

การศึกษาการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตไฟฟ้า

Study of thermoelectric systems applied to electric power generation

สุระ ตันดี^{1*}, สุขุม สุธรรมมา¹ และ สุทิน ตูลาเพียร¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000 โทร 043 235 893-4 ต่อ 2601 โทรสาร 043 237 483
E-mail: suratundee2000@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการดำเนินชีวิต พลังงานไฟฟ้าส่วนมากได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ได้จากฟอสซิล ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษและมีจำนวนลดลงเรื่อย ๆ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้พลังงานจากอากาศร้อน เทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดผลิตไฟฟ้าขนาด 40 x 40 mm หนา 4 mm ต่ออนุกรมกันจำนวน 12 ตัว ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกด้านรับความร้อนเข้ากับท่อที่สร้างขึ้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านละ 6 ตัว และใช้แผ่นระบายความร้อนติดตั้งด้านระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ความเร็วของอากาศที่ระบายความร้อน 3 ค่า 2.24 m/s, 2.75 m/s และ 4.64 m/s ชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งในอุโมงค์ลมขนาด 200 x 200 x 1500 mm ใช้แหล่งให้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าขนาด 2,500 W ให้ความร้อนกับอากาศ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศให้ความร้อน 6 ค่า 50 °C - 300 °C จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน แหล่งระบายความร้อน ความเร็วของอากาศและความต้านทานทางไฟฟ้า มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนสูงขึ้น และความเร็วของอากาศที่ระบายความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้น จากผลการทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 7.8 โวลต์

คำหลัก: เทอร์โมอิเล็กทริก, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, พลังงานทางเลือก

Abstract

Electricity plays a vital role in our everyday lives. It is generated mostly from combustion of unsustainable fossil fuels which results in harmful emissions. This paper experimentally investigates the use of thermoelectric generators (TEGs) as an alternative way of recovering power from a hot air flow. The test assembly consisted of 12, 40 x 40 mm TEGs connected in series, with the hot side fixed to a rectangular heat pipe and the cold side to a heat sink. Heat was supplied to the pipe by an air flow heated to temperatures between 50°C to 300°C by a 2500 W heater while the heat sink was cooled by placing the whole assembly in a 200 x 200 x 1500 mm wind tunnel using wind speeds of 2.24m/s, 2.75m/s and 4.64m/s. Results have shown that the output voltage and current depend on the temperatures of the hot air flow, cooling air speed and electrical resistance. The output power increases with increasing temperature of the heater and with increasing wind speed due to increasing temperature difference between the hot and cold sides. The maximum voltage that could be produced was 7.8 V at heat source 300°C.

Keywords: Thermoelectric, Electric Power Generation, Heat Exchanger, Renewable Energy.

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนรูปของพลังงาน ไปเป็นรูปอื่นได้ง่าย เช่นเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน เปลี่ยนจากพลังงาน

ไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือเปลี่ยนเป็นรูปแบบต่างๆตามความต้องการใช้งาน ในปัจจุบันแนวโน้มความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันแหล่งพลังงานที่ใช้ผลิตไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซ

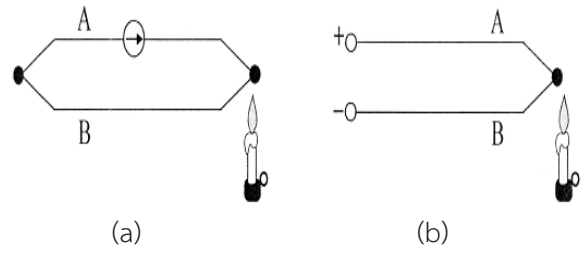
ธรรมชาติ ไม่พอเพียงต่อความต้องการ Goswami,Y.D. [3] ได้ทำการศึกษาการลดลงของปริมาณเชื้อเพลิงที่ได้จากฟอสซิล ในปี 2004 ทั่วโลกมีการใช้ก๊าซธรรมชาติ 180×10^9 ล้านบาร์เรลและในปี 2005 มีการใช้น้ำมัน 1.20×10^6 ล้านบาร์เรลหรือคิดเป็นการใช้ก๊าซธรรมชาติ 80 ล้านบาร์เรลต่อวันและน้ำมัน 7.36×10^3 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งถ้ามีการใช้ในอัตรานี้ต่อเนื่องตลอดไปโลกของเราจะมีก๊าซธรรมชาติและน้ำมันใช้ได้อีก 41 และ 67 ปี Kaushik et al. [4] ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก “Thermoelectric generation TEG” ซึ่งจะแปลงพลังงานความร้อนเป็นไฟฟ้าได้โดยตรงบนพื้นฐานของซีเบ็ค “Seebeck effect” ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากความร้อนต่างๆ เช่น ความร้อนจากหลังคาบ้าน Maneewan et al. [7], Maneewan et al. [8] ความร้อนจากท่อความร้อน He et al. [5] และระบบความร้อนร่วม Chávez-Urbiola et al. [2] Hsiao et al. [6] ได้สร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนจากหม้อน้ำรถยนต์พบว่าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.43 W มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 1.48 % อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหม้อน้ำรถยนต์ จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งให้ความร้อนกับเทอร์โมอิเล็กทริกและใช้อากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นแหล่งระบายความร้อนเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนเหลือทิ้งในการผลิตไฟฟ้า

2. ทฤษฎี

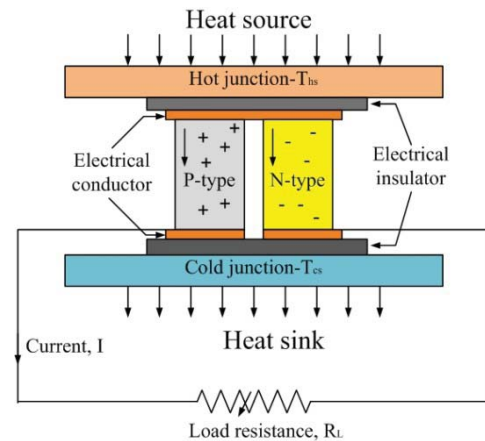
2.1 เทอร์โมอิเล็กทริก

ในปี ค.ศ. 1821 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน Thomas Seebeck พบว่าเมื่อนำขดลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้ง 2 นี้ตามรูปที่ 1 (a) ปริมาณการไหลของกระแส ไฟฟ้านี้เปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปลายด้านเปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า “ซีเบ็คโวลต์” ดังรูปที่ 1 (b)



รูปที่ 1 หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับ Seebeck Effect

การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล “โหมดผลิตไฟฟ้า (Generator Mode)” โดยให้ความต่างของอุณหภูมิบนแผ่นเซรามิคด้านบนและล่างทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากตัวนำชนิดเอ็นและพีในสารกึ่งตัวนำเหล่านั้น ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งมีตัวนำมากเป็นอิเล็กตรอน (Electron) หรือประจุลบ เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง การไหลของความร้อนจะทำให้เกิดการไหลของตัวนำมาก



รูปที่ 2 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริก

2.2 สมรรถนะของเทอร์โมอิเล็กทริก

สมรรถนะของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถหาได้จากสมการด้านล่าง Rowe DM. [10]

$$Z = \frac{\alpha^2}{kR} \quad (1)$$

เมื่อ z คือ figure of merit

α คือ Seebeck coefficient

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2)$$

R คือความต้านทานทางไฟฟ้า

K คือค่าการนำความร้อน

เมื่อคุณอุณหภูมิสมบูรณ์เฉลี่ยเข้าไปที่สมการที่ (1) จะทำให้ค่าของ figure of merit ไม่มีหน่วยดังสมการที่ (2)

$$z\bar{T} = \alpha^2\bar{T}/kR \quad (3)$$

$$\bar{T} = \frac{T_H - T_L}{2} \quad (4)$$

จากกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ประสิทธิภาพสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพของคาร์โนซเคิลแบบคืนสภาพจะได้ดังสมการที่(5) Cengel YA, Boles MA. [1]

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5)$$

ประสิทธิภาพสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อคิดแบบไม่คืนสภาพจะได้ดังสมการที่(6) Min G et al. [9]

$$\eta = \eta_{Carnot} \left[\frac{\sqrt{1+z\bar{T}}-1}{\sqrt{1+z\bar{T}+T_L/T_H}} \right] \quad (6)$$

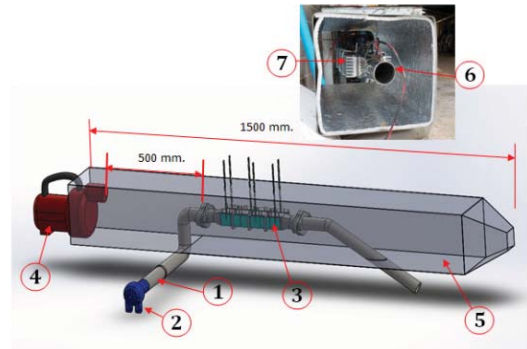
3. อุปกรณ์และการทดลอง

3.1 การติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริก

ระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนทั้งหมด 12 โมดูลต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้าติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกกับท่อรับความร้อนที่สร้างขึ้นเป็นลักษณะรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยแบ่งติดตั้งที่ด้านข้างของท่อรับความร้อนข้างละ 6 โมดูล และใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนติดตั้งเข้ากับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อระบายความร้อน ที่ผิวทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกใช้ซิลิโคนนำความร้อนทาเคลือบไว้บางๆเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี และยึดติดกันให้แน่นโดยใช้เหล็กยึดเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัว รูป 3 แสดงส่วนประกอบต่างๆของชุดผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วย

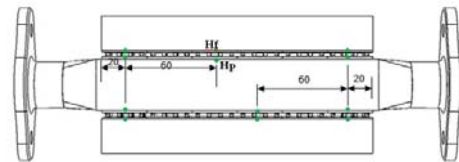
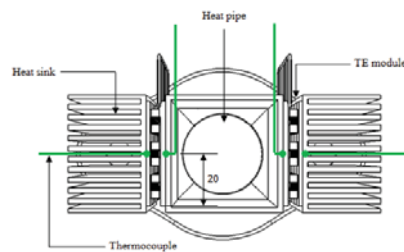
- หมายเลข 1 คือ อุปกรณ์ให้ความร้อน
- หมายเลข 2 คือ โบลเวอร์เป่าอากาศร้อน
- หมายเลข 3 คือ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- หมายเลข 4 คือ โบลเวอร์ระบายความร้อน
- หมายเลข 5 คือ อุโมงค์ลม
- หมายเลข 6 คือ ท่อรับความร้อน
- หมายเลข 7 คือ อุปกรณ์ระบายความร้อนชุดผลิตไฟฟ้ามีความยาวท่อ 450 mm.

ระยะห่างระหว่างพัดลมระบายความร้อนกับชุดผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 500 mm. อุโมงค์ลมมีขนาด 200 x 200 x1500 mm.



รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งและส่วนประกอบของชุดผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

3.2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล (หน่วยที่กำหนดเป็น mm)

จากรูป 4 แสดงถึงจุดที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆดังนี้

1. จุด Hf อยู่กึ่งกลางของเทอร์โมอิเล็กทริกระหว่างผิวของแหล่งระบายความร้อนกับผิวของเทอร์โมอิเล็กทริก แบ่งเป็นข้างละ 3 ตำแหน่ง ซึ่งอยู่ห่างจากขอบของเทอร์โมอิเล็กทริก 20 mm. ตำแหน่งกึ่งกลางอยู่ห่างจากจุดด้านข้าง 60 mm.
2. จุด Hp อยู่กึ่งกลางของเทอร์โมอิเล็กทริกระหว่างผิวของท่อรับความร้อนกับผิวของเทอร์โมอิเล็กทริก แบ่งเป็นข้างละ 3 ตำแหน่ง ซึ่งอยู่ห่างจากขอบของเทอร์โมอิเล็กทริก 20 mm. ตำแหน่งกึ่งกลางอยู่ห่างจากจุดด้านข้าง 60 mm.
3. อุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าท่อรับความร้อน
4. อุณหภูมิอากาศร้อนหลังออกจากท่อรับความร้อน

5. อุณหภูมิอากาศก่อนระบายความร้อน
6. อุณหภูมิอากาศหลังระบายความร้อนจาก
7. อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในการทดสอบ

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการปรับอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน 6 ค่า 50°C - 300°C เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 °C ซึ่งแต่ละช่วงอุณหภูมิจะใช้เวลาอยู่ที่ 30 นาที
2. ปรับอัตราการไหลของอากาศ 3 ค่าเพื่อระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อระบายความร้อน
3. ปรับค่าความต้านทานภายนอกจำนวน 10 ค่าจาก 1 Ω - 10 Ω เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 Ω
4. เก็บข้อมูลอุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อนและด้านเย็น ทุกๆ 1 นาที
5. เก็บข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้า ทุกๆ 1 นาที

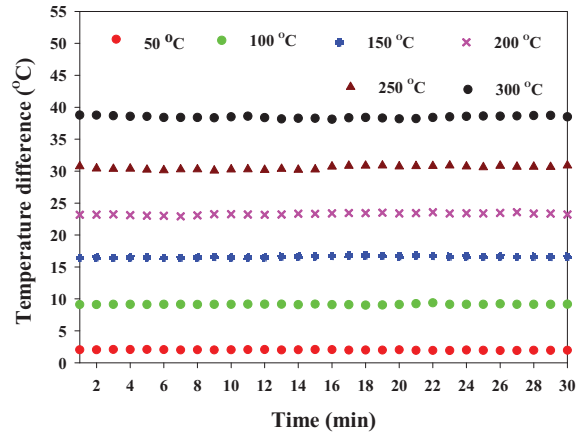
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทำการทดลองเพื่อศึกษา ผลของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนต่ออุณหภูมิแตกต่างของด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้ ผลของความต้านทานทางไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้ และผลของความต้านทานทางไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้ ในการทำการทดลองทำการปรับอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน 50°C - 300°C เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 °C ซึ่งแต่ละช่วงอุณหภูมิจะใช้เวลาอยู่ที่ 30 นาที และปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานจาก 1 Ω - 10 Ω เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 Ω ทำการทดลองชุดละ 3 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ย ใช้เวลาในการทดลองครั้งละ 30 นาที เก็บข้อมูลทุก 1 นาที

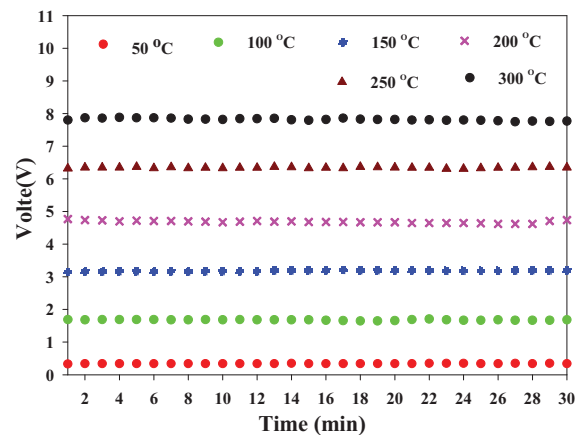
4.1 ผลของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน

ในการทำการทดลองทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 6 ค่า โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 50 °C โดยให้อัตราการไหลของอากาศด้านระบายความร้อนมีค่าคงที่ จากรูป 5 จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมี

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.0,9.14,16.57,23.29,30.53,38.45 ตามลำดับ

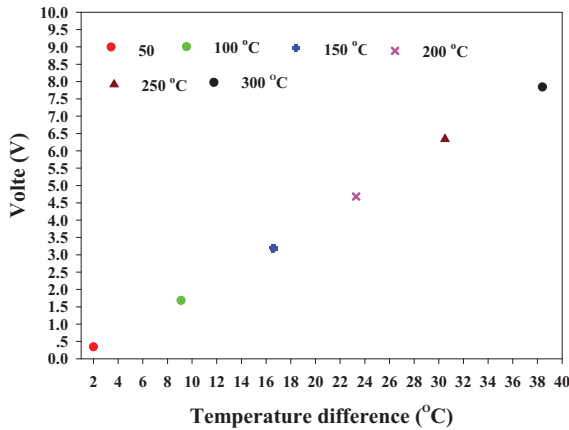


รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนกับผลต่างของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

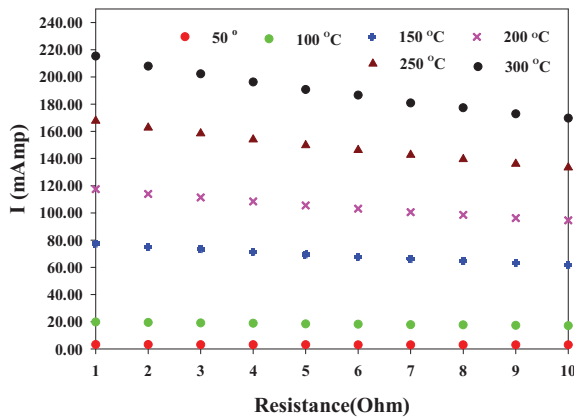
รูป 6 แสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดแบบ Open circuit จะเห็นได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนสูงขึ้นทำให้มีการถ่ายเทความร้อนให้กับด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เกิดผลต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้น ทำให้ของเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกต่อการผลิตไฟฟ้า

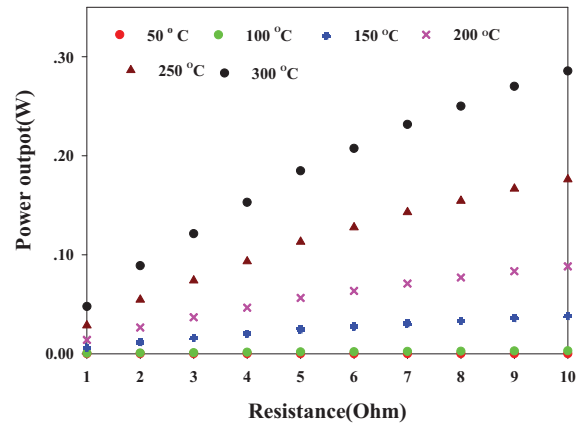
รูป 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกต่อแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้เมื่อวัดแบบ Open circuit พบว่าเมื่อผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแปรผันไปทางเดียวกันกับผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

4.2 ผลของความต้านทานทางไฟฟ้า



รูปที่ 8 ผลของความต้านทานทางไฟฟ้าต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

รูป 8 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้เมื่อทำการวัดแบบ Short circuit พบว่าเมื่อค่าความต้านทานไฟฟ้ามี่ค่าสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้จะมีค่าลดลง และมีแนวโน้มเดียวกันของทุกอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นมีคุณสมบัติขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 9 ผลของความต้านทานทางไฟฟ้าต่อกำลังทางไฟฟ้า

รูป 9 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อกำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้เมื่อทำการวัดแบบ Short circuit พบว่าเมื่อค่าความต้านทานไฟฟ้ามี่ค่าสูงขึ้น กำลังที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน

5. สรุป

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน แหล่งระบายความร้อน ความเร็วของอากาศและความต้านทานทางไฟฟ้า มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า กำลังทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้น จากผลการทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 7.8 โวลต์ ที่แหล่งให้ความร้อน 300 °C

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่นที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Cengel, YA and Boles, MA. (2008). Thermodynamics: An engineering approach. 6th ed. McGraw-Hill press, New York.
[2] Chávez-Urbiola, E. A., Vorobiev, Y. V., and Bulat, L. P. (2012). Solar hybrid systems with thermoelectric generators. Solar Energy, vol. 86(1), January 2012, pp. 369 - 378.

- [3] Goswami, Y. D., (2007). Energy: the burning issue. *Refocus* (January-February), pp. 22-25.
- [4] Kaushik, S. C., Manikandan, S., and Hans, R. (2015). Energy and exergy analysis of thermoelectric heat pump system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 86, July 2015, pp. 843 - 852.
- [5] He, W., Su, Y., Wang, Y. Q., Riffat, S. B., and Ji, J. (2012). A study on incorporation of thermoelectric modules with evacuated-tube heat-pipe solar collectors. *Renewable Energy*, vol. 37(1), January 2012, pp. 142 - 149.
- [6] Hsiao, Y. Y., Chang, W. C., and Chen, S. L. (2010). A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. *Energy*, vol. 35(3), March 2010, pp. 1447-1454.
- [7] Maneewan, S., Khedari, J., Zeghmati, B., Hirunlabh, J., and Eakburanawat, J. (2004). Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector. *Renewable Energy*, vol. 29(5), April 2004, pp. 743 - 752.
- [8] Maneewan, S., Hirunlabh, J., Khedari, J., Zeghmati, B., and Teekasap, S. (2005). Heat gain reduction by means of thermoelectric roof solar collector. *Solar Energy*, vol. 78(4), April 2005, pp. 495 - 503.
- [9] Min G., Rowe DM., and Kontostavlakis K. (2004). Thermoelectric figure-of-merit under large temperature differences. *J Phys D: Appl Phys* 2004, vol. 37, March 2004, pp. 1301-1304.
- [10] Rowe DM., (2006). Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source *Int J Innov Energy Syst Power*, 2006, vol.1, pp.13 - 23.