

ทางเลือกในการระบายความร้อนสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

Heat rejection alternatives for thermoelectric power generator

ปวีตวงศ์ บำรุงพันธ์ และ เจริญพร เลิศสถิตธนกร

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail pawatwong1@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทางเลือกในการระบายความร้อนสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก โดยออกแบบและจำลองการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อศึกษาระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งการถ่ายเทความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกควบคุมอุณหภูมิ 170 220 และ 270°C ด้วยการจ่ายไฟผ่านเครื่องหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดความร้อน ส่วนด้านเย็นใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับระบบระบายความร้อนด้วยอากาศและระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ เพื่อวัตถุประสงค์ให้ได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้า จากการทดลองเมื่อนำทั้ง 2 ระบบเปรียบเทียบกับทำการควบคุมอุณหภูมิด้านร้อนไว้ 270°C ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ พบว่า ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำให้กำลังไฟฟ้า 20.6W และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 8.72% เมื่อเทียบกับระบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 16.4W ประสิทธิภาพ 6.05% ซึ่งให้เห็นว่าที่การควบคุมอุณหภูมิด้านร้อนคงที่เท่ากันระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

คำสำคัญ

การพาความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริก ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

Abstract

This research the study of choice in cooling for electricity from her thermoelectric. The experimental design and simulate the production of thermoelectric. To study air-cooled and water-cooled systems and increase efficiency in the production of electricity to thermoelectric.

The heat transfer to her thermoelectric temperature control 170, 220, 270°C with power through a transformer to an adjustment the heater. Temperature measurement in her hot thermoelectric. The cold side heat exchanger is used in conjunction with air-cooled and water-cooled systems. The purpose of acquiring the power of the experiment, when the two systems compare who control the heat to 270°C cooling with air and cooling water was cooled with water to power. 20.6W and efficiency of 8.72% compared to air cooled 16.4W maximum power efficiency of 6.05%, the suggesting that temperature control the temperature with in system with water to provide high performance than cooling with air.

Keywords

convection, thermoelectric, efficiency of electricity production

บทนำ

การใช้พลังงานในปัจจุบันมีปริมาณเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่แหล่งพลังงานต่างๆ กลับมีแนวโน้มที่ลดลง และอาจจะหมดไป อาทิเช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น [1] จึงเป็นสาเหตุให้เกิงานวิจัยต่างๆ เพื่อหาพลังงานทดแทน พร้อมทั้งช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศนั้นๆ ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นคว้าการนำพลังงานทดแทน รวมถึงพลังงานเหลือใช้ ซึ่งพลังงานต่างๆ ที่นำมาเป็นพลังงานทางเลือก ได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งพลังงานความร้อนก็เป็นอีกหนึ่ทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ผ่านเทคโนโลยีอุปกรณ์หนึ่งทีเรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริก” [2] เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งของพลังงานทางเลือกโดยการนำเอาเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ร่วมกับพลังงานความร้อน ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck effect) [3] เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นไม่ใช่แนวทางที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูง

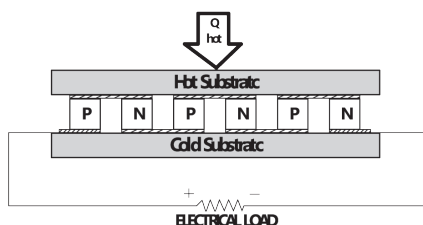
แต่จัดเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาด อย่างไรก็ตาม กระแสไฟฟ้าที่ได้จากความร้อนเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งในปัจจุบันข้อจำกัดของประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกไม่ได้ขึ้นอยู่กับแผ่นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับการดูดซับความร้อนทางด้านร้อนที่เทอร์โมอิเล็กทริกได้รับ และการระบายความร้อนให้กับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดเพื่อศึกษาระบบระบายความร้อนในรูปแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศและน้ำ จึงได้ออกแบบและจำลองระบบการทดลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าให้กับเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก รวมไปถึงศึกษาระบบระบายความร้อนด้วยอากาศและระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ เพื่อเป็นแนวทางที่ให้ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นดียิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นทางเลือกการ

ออกแบบของระบบระบายความร้อน เพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นเทคโนโลยีที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยหลักการทำงาน เมื่ออุณหภูมิของทั้งสองข้างของโมดูลเกิดความแตกต่างกัน ดังภาพที่ 1 โดยที่ด้านบนมีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้พาหะข้างมากบริเวณนั้นมีพลังงานสูงตามไปด้วย พาหะข้างมากจะแพร่ลงมาด้านล่างที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยพาหะข้างมากอิเล็กตรอนของชนิดเอ็นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในทิศสวนทางขึ้นด้านบน และพาหะโฮลของชนิดพีจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทิศทางเดียวกันลงด้านล่าง เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีมีโลหะที่นำไฟฟ้ามาเชื่อมเป็นจุดต่อ และทำให้เป็นวงจรปิด กระแสจะไหลได้ครบวงจรในทิศตามเข็มนาฬิกา [5]



ภาพที่ 1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล [5]

2.2 การหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเทอร์โมอิเล็กทริก (Conversion efficiency)

ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกประเภทการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าขณะที่มีผลต่างของอุณหภูมิ การคำนวณประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเชิงทฤษฎี เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ [6]

เมื่อ

η_c คือ ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

η_c คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์

T_c คือ อุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก, K

T_h คือ อุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก, K

โดยที่ M หาได้จากสมการ $M = \sqrt{1 + ZT_m}$ และค่าคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Z มีค่าเท่ากับ $Z = 2.3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ ส่วนค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลหาได้จาก $T_m = 0.5(T_h + T_c)$ และประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ [6]

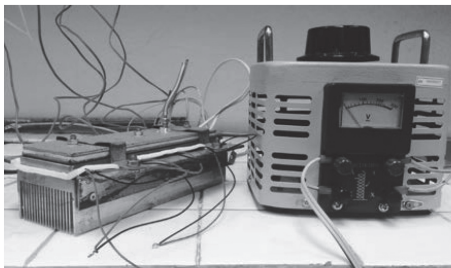
$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (2)$$

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

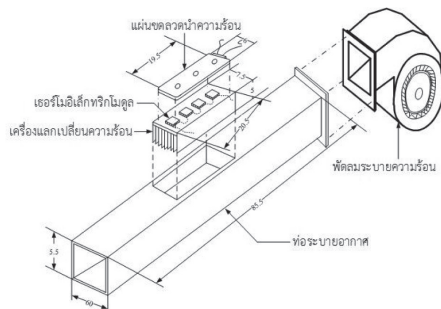
จากภาพที่ 2 แสดงระบบและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบโดยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. แผ่นขดลวดนำความร้อนกำลังไฟ 500W
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบริบายความร้อน
3. เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEHP1-12635-1.2)

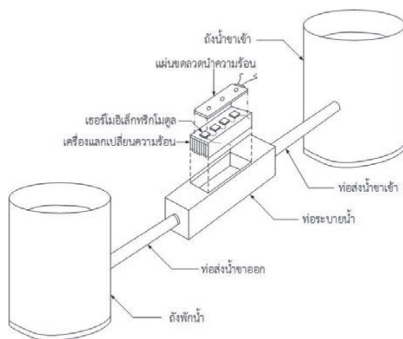
4. ท่อโลหะบายอากาศและระบายน้ำ
5. พัดลมระบายความร้อน กำลังไฟ 0.06kW
6. ปั๊มน้ำ กำลังไฟ 23W
7. หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 250V, 4A
8. เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบดิจิทัล
9. เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ช่วงวัดอุณหภูมิ -10 ถึง 400
10. เครื่องวัดทางไฟฟ้าแบบดิจิทัล
11. เครื่องวัดความเร็วลมและอุณหภูมิ



ภาพที่ 2 ชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 3 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศ
(หน่วยเซนติเมตร)

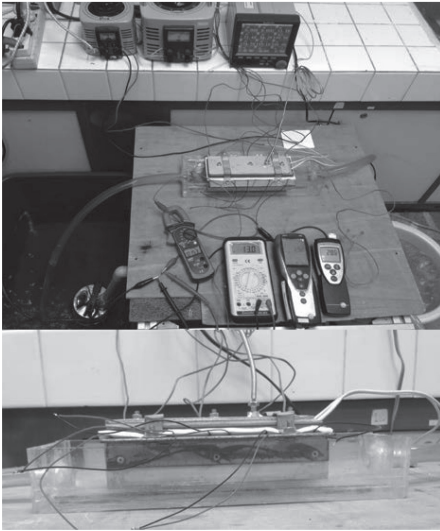


ภาพที่ 4 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ
(หน่วยเซนติเมตร)



ภาพที่ 5 การทดลองระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 170 220 และ 270°C

ในภาพที่ 5 แสดงการทดลอง โดยเริ่มต้นจากระบบที่ 1 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศ โดยการวัดอุณหภูมิผิวด้านร้อนที่ขดลวดความร้อนและอุณหภูมิผิวด้านเย็นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องมิววัดและบันทึกอุณหภูมิและปลายอีกด้านหนึ่งติดตั้งบนตำแหน่งที่ทำการวัด จากนั้นให้ความร้อนกับเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ขดลวดความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิด้านร้อน 3 ระดับ คงที่ 170 220 และ 270 °C โดยการตั้งค่าผ่านเครื่องเครื่องหม้อแปลงปรับค่าได้ และปรับอัตราการไหลของอากาศโดยการปรับค่าได้ และปรับอัตราการไหลของอากาศโดยการปรับค่าได้ ปรับตามแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปให้กับพัดลมหอยโข่ง แรงดันไฟฟ้าที่ปรับนั้นจะสอดคล้องกับอัตราการไหลของอากาศที่วัดผ่านเครื่องวัดความเร็วอากาศ 3 ระดับ คงที่ที่อัตราการไหล 0.0203 0.0299 และ 0.0436 kg/s แล้วบันทึกผลการทดลอง จากนั้นทดสอบในระบบที่ 2 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ โดยทดลองควบคุมอุณหภูมิด้านร้อน 3 ระดับ คงที่ 170 220 และ 270 °C และปรับอัตราการไหลของน้ำโดยใช้เครื่องหม้อแปลงปรับค่าได้ ปรับตามแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปให้กับปั๊มน้ำ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ปรับนั้นจะสอดคล้องกับอัตราการไหลของน้ำที่วัดระดับน้ำต่อการจับเวลาใน 1 นาที อัตราการไหลที่ 6 8 และ 12 L/min แล้วบันทึกข้อมูลดังภาพที่ 6

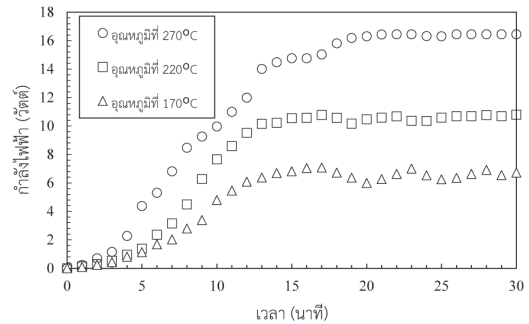


ภาพที่ 6 การทดลองระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 170 220 และ 270°C

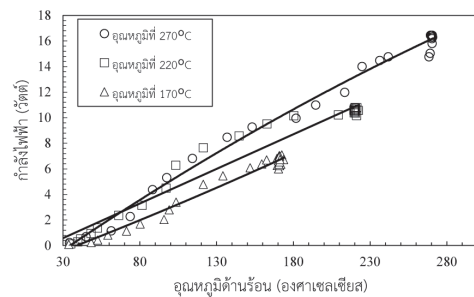
4. ผลการทดลอง

4.1 การพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศ

การถ่ายเทความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ พร้อมกับการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิด้านร้อนที่ 170 220 และ 270 °C ซึ่งอุณหภูมิห้องอยู่ที่ 28.6 °C ทำการทดลอง 30 นาที พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนอุณหภูมิด้านร้อนเป็น 170 220 และ 270 °C กำลังไฟฟ้าที่เฮอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้นั้นมีความแตกต่างกัน แต่อัตราการไหลอากาศนั้นคงที่ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่เฮอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิด้านร้อน 270 °C อุณหภูมิด้านเย็น 65 °C กำลังไฟฟ้า 16.4W ต่างจากอุณหภูมิด้านร้อน 220 °C อุณหภูมิด้านเย็น 66°C กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้อยู่ที่ 10.8W และที่อุณหภูมิด้านร้อน 170 °C อุณหภูมิด้านเย็น 65.5 °C กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพียง 6.7W ดังนั้นจากผลการทดลองอุณหภูมิด้านร้อนที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่อัตราการไหลอากาศคงที่ ที่ 0.0436 kg/s ดังภาพที่ 7-8

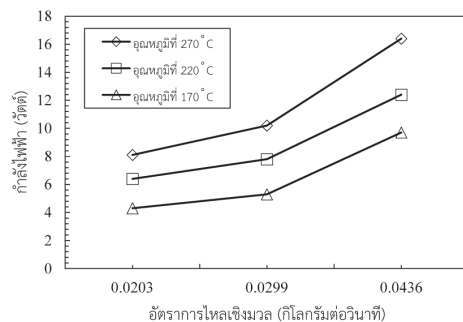


ภาพที่ 7 ค่ากำลังไฟฟ้าที่เฮอร์โมอิเล็กทริกที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิด้านร้อน 170 220 และ 270°C (อัตราการไหลอากาศคงที่ 0.0436 kg/s)



ภาพที่ 8 กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับอุณหภูมิด้านร้อน

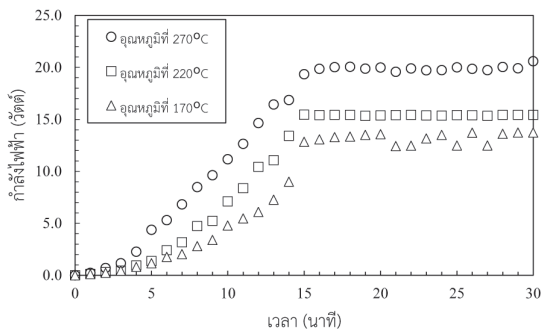
เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและอุณหภูมิด้านร้อนที่ค่าแตกต่างกัน พบว่าสามารถส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ด้วย ดังภาพที่ 9



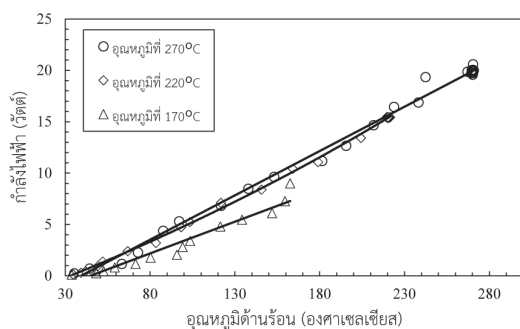
ภาพที่ 9 กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่อุณหภูมิด้านร้อนที่แตกต่างกัน

4.2 การพาความร้อนแบบบังคับด้วยน้ำ

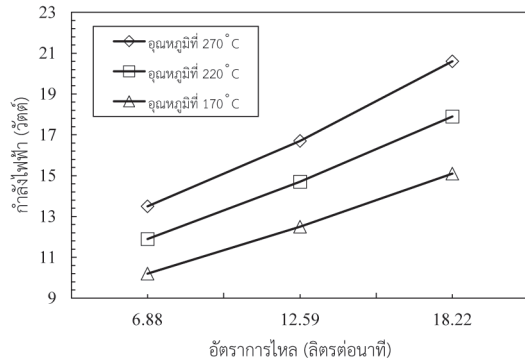
จากการทดสอบการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำ พร้อมกับการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิด้านร้อนที่แตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิห้อง 28.6°C ทดลอง 30 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิด้านร้อนที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้นั้นมีค่าแตกต่างกัน โดยกำหนดอุณหภูมิด้านร้อนไว้คงที่ คือ 170°C 220°C และ 270°C และการทดลองจะกำหนดอัตราการไหลของน้ำไว้คงที่ที่ 18 L/min ดังภาพที่ 10-12



ภาพที่ 10 ค่ากำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิด้านร้อน 170°C 220°C และ 270°C (อัตราการไหลของน้ำคงที่ 18.22 L/min)



ภาพที่ 11 กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับอุณหภูมิด้านร้อน



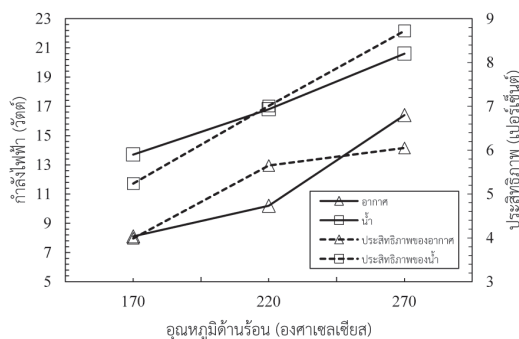
ภาพที่ 12 กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของน้ำที่อุณหภูมิด้านร้อนที่แตกต่างกัน

เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำที่ 6 L/min และ 12 L/min พร้อมกับการศึกษาที่อุณหภูมิด้านร้อนที่แตกต่างกัน พบว่า การถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำอยู่ที่อัตราการไหล 12 L/min ได้กำลังไฟฟ้า 20.6 W ที่การควบคุมอุณหภูมิด้านร้อน 270°C อุณหภูมิด้านเย็น 36.4°C ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และเมื่อปรับลดอัตราการไหลลงที่ 6 และ 8 L/min ตามลำดับ พบว่ากำลังไฟฟ้ามีย่านโน้มลดลงเช่นกัน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนโดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้นั้นมีค่าแตกต่างกัน

4.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการพาความร้อนด้วยอากาศและน้ำที่อุณหภูมิด้านร้อนเท่ากัน

จากการจำลองการพาความร้อนเมื่อนำผลการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับมาพิจารณาเปรียบเทียบที่การควบคุมอุณหภูมิด้านร้อน 170°C 220°C และ 270°C พบว่าการพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศเทียบกับการพาความร้อนแบบบังคับด้วยน้ำ การพาความร้อนด้วยน้ำจะให้กำลังไฟฟ้าที่ 20.6 W ที่อุณหภูมิด้านร้อน 270°C อุณหภูมิด้านเย็น 66°C

ซึ่งสูงกว่าการพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศที่กำลังไฟฟ้า 16.4W ที่อุณหภูมิด้านร้อนเท่ากัน และเมื่อนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพพบว่า ประสิทธิภาพการพาความร้อนแบบบังคับด้วยน้ำได้ 8.72% เมื่อเทียบกับการพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศให้ประสิทธิภาพเพียง 6.05% ดังนั้นความแตกต่างกันระหว่างการพาความร้อนที่อุณหภูมิด้านร้อนเดียวกันจะส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกด้วย ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการพาความร้อนด้วยอากาศและน้ำ

5. สรุป

จากการศึกษาเปรียบเทียบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศและน้ำที่อุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากัน พบว่ากำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้นั้นมีค่าแตกต่างกัน และกำลังไฟฟ้าของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเทอร์โมอิเล็กทริกในการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำมีค่ามากกว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศขณะเดียวกันการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกกับ

การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของการพาความร้อนด้วยอากาศและน้ำ จะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ ดร.เก้ากันยา สุดประเสริฐ ที่สนับสนุนเครื่องมือการทดลองและห้องปฏิบัติการทดลองสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Casano, G. and Piva, S. (2011). Experimental investigation of performance of thermoelectric generator. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, pp. 660-669.
- [2] Bimrew, T.A. Xiaobing, L. and Jiawei, Y. (2013). Effects of temperature non-uniformity over the heat spreader on the outputs of thermoelectric power generation system. *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 533-540.
- [3] Amir, Y.F. and Aliakbar, A. (2014). Analysis of a symbiotic thermoelectric system for power generation and liquid preheating. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, pp. 501-507.
- [4] Cheng, T.H. Gia, Y.H. Hsu, S.C. Ben, Y. and Da, J.Y. (2011). An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module. *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 5173-5179.

[5] Hsiao, K.M. Ching, P.L. How, P.W. Chun, H.P. and Chia, C.H. (2014). Waste heat recovery using a thermoelectric power generation system in a biomass gasifier. Applied Thermal Engineering, No. 1, pp. 1-6.

[6] Lersatitthanakorn, C., (2007). Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. Bioresource Technology, Vol. 98, pp. 1670-1674.