูบน้ำจากแหล่งน้ำขึ้นมากักเก็บไว้ภายในระบบ และเริ่มทำงานในรอบต่อไป การเปลี่ยนสถานะของน้ำจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจนกลายเป็นไอน้ำ ด้วยการระเหย (Evaporation) ที่ความดันบรรยากาศ เมื่อน้ำได้รับพลังงานความร้อนสะสมจนกระทั่งมีอุณหภูมิถึงจุดเดือด (100 °C) จะทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว แต่ในทางกลับกันการเปลี่ยนสถานะไอน้ำให้กลายเป็นน้ำ จะเป็นการคายตัวของความร้อนแฝงในระบบปิด จึงเกิดการสูบน้ำ ที่เรียกกันว่าลูกสูบเหลว โดยการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Visual Basic for Application เปรียบเทียบกับการทดลองวินาทีต่อวินาที

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาสมการดังต่อไปนี้ เพื่อทำนายผลของอุณหภูมิ ความดันจำนวนรอบการทำงาน ปริมาตรน้ำที่สูบได้ และพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ รวมถึงประสิทธิภาพปั้มน้ำด้วย

$$\eta_p = \frac{NW_h}{Q_{input}} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_h = V_c \rho_w g h \quad (2)$$

ประสิทธิภาพปั๊มน้ำสามารถคำนวณได้จากพลังงานที่ได้ในการสูบน้ำต่อพลังงานที่ป้อนให้กับระบบ ดังสมการที่ 1 เมื่อ η_p คือประสิทธิภาพปั๊มน้ำ (%) W_h คือ พลังงานที่ได้ในการสูบน้ำต่อรอบ (kJ) N คือ จำนวนรอบ Q_{input} คือ พลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (kJ) V_c คือ ปริมาตรที่สูบน้ำได้ต่อรอบ (m^3) ρ_w คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3) g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) h คือ ระดับความสูงในการสูบน้ำ (m) การให้ความร้อนกับน้ำให้ถึงผลิตไอน้ำที่ให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ เกิดจากการป้อนพลังงานเข้าระบบ ดังสมการที่ 3 แต่มีพลังงานบางส่วนสูญเสียกับสิ่งแวดล้อม ดังสมการที่ 4 และ 5 [9] โดยสมมติให้อุณหภูมิของของไหลภายในถังมีค่าเท่ากัน จึงไม่คิดการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนภายในถัง ส่วนการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีภายนอก ยังมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิด เนื่องจากได้หุ้มฉนวนรอบถังทั้งหมด จึงคิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนเท่านั้น

$$\dot{Q}_{input} = m_w C_{p,w} \frac{d(T_w)}{dt} + Q_{loss,ST} \quad (3)$$

$$Q_{loss,ST} = Q_{cond,ST} = UA_{ST}(T_{ST} - T_a) \quad (4)$$

$$U = \frac{k_i}{L_i} \quad (5)$$

$\dot{Q}_{input}$ คือ อัตราพลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (kW) m_w คือ มวลน้ำในถังผลิตไอน้ำ (kg) $C_{p,w}$ คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$) $\frac{d(T_w)}{dt}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($^\circ C/s$) $Q_{loss,ST}$ คือ อัตราพลังงานความร้อนที่สูญเสียของถังผลิตไอน้ำ (kW) U คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($W/m^2 K$) A_{ST} คือ พื้นที่การนำความร้อนของถังผลิตไอน้ำที่หุ้มฉนวน (m^2) T_{ST} คือ อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ ($^\circ C$) T_a

คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^\circ C$) k_i คือ ค่าการนำความร้อนของฉนวน ($W/m K$) L_i คือ ความหนาของฉนวน (m) [15] การเดือดของน้ำทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ ดังสมการที่ 6

$$Q_{steam} = \dot{m}_e h_{fg} \quad (6)$$

Q_{steam} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการเดือด (kW) $\dot{m}_e$ อัตราการระเหยของน้ำ (kg/s) h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอน้ำ (kJ/kg)

สมดุลพลังงานภายในถังซับตันน้ำ เมื่อไอน้ำเคลื่อนที่เข้าถึงสูบน้ำ จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้กับถังสูบน้ำ ถ่ายโอนพลังงานให้กับน้ำและอากาศภายในถังสูบน้ำ และสูญเสียความร้อนที่ถังสูบน้ำ ดังสมการที่ 7

$$Q_{steam} = C_{p,w} \frac{d(m_{w,CT} T_{w,CT})}{dt} + m_{CT} C_{p,CT} \frac{dT_{CT}}{dt} + \frac{d(m_{a,CT} C_{p,a} T_{a,CT})}{dt} + Q_{loss,CT} \quad (7)$$

$$Q_{loss,CT} = Q_{cond,CT} = UA_{CT}(T_{CT} - T_a) \quad (8)$$

$m_{w,CT}$ คือ มวลของน้ำในถังสูบน้ำ (kg) m_{CT} คือ มวลของถังสูบน้ำ (kg) $m_{a,CT}$ คือ มวลอากาศในถังสูบน้ำ (kg) $C_{p,a}$ คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศในถังสูบน้ำ ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$) $T_{a,CT}$ คือ อุณหภูมิอากาศในถังสูบน้ำ ($^\circ C$) T_{CT} คือ อุณหภูมิถังสูบน้ำ ($^\circ C$) $Q_{loss,CT}$ คือ อัตราพลังงานความร้อนที่สูญเสียในถังสูบน้ำ (kW) A_{CT} คือ พื้นที่การนำความร้อนของถังสูบน้ำที่หุ้มฉนวน (m^2) [15]

การหาค่าอุณหภูมิของน้ำในถังสูบน้ำหาได้จากสมการที่ 9 และนำมาคำนวณหาความดันที่เกิดขึ้นในถังสูบน้ำ ดังสมการที่ 10 ที่แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความดันที่ใช้ในการสูบน้ำ [16] ขณะที่ระบบเริ่มสูบน้ำ (ความดันสูญญากาศ)

$$m_{v,CT}(h_{g,T_{100}} - h_{f,T_x}) + m_{w,CT} C_{p,w}(100 - T_x) + m_f(h_{f,T_x} - h_{f,30}) = \dot{m}_e h_{fg,T_x} \quad (9)$$

$$P = 133.32 \times 10^{\left(8.07131 - \frac{1730.63}{T+233.426}\right)} \quad (10)$$

โดยที่ T_x คือ อุณหภูมิผสม °C $m_{v,CT}$ คือ มวลไอน้ำในถังสูบน้ำ (kg) $m_{w,CT}$ คือ มวลน้ำในถังสูบน้ำ (kg) m_f คือ มวลน้ำหล่อเย็น (kg) m_e คือ มวลของน้ำที่ระเหยเป็นไอ (kg) $h_{g,T_{100}}$ คือ เอนทัลปีของไอน้ำ 100 °C (kJ/kg) h_{f,T_x} คือ เอนทัลปีของน้ำที่อุณหภูมิผสม (kJ/kg) $h_{f,30}$ คือ เอนทัลปีของน้ำหล่อเย็น 30 °C (kJ/kg) h_{fg,T_x} คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอที่อุณหภูมิผสม (kJ/kg) สมการที่ 10 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความดันที่ใช้ในการสูบน้ำ [16]

การสูบน้ำเข้าถังสูบน้ำ สามารถคำนวณได้จากการสมดุล Energy equation ดังสมการที่ 11

$$\frac{P_2}{\gamma_w} + H_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma_w} + H_1 + \frac{v_1^2}{2g} + k_s \frac{v_1^2}{2g} \quad (11)$$

$$V_{flow} = v_1 A_{tube} \quad (12)$$

P_2 คือ ความดันเกจที่ปลายท่อสูบน้ำ (kPa) P_1 คือ ความดันเกจในถังสูบน้ำ (kPa) $H_1 - H_2$ คือ ระดับความสูงในการสูบน้ำ (m) v_2 คือ ความเร็วของของไหลที่ปลายท่อสูบน้ำ (m/s) v_1 คือ ความเร็วของของไหลที่ไหลเข้าถังสูบน้ำ (m/s) γ_w คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (N/m³) k_s คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียในการสูบน้ำ V_{flow} คือ อัตราการไหลของน้ำ (m³/s) A_{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อสูบน้ำ (m²) ซึ่งอัตราการไหลของน้ำที่คำนวณได้จากสมการที่ 12 สามารถนำไปคำนวณต่อในสมการที่ 2 ในเทอมของปริมาตรน้ำที่สูบได้ต่อรอบ

ผลความแตกต่างระหว่างการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประเมินผลด้วย RMSE (Root Mean Squared Error) ซึ่งแสดงผลของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [9] ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_E - X_S)^2}{N}} \quad (13)$$

เมื่อ X_E คือ ค่าของผลการทดลอง X_S คือ ค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ N คือ จำนวนข้อมูล

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ถังสูบน้ำ (Condenser tank) ทรงกระบอกแนวตั้ง ทำจากเหล็กหนา 10 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 cm ความสูง 89.5 cm ปริมาตร 204 L วัสดุที่ใช้ทำฉนวนเป็นยางสังเคราะห์หนา 2.54 cm

2. ถังผลิตไอน้ำ (Steam Tank) ทรงกระบอกแนวนอน วัสดุที่ใช้ทำถังเป็นสแตนเลส หนา 3 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm ยาว 30 cm ปริมาตร 21.19 L วัสดุที่ใช้ทำฉนวนเป็นยางสังเคราะห์หนา 2.54 cm

3. ถังน้ำหล่อเย็น (Feed Water Tank) ทรงกระบอกตั้ง วัสดุที่ใช้ทำถังเป็นพลาสติกพีวีซี หนา 2 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ยาว 20 cm ปริมาตร 3.5 L

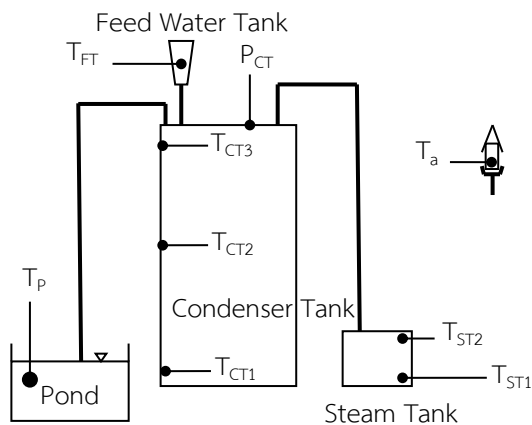
วาล์วกันกลับ (แบบ swing check valve) ใช้แรงกดของน้ำควบคุมการเปิดปิด ใช้กับน้ำ

ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducers) ช่วงการวัด -14.7 ถึง 30 psi (0 ถึง 5 VDC) อุณหภูมิของสารทำงาน -40 ถึง 125 °C แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 9 ถึง 30 VDC

ตัววัดอุณหภูมิ (thermocouple wire) type K ช่วงการวัด 0 - 200 °C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวนหุ้มภายนอกและภายใน 0.32 x 0.2 cm

เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดัน (data logger) ช่วงการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 20 mVDC ถึง 50 VDC ช่วงของการวัดอุณหภูมิ -10 ถึง 300 °C

T_{ST1} คืออุณหภูมิด้านล่างภายในถังผลิตไอน้ำ T_{ST2} คืออุณหภูมิด้านบนภายในถังผลิตไอน้ำ T_{CT1} คืออุณหภูมิด้านล่างภายในถังสูบน้ำ T_{CT2} คืออุณหภูมิตรงกลางภายในถังสูบน้ำ T_{CT3} คืออุณหภูมิด้านบนภายในถังสูบน้ำ T_{FT} คืออุณหภูมิภายในถังน้ำหล่อเย็น T_p คืออุณหภูมิบ่อน้ำ T_a คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ P_{CT} คือความดันภายในถังสูบน้ำ ดังรูปที่ 1

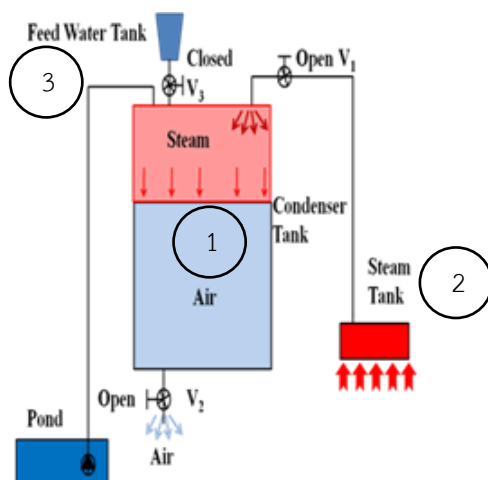


รูปที่ 1 ตำแหน่งการติดตั้งจุดวัด

3.2 วิธีการวิจัย

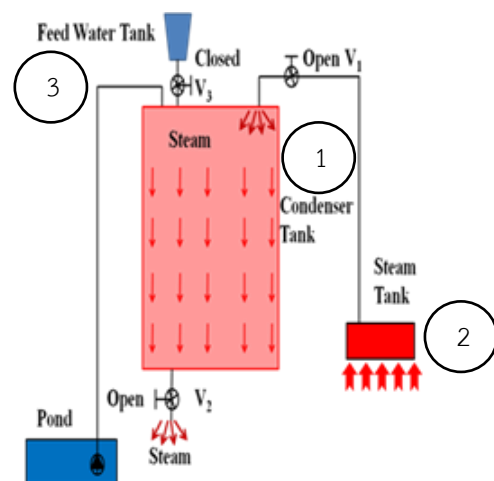
หลักการทำงานของระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ ประกอบด้วย ช่วงผลิตไอน้ำและขับดันอากาศ ช่วงระบายไอ ช่วงหล่อเย็น และช่วงสูบน้ำ [9]

ช่วงผลิตไอน้ำและขับดันอากาศ เริ่มต้นเปิด วาล์วตัวที่ 1 กับ วาล์วตัวที่ 2 และปิด วาล์วตัวที่ 3 เมื่อน้ำในถังผลิตไอน้ำซึ่งบรรจุน้ำ 16 L และอากาศ 5 L ได้รับความร้อนจากเตาเผา จนกระทั่งมีอุณหภูมิ 100 °C จะเกิดไอน้ำขึ้นภายในถังผลิตไอน้ำ และเคลื่อนผ่านท่อส่งไอ และ วาล์วตัวที่ 1 ไปยังด้านบนของถังสูบน้ำ และขับดันอากาศ ออกทางด้านล่างผ่านวาล์วตัวที่ 2 ดังรูปที่ 2

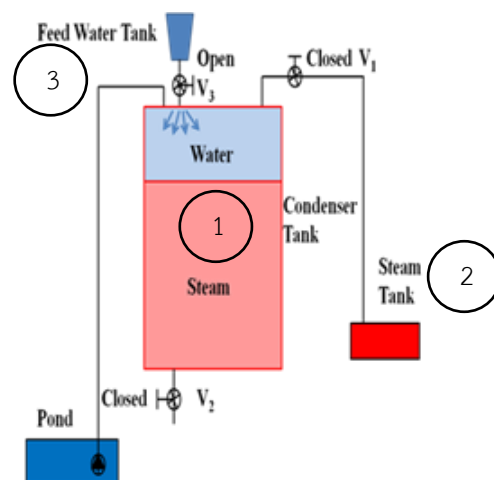


รูปที่ 2 ช่วงผลิตไอน้ำและขับดันอากาศ

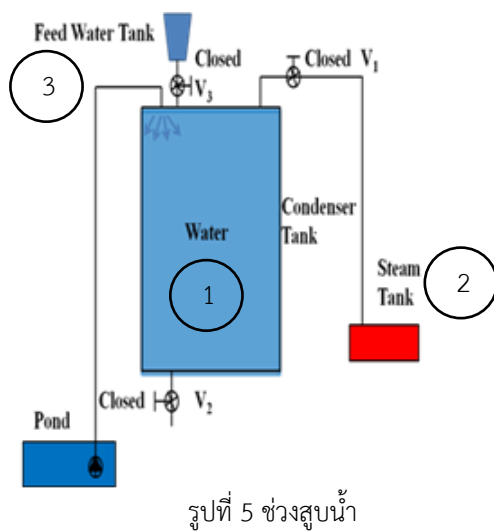
และเมื่อไอน้ำขับดันอากาศภายในถังสูบน้ำจนหมด หรือจนกระทั่งไอน้ำจะแทนที่อากาศภายในถังสูบน้ำได้หมด ที่อุณหภูมิ 100 °C ดังรูปที่ 3 เรียกว่าช่วงระบายไอล หลังจากนั้นก็จึงปิด วาล์วตัวที่ 1 กับวาล์วตัวที่ 2 และเปิด วาล์วตัวที่ 3 เพื่อให้ น้ำหล่อเย็นไหลเข้าถังสูบน้ำใน ปริมาตร 3 L (ช่วงหล่อเย็น) พร้อมกับปิด วาล์วตัวที่ 3 และหยุดให้ความร้อนกับถังผลิตไอน้ำ ดังรูปที่ 4 เมื่อไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C ผสมกับน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม จึงทำให้เกิดการควบแน่นภายในถังสูบน้ำ เป็น สลยุญอากาศ และสูบน้ำจากบ่อน้ำขึ้นมาเก็บไว้ที่ถังสูบน้ำจนเต็ม หรือจนกระทั่งความดันภายในถังเท่าความดันที่ระดับความลึกในการสูบน้ำ ดังรูปที่ 5 เป็นช่วงการสูบน้ำ



รูปที่ 3 ช่วงระบายไอ



รูปที่ 4 ช่วงหล่อเย็น



วิธีการทดลอง ตั้งค่าระดับน้ำหล่อเย็น 3 L ตั้งค่าระดับความสูงในการสูบน้ำ 3 m เติมน้ำถังผลิตไอน้ำ 16 L เริ่มทำการทดลองโดยเปิด-ปิดวาล์วต่างๆ ตามหลักการทำงานของระบบ บันทึกอุณหภูมิ และความดันวัดปริมาณน้ำที่สูบได้ ระยะเวลาการทดลอง 1 รอบการทำงาน เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C กำหนดปริมาณน้ำหล่อเย็น 3 L ปริมาณน้ำถังผลิตไอน้ำ 25 L ถังสูบน้ำ ขนาด 204 L จำนวน 2 ถัง โดยการสูบน้ำเข้าถังสูบน้ำรอบละ 1 ถัง สลับกัน เพื่อลดความร้อนที่สูญเสียจากการผลิตไอน้ำเมื่อสิ้นสุดการทำงาน และเพื่อเพิ่มจำนวนรอบในการสูบน้ำให้เพิ่มมากขึ้น ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ระยะเวลาในการทำงานของระบบ 10 h เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบ และศึกษาความเป็นไปได้ของความสูงที่ส่งผลต่อจำนวนรอบการทำงาน

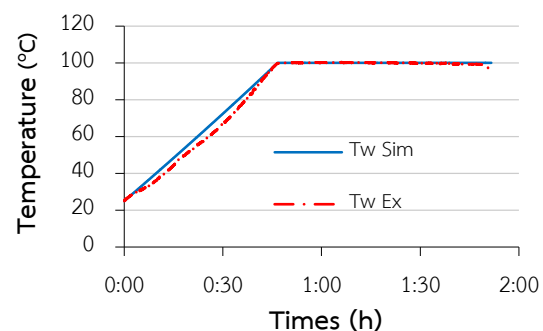
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 3 m ระยะเวลาการทดลอง 1 รอบการทำงาน เปรียบเทียบอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความ

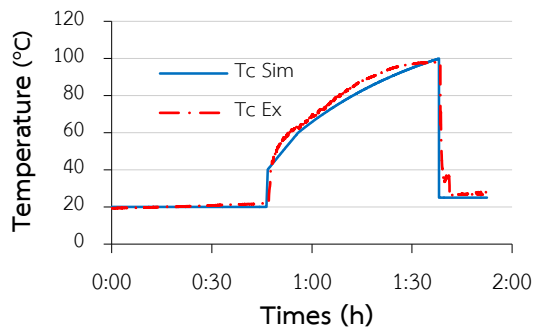
ดันภายในถังสูบน้ำ กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เงื่อนไขเดียวกัน มีผลดังต่อไปนี้

อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้พลังงานความร้อนกับน้ำจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 100°C และหยุดนิ่งเนื่องจากความดันบรรยากาศที่ควบคุมจุดเดือดของน้ำ ความดันภายในระบบจะเปิดสู่บรรยากาศที่ด้านล่างของถังสูบน้ำ ผลการทดลองของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อนเปรียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังรูปที่ 6 เนื่องจากการสูญเสียความร้อนในช่วงการให้ความร้อนกับถังผลิตไอน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ทำให้อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำมีค่าสอดคล้องกับการทดลอง และจะหยุดนิ่งที่อุณหภูมิ 100°C เนื่องจากที่ความดันบรรยากาศน้ำมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 100°C โดยมีค่า *RMSE* เท่ากับ 2.5421 และมีความคลาดเคลื่อน 0.7145%



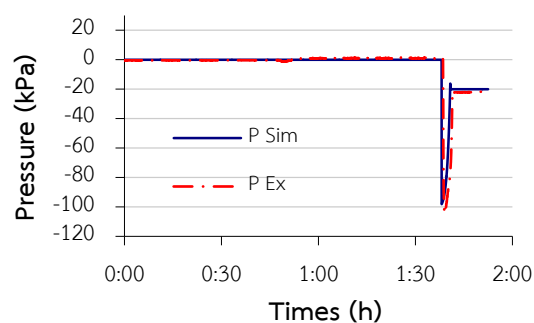
รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อนระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 7 เมื่ออุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นจนถึง 100°C ไอน้ำจะเคลื่อนที่เข้าสู่ถังสูบน้ำ และขับเคลื่อนอากาศออกจากถังสูบน้ำ ไอน้ำที่เคลื่อนที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนภายในถังสูบน้ำจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ (100°C) อากาศที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่าไอน้ำก็จะถูกขับเคลื่อนออกจนหมดถังสูบน้ำ และหลังจากนั้นอุณหภูมิในถังสูบน้ำจะลดลงเนื่องจากการหล่อเย็นโดยตรงของน้ำ โดยมีค่า *RMSE* เท่ากับ 6.0325 และมีความคลาดเคลื่อน 1.8714%



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิในถังสูบน้ำระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 8 ความดันที่ลดลงเนื่องจากภายในถังสูบน้ำเกิดการควบแน่น ทำให้เกิดความดันสุญญากาศ และสูบน้ำจากแหล่งน้ำตามความสูงที่ตั้งไว้ จนความดันภายในถังสูบน้ำไม่สามารถเอาชนะความสูงในการสูบน้ำได้ระบบจึงหยุดสูบน้ำ (-20 kPa) และหยุดทำงาน โดยมีค่า *RMSE* เท่ากับ 8.1573 และมีความคลาดเคลื่อน 8.3831%



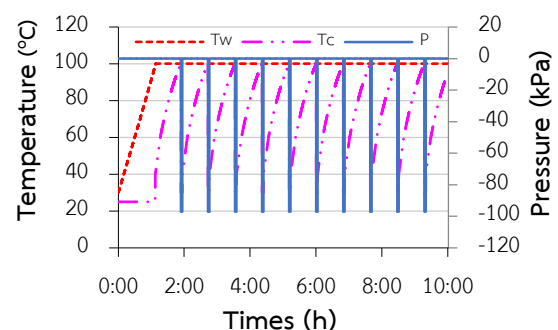
รูปที่ 8 ผลของความดันในถังสูบน้ำระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำแบบอัดโนมิติ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m

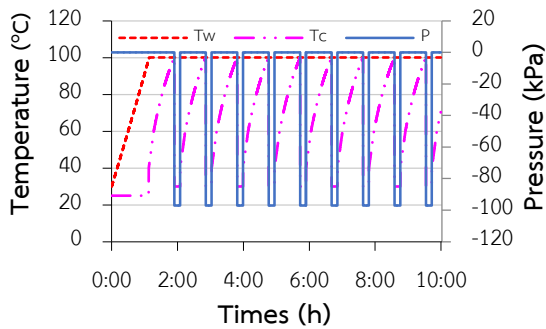
การเริ่มต้นของอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำจนถึง 100 °C เป็นช่วงที่ใช้พลังงานในการให้ความร้อนมาก ดังนั้นเมื่อผลต่างของอุณหภูมิมีน้อยจะส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนลดลง เพราะฉะนั้น หลังจากจากระบบได้ทำงานไปแล้ว 1 รอบการทำงาน การให้ความร้อนซ้ำกับถังผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C

สามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีจำนวนรอบการทำงานเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละระดับความสูงในการสูบน้ำ ในช่วงที่อุณหภูมิภายในถังสูบน้ำเริ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิไอน้ำในถังผลิตไอน้ำเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอน้ำในถังผลิตไอน้ำกับถังสูบน้ำ

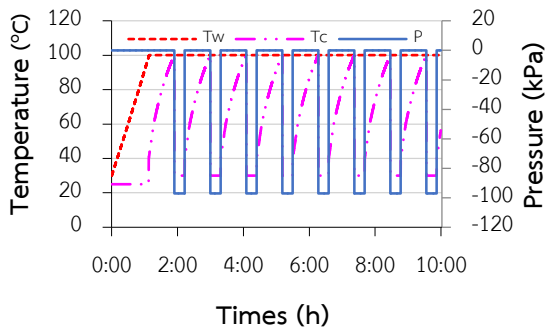
โดยอาศัยหลักการแทนที่ของไอน้ำขับเคลื่อนอากาศออกจากถังสูบน้ำ จนกระทั่งมวลไอน้ำมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของถังสูบน้ำ (204 L) แสดงให้เห็นว่าไม่มีอากาศในถังสูบน้ำ เนื่องจากไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C มีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศ หรือเบากว่าอากาศ จึงทำให้อากาศที่ซึ่งอยู่ด้านล่างถูกขับดันออกจากถังสูบน้ำ ดังนั้นการควบแน่นของไอน้ำจึงเกิดขึ้นในช่วงที่การหล่อเย็นจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ผสมกับไอน้ำโดยปริมาตร จากรูปที่ 9-12 จำนวนรอบลดลงเมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้น ความดันที่ใช้ในการสูบน้ำเกิดจากการควบแน่นของไอน้ำที่ 100 °C ผสมกับน้ำหล่อเย็น ทำให้ไอน้ำภายในถังสูบน้ำยุบตัวเกิดเป็นความดันสุญญากาศ ระยะเวลาในการสูบน้ำในแต่ละรอบจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใช้ในการสูบน้ำ ความเร็วในการสูบน้ำจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสูญเสียความดัน และความเสียดทานของของไหลภายในท่อสูบน้ำ เมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความสูงในการสูบน้ำจึงส่งผลกับจำนวนรอบในการสูบน้ำด้วย ซึ่งมีผลดังนี้ 10, 9, 8 และ 7 รอบ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



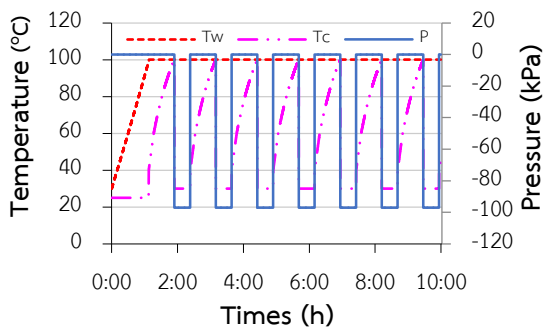
รูปที่ 9 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 2 m



รูปที่ 10 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 4 m



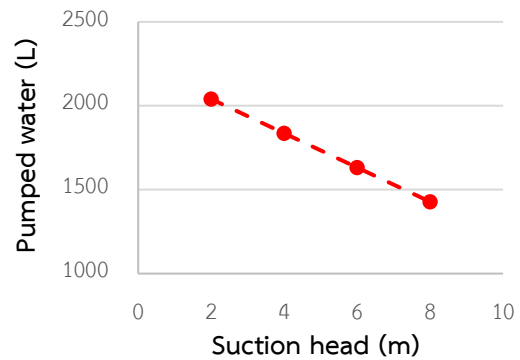
รูปที่ 11 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 6 m



รูปที่ 12 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 8 m

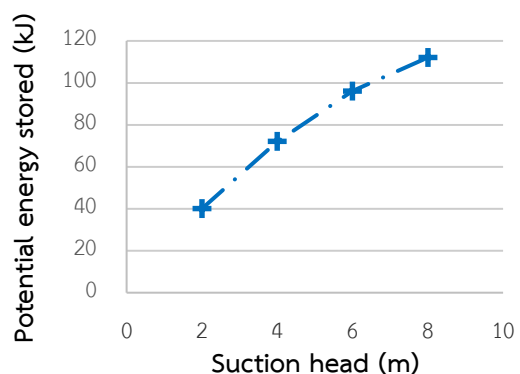
ปริมาณน้ำที่สูบตลอดทั้งวัน (10 h) จะลดลงเมื่อความสูงมากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่สูบได้แต่ละรอบมีค่าคงที่ แต่จำนวนรอบที่ได้จะลดลง ดังนั้นเมื่อรวมปริมาณน้ำที่สูบได้ตลอดทั้งวันก็จะลดลงตามจำนวนรอบการทำงาน ดังรูปที่ 13 ปริมาณน้ำที่สูบตลอดทั้งวัน 2,040

1,836 1,632 และ 1,428 L ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



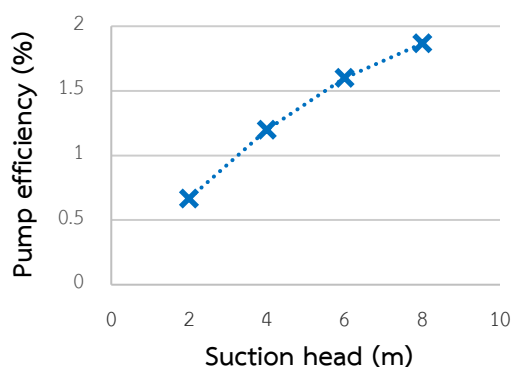
รูปที่ 13 ปริมาณน้ำที่สูบได้ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำต่างๆ

พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระดับความสูง เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำจะแปรผันตรงกับความสูงในการสูบน้ำ ถึงแม้ว่าจำนวนรอบในการทำงานจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่สูบได้รวมตลอดทั้งวันส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำเพียงเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลกระทบต่อพลังงานรวมตลอดทั้งวันในการสูบน้ำ ดังรูปที่ 14 พลังงานในการสูบน้ำมีค่า 40, 72, 96 และ 112 kJ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



รูปที่ 14 พลังงานในการสูบน้ำ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำต่างๆ

จากแนวโน้มของรูปที่ 15 เมื่อระดับความสูงในการสูบน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพปั้มน้ำเพิ่มมากขึ้นตามเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพปั้มน้ำจะแปรผันตาม พลังงานความร้อนที่ให้กับระบบ พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ ความสูงในการสูบน้ำ และปริมาณน้ำที่สูบได้ ดังนั้นการเพิ่มรอบการทำงานให้มากกว่าหนึ่งรอบ และทำงานอย่างต่อเนื่องจะช่วยลดพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มปริมาณน้ำที่สูบตลอดทั้งวัน และเมื่อเพิ่มระดับความสูงในการสูบน้ำให้มากขึ้นไปอีก ประสิทธิภาพปั้มน้ำก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ประสิทธิภาพปั้มน้ำมีค่า 0.66649, 1.19969, 1.59959 และ 1.86619% ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



รูปที่ 15 ประสิทธิภาพปั้มน้ำ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำต่างๆ

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิถังสูบน้ำ และความดันในถังสูบน้ำ 0.7145, 1.8714 และ 8.3831% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปั้มน้ำด้วยกำลังไอน้ำ สามารถจำลองให้ระบบทำงานอย่างต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 10 h ช่วยลดระยะเวลาในช่วง

การให้ความร้อนและจำนวนรอบในการสูบน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งรอบการทำงาน

ปริมาณน้ำที่สูบได้มากที่สุด 2,040 L และจำนวนรอบการทำงานสูงสุด 10 รอบ จะเกิดที่ความสูง 2 m ส่วนพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำสูงสุด 112 kJ และประสิทธิภาพปั้มน้ำสูงสุด 1.86619% จะเกิดที่ความสูง 8 m

เมื่อระดับความสูงในการสูบน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้จำนวนรอบในการสูบน้ำลดลง เมื่อจำนวนรอบลดลง ปริมาณน้ำที่สูบได้ทั้งหมดก็ลดลงตาม ส่วนประสิทธิภาพปั้มน้ำจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำและตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มระดับความสูงในการสูบน้ำจะส่งผลอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพปั้มน้ำให้สูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Chaipattana Foundation. (2010, Jun 3). A new theory [Online]. Available: <https://www.chaipat.or.th/2010-06-03-03-39-51.html>
- [2] J. R. Jenness, "Some consideration relative to a solar power savery water pump," *Sol. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 58-60, Apr-Jun. 1961.
- [3] J. W. Sheldon, R.A. Crane and S. C. Kranc, "Pumping action from heat-driven oscillations in a liquid-vapour column," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 9, no.10, pp. 1419-1425. Jul. 1976.
- [4] A. Date and A. Akbarzadeh, "Theoretical study of a new thermodynamic power cycle for thermal water pumping application and its prospects when coupled to a solar pond,"

- Appl. Therm. Eng.*, vol. 58, no. 1-2, pp. 511-521, Sep. 2013.
- [5] N. Kurhe, A. Funde, P. Gokhale, S. Jadkar, S. Ghaisas and A. Date, "Development of low temperature heat engine for water pumping application," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 292-297, Mar. 2017.
- [6] Z.X. Wang, S. Du, L.W. Wang and X. Chen, "Parameter analysis of an ammonia-water power cycle with a gravity assisted thermal driven pump for low-grade heat recovery," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 651-661, Feb. 2020.
- [7] S. Liengjindathaworn, K. Kirtikara, P. Namprakai and T. Kiatsiriroat, "Parametric studies of a pulsating-steam water pump," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 23, no. 1, pp. 37-46, Jan. 2002.
- [8] P. Namprakai, N. Roonprasang, N. Pratinthong, K. Sutthivirode and J. Sitranon, "Thermal Water Pump," Thailand Petty Patent 7709, January 27, 2012.
- [9] J. Sitranon, C. Lertsatitthanakorn, P. Namprakai, N. Pratinthong, T. Suparos and N. Roonprasang, "Parametric consideration of a thermal water pump and application for agriculture," *J. Sol. Energy Eng. (ASME)*, vol. 137, no. 3, pp. 031006-1 - 031006-12, Jun. 2015.
- [10] K. Sutthivirode, N. Pratinthong, P. Namprakai, N. Roonprasang and T. Suparos, "Waste heat water pumping model with direct contact cooling," *J. Cent. South Univ.*, vol. 21, no. 10, pp. 3896-3910, Oct. 2014.
- [11] P. Moonsri, J. Kunchornrat and P. Namprakai, "Hybrid energy thermal water pump for producing hot water from a shallow well in Thailand," *J. Energy Eng. (ASCE)*, vol. 142, no. 3, pp. 04015023-1 - 04015023-15, Sep. 2016.
- [12] J. Sitranon, K. Sutthivirode and N. Roonprasang, "A Study of Discharge Heads Affecting the Temperature and Amount of Hot Water Using Mathematical Modeling of a Solar Water Heating System," *Srinakharinwirot Eng. J.*, vol. 15, no 1, pp. 97-107, Apr. 2020.
- [13] R. Bandaru, C. Muraleedharan and M.V. Pavan Kumar, "Modelling and dynamic simulation of solar thermal energy conversion in an unconventional solar thermal water pump," *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 292-305, Apr. 2019.
- [14] L. Jiang, R.Q. Wang and A.P. Roskilly, "Development of low temperature heat engine for water pumping application Techno-economic analysis on a small-scale organic Rankine cycle with improved thermal driven pump," *Energy Convers. Manag.*, vol. 217, pp. 112979, Aug. 2020.
- [15] Y. A. Cengel and A.J. Ghajar, *Heat and mass transfer fundamentals and applications*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [16] R. H. Perry, DW. Green and JO. Maloney, *Perry's chemical engineers' handbook*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1997.