

## การหาค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยอาศัยปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

### MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF MATERIALS BASED ON THERMOELECTRIC EFFECT

พัชรียา ชนไฮ และ เขมฤทัย ถามะพัฒน์\*

ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์เพื่อคำตอบของสังคม ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพมหานคร 10140

Pachareeya Chonhai and Kheamrutai Thamaphat\*

Applied Science and Engineering for Social Solution Research Center, Department of Physics,  
Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Bangkok 10140

\*E-mail: kheamrutai.tha@kmutt.ac.th

Received: 07-06-2023

Revised: 02-07-2023

Accepted: 12-07-2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุภายใต้การวัดแบบสภาวะคงตัว โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่หาได้ง่ายในท้องตลาดและมีราคาถูก มาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและความเย็น ภายใต้ปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน และใช้เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อน ภายใต้ปรากฏการณ์ซีเบคที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า สำหรับชุดหาค่าความร้อนและความเย็นแต่ละชุดประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ขนาด  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$  จำนวน 4 โมดูลมาต่อกันแบบขนาน ชุดหาค่าความร้อนและชุดหาค่าความเย็นถูกประกบเข้ากับแผ่นทองแดงแต่ละแผ่นที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุทดสอบขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  ที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นทองแดงทั้ง 2 แผ่น ในรูปแบบแซนวิชโดยจะมีการฝังเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในแผ่นทองแดงที่ประกบติดกับชุดหาค่าความร้อนเพื่อวัดฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านพื้นผิวของวัสดุทดสอบ เมื่อนำชุดอุปกรณ์นี้ไปทดลองหาค่าการนำความร้อนของแผ่นโพลิสไตรีนที่ทราบค่าการนำความร้อนจากการทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C518 พบว่าชุดอุปกรณ์นี้มีความถูกต้องสูง มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.87%

**คำสำคัญ:** ค่าการนำความร้อน ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏการณ์เพลเทียร์ ปรากฏการณ์ซีเบค เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

## ABSTRACT

This work aims to develop an apparatus for measuring the thermal conductivity of bulk materials based on the steady-state method, employing a thermoelectric module (TEM). The cost-effective and easily accessible TEMs were utilized as the heating source, cooling source, and heat flux meter. The TEM was used to generate heating and cooling on the basis of the Peltier effect, which involves the conversion of electricity into thermal energy. On the contrary, the Seebeck effect, based on the direct conversion of thermal energy into electricity, was employed as the principle for creating a heat flux meter. To generate heating or cooling, four TEMs, each with dimensions of  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ , were connected in a parallel circuit to form the heating and cooling sets. Each set was in direct contact with a copper heat exchanger plate, creating a sandwich model with an  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  sample material placed in the middle. A TEM was embedded in the copper plate near the heating set to measure the heat passing through the sample surface. To validate the accuracy of this apparatus, the thermal conductivity value of a polystyrene foam, which was tested according to ASTM C518, was compared with the value obtained by using an apparatus developed in this work. The results indicated that this apparatus achieved high accuracy, with an average error of 0.87%.

**Keywords:** Thermal Conductivity, Thermoelectric Effect, Peltier Effect, Seebeck Effect, Thermoelectric Module

## บทนำ

การนำความร้อนเกิดขึ้นจากการถ่ายโอนพลังงานความร้อนไปยังวัสดุทำให้เกิดการสั่นภายในโมเลกุล และถูกส่งผ่านจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งโดยที่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนย้าย (Chinnaboon, 2012) วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติในการนำความร้อนแตกต่างกัน สมบัตินี้ถูกนิยามด้วยค่าการนำความร้อน หรือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ซึ่งเป็นค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับความหนา พื้นที่ผิว และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับวัสดุ วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงจัดเป็นวัสดุประเภทตัวนำความร้อน (Conductor) และวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำจัดเป็นวัสดุประเภทฉนวนความร้อน (Insulator) ปัจจุบันมีการนำค่าการนำความร้อนไปประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในการเลือกวัสดุสำหรับงานด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ งานออกแบบสถาปัตยกรรม และสิ่งก่อสร้าง (Khaothong, 2019 ; Thongchainumchok et al., 2022) เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ จึงเป็นสาเหตุให้มีการพัฒนาวิธีการต่าง ๆ เพื่อหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Yüksel, 2016) โดยทั่วไปวิธีการหาค่าการนำความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ๆ ตามหลักการวัด ได้แก่ 1) การวัดแบบสถานะไม่คงตัว (Transient method) เป็นการวัดในขณะที่มีการให้ความร้อนแก่วัสดุซึ่งอุณหภูมิของวัสดุจะถูกพิจารณาภายใต้สภาวะเงื่อนไขแบบไม่คงตัว (มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา) ทำให้ใช้เวลาในการวัดที่รวดเร็วเนื่องจากไม่จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวอย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องใช้การคำนวณและสมการที่ยากซับซ้อน (Rincon-Tabares et al., 2022) และ 2) การวัดแบบสถานะคงตัว (Steady-state method) โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุ จนกระทั่งอุณหภูมิของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งวิธีการนี้มีความถูกต้อง (Accuracy) สูงกว่าวิธีการวัดแบบสถานะไม่คงตัว (Kraemer & Chen, 2014)

ในการหาค่าการนำความร้อนโดยอาศัยหลักการวัดแบบสภาวะคงตัวนั้นสามารถหาได้ตามวิธีมาตรฐาน เอเอสทีเอ็ม (American society for testing and materials หรือ ASTM) ที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 วิธีตามมาตรฐาน ASTM C117 หรือเรียกว่า วิธี Guard Hot Plate (GHP) ส่วนประกอบหลักของวิธีการนี้ คือ ชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็นที่ประกบอยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นวัสดุที่ต้องการทดสอบ ตามลำดับ ชุดทำความร้อนเป็นแผ่นโลหะมี 2 ส่วน คือ แผ่นทำความร้อน (Heat plate) และแผ่นป้องกัน (Guard plate) โดยแผ่นทำความร้อนจะอยู่กึ่งกลาง และมีแผ่นป้องกันอยู่โดยรอบทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกด้านข้าง ซึ่งวิธีการนี้สามารถวัดฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ที่ถ่ายโอนไปยังวัสดุได้โดยตรง (Absolute method) จึงไม่ต้องการสอบเทียบ มีช่วงของอุณหภูมิการวัดกว้างอยู่ในช่วง  $-160^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$  ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องสูง แต่มีข้อเสีย คือ ใช้เวลาการวัดนาน เนื่องจากต้องรอให้แผ่นทำความร้อนและแผ่นป้องกันมีอุณหภูมิเท่ากัน และต้องใช้แผ่นวัสดุที่ต้องการทดสอบ 2 ชิ้น เพื่อยืนยันว่าการถ่ายเทความร้อนอย่างสมมาตร (ASTM C117, 2002 ; Reddy & Jayachandran, 2016) สำหรับวิธีที่ 2 คือ วิธีตามมาตรฐาน ASTM C518 หรือเรียกว่า วิธี Heat Flow Meter (HFM) วิธีการนี้ประกอบด้วยชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็น ประกบอยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นวัสดุ ที่ต้องการทดสอบเช่นเดียวกับวิธี GHP แต่ไม่มีแผ่นป้องกัน ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบชุดอุปกรณ์อย่างดีเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปในทิศทางเดียว วิธีการนี้เป็นวิธีการวัดที่ง่าย รวดเร็ว และค่าที่วัดได้มีความถูกต้องสูง แต่ไม่สามารถวัดฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังวัสดุได้โดยตรง (Comparative method) จึงมีตัววัดฟลักซ์ ความร้อนทำหน้าที่แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเทียบเป็นอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านวัสดุ (ASTM C518, 1998 ; Sánchez-Calderón et al., 2022)

หลายงานวิจัยได้พัฒนาชุดทดลองสำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุขึ้นโดยอาศัยหลักการวัดแบบสภาวะคงตัว เช่น การใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน และน้ำแข็งเป็นแหล่งกำเนิดความเย็น และประยุกต์ใช้อัตราการละลายของน้ำแข็งแทนการวัดฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายโอนผ่านแผ่นวัสดุทดสอบ อย่างไรก็ตามค่าการนำความร้อนที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสูงประมาณ 57% (Tananchai, 2014) นอกจากนั้น มีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module หรือ TEM) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น (N-type) และชนิดพี (P-type) แผ่นขั้วไฟฟ้า และแผ่นเซรามิกฐานรอง สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนหรือเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าตามปรากฏการณ์ เพลเทียร์ - ซีเบค (Peltier-Seebeck effect) (Harun et al., 2018 ; Feofanov et al., 2021) มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาชุดทดลองสำหรับหาค่าการนำความร้อน เช่น การออกแบบชุดอุปกรณ์โดยอาศัยหลักการวัดแบบสภาวะคงตัวที่นำ TEM มาเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน และใช้วัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าการนำความร้อนเป็นตัวเทียบค่าฟลักซ์ ความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุ พบว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุที่วัดได้ มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3.2% (Ajiwiguna & Kim, 2016) หรือออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้วิธีการวัดแบบ HFM โดยใช้ TEM เป็นแหล่งกำเนิด ความร้อนและความเย็น และใช้เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนเป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อน พบว่าชุดทดลองมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.6% (Khaothong, 2019) นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่นำเอา TEM มาประยุกต์ใช้เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อน สำหรับชุดอุปกรณ์การวัดแบบ GHP อีกด้วย โดยนำ TEM ฝังในแผ่นตัวนำที่สัมผัสกับท่อน้ำร้อนซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน พบว่าค่าการนำความร้อน ของวัสดุที่วัดได้ มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 2% (Dubois, 2013)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นชี้ให้เห็นได้ว่า ถ้าสามารถออกแบบระบบการวัดค่าการนำความร้อน ให้นำเอาข้อดีของทั้งวิธี GHP และ HFM มารวมกันได้จะทำให้มีแผ่นป้องกันความร้อนเพื่อบังคับให้การถ่ายเท ความร้อนเป็นไปในทิศทางเดียว ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดสั้นลงกว่าวิธี GHP ใช้แผ่นวัสดุที่ต้องการทดสอบเพียง 1 แผ่น และค่าที่วัดได้

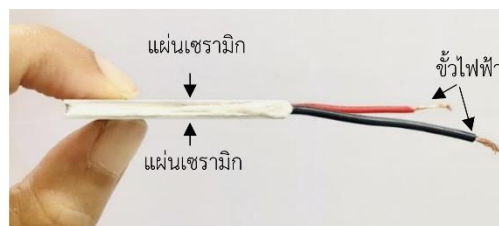
มีความถูกต้องสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาชุดอุปกรณ์สำหรับ วัดค่าการนำความร้อนของวัสดุ โดยอาศัยหลักการวัดแบบสภาวะคงตัวที่นำเอาหลักการของวิธี GHP และ HFM มารวมเข้าด้วยกัน นอกจากนั้นยังนำเอา TEM ที่มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายมาประยุกต์ใช้ โดยนำ TEMs มาประกอบเป็นชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็น และมีแผ่นป้องกันอยู่รอบ TEMs ที่ทำหน้าที่เป็นชุดทำความร้อน เพื่อป้องกันความร้อนไม่ให้ถ่ายเทออกด้านข้าง และนำเอา TEM มาทำหน้าที่เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อนแทนการใช้เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีราคาสูง (Dubois, 2013) โดยหลังจากการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับวัดค่าการนำความร้อนเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์โดยใช้วัสดุตัวอย่างเป็นฉนวนความร้อนประเภทต่าง ๆ ได้แก่ แผ่นโฟมโพลีสไตรีน แผ่นโฟมโพลีเอทิลีน ยางสังเคราะห์เอทิลีน-โพรพิลีนโมโนเมอร์ และกระดาษลูกฟูก

### วิธีการ

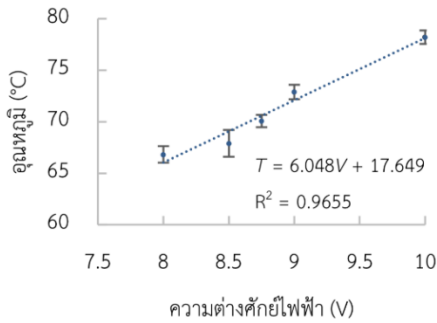
ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุด้วยหลักการวัดแบบสภาวะคงตัว ทั้งวิธี GHP และ HFM โดยมี TEM เป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทหลักในการวัด ดังนั้น ในการดำเนินงานวิจัยจึงแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับ หาค่าการนำความร้อนของวัสดุ การหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และการทดสอบความถูกต้องของชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ

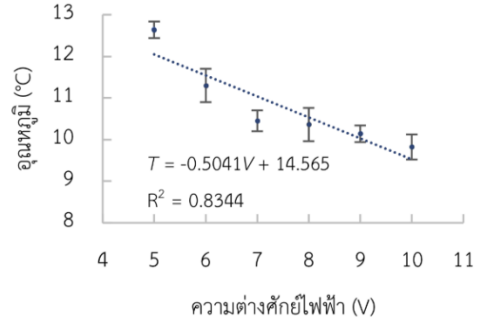
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ โดยนำ TEM ที่หาซื้อได้ง่ายและเป็นที่นิยม นั่นคือรุ่น TEC1-12706 ขนาด  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$  ดังแสดงในภาพที่ 1 มาสร้างเป็นชุดทำความร้อน ชุดทำความเย็น และตัววัดฟลักซ์ความร้อน สำหรับการทำหน้าที่เป็นชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็นของ TEM จะอาศัยปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน กล่าวคือ เมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นเซรามิก ทั้งสองแผ่น (แผ่นหนึ่งจะร้อน และอีกแผ่นหนึ่งจะเย็น) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) กับอุณหภูมิ (T) เป็นไปตามกราฟ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEC1-12706 ขนาด  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$



แผ่นเซรามิกด้านร้อน



แผ่นเซรามิกด้านเย็น

ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแผ่นเซรามิก

จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่า หากต้องการนำ TEM มาใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งกำเนิดความเย็น สามารถควบคุมได้โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่น TEM ตามสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ

$$T = 6.048V + 17.649 \quad (1)$$

และ

$$T = -0.5041V + 14.565 \quad (2)$$

สำหรับการนำ TEM มาเป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อน จะอาศัยการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าตามปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) กล่าวคือ เมื่อแผ่นเซรามิกทั้งสองได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จะมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นั่นคือมีการสั่นของอนุภาคโฟนอน (Phonon) และการเคลื่อนที่ของโฮล (Hole) และอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าออกมา และสามารถวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (แรงดันไฟฟ้าขาออก) ได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นเซรามิกทั้งสองแผ่น กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3) (RDI-SNRU, 2019 ; Seetawan, 2015)

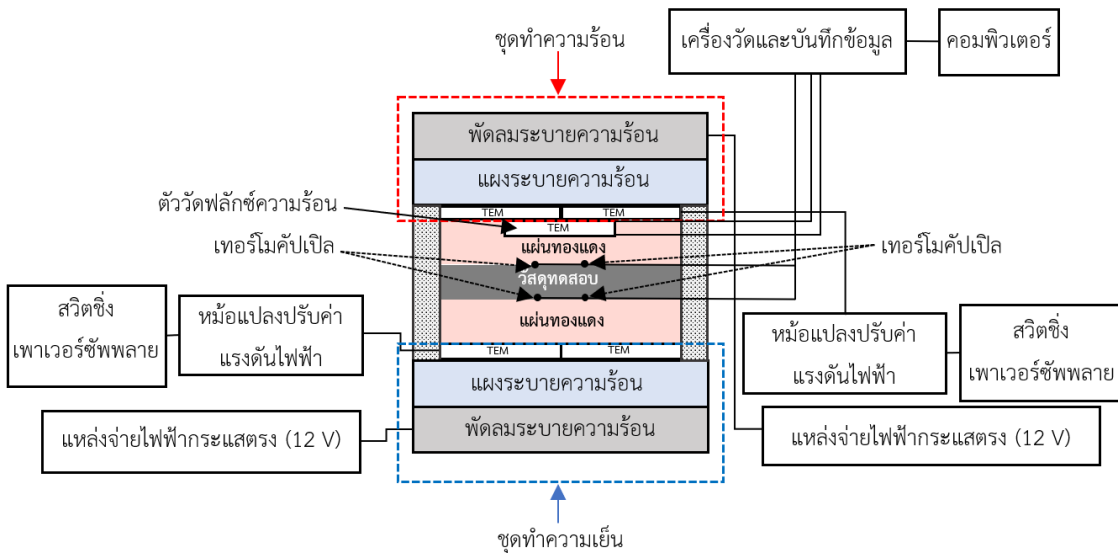
$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

เมื่อ  $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) (V/K)

และ  $\Delta T$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K)

จากสมการที่ (3) จะเห็นได้ว่า เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุและสัมพันธ์กับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน (Zhang et al., 2011) ดังนั้นการนำ TEM ไปประยุกต์ใช้เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อน จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่นำมาใช้งานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงการทดลองขั้นตอนนี้ในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 3 แผนภาพมุมมองด้านข้างของชุดอุปกรณ์หาค่าการนำความร้อน และการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์เข้ากับระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุมและแสดงผล

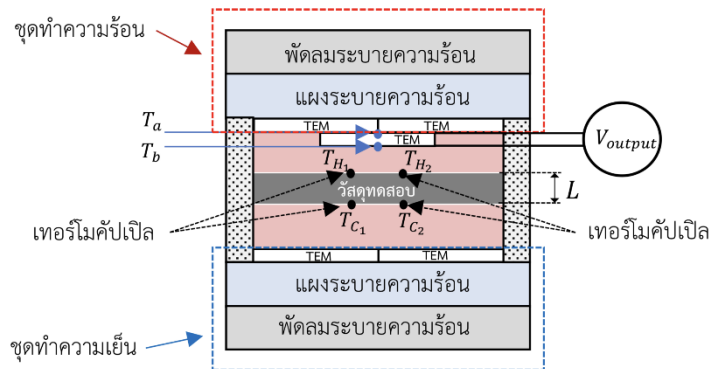
ในการออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนตามหลักการวัดแบบสถานะคงตัว ที่รวมเอาข้อดีของวิธี GHP และ HFM เข้าด้วยกันนั้น เป็นไปตามภาพที่ 3 เริ่มจากการสร้างชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็นแต่ละชุดจะสร้างจาก TEM ขนาด  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$  จำนวน 4 แผ่น ที่นำมาต่อกันแบบขนาน และติดเข้ากับระบบระบายความร้อนอย่างง่าย ประกอบด้วย แผงระบายความร้อน (Heat sink) และพัดลมระบายความร้อน โดยชุดกำเนิดความร้อนและความเย็นแต่ละชุดจะถูกต่อเข้ากับหม้อแปลงปรับค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน (Variable voltage transformer หรือ VARIAC) ยี่ห้อ STABLE รุ่น TDGC2-0.5KVA เพื่อปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มาจากสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย (Switching power supply) ยี่ห้อ MEANWELL รุ่น LRS-150-12 ให้มีค่าตามที่ต้องการ สำหรับควบคุมอุณหภูมิของชุดกำเนิดความร้อนและความเย็น ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) - (2)

จากภาพที่ 3 ชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็นจะประกอบอยู่ด้านบนและด้านล่าง โดยมีแผ่นทองแดงเกรด C1100 ขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  หนา 6.0 mm (ขนาดที่กำหนดสอดคล้องกับขนาดของแผงระบายความร้อน และเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนและความเย็นให้แก่วัสดุทดสอบขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  ที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นทองแดงทั้ง 2 แผ่น ในรูปแบบแซนวิช โดยมีการฝัง TEM ขนาด  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$  จำนวน 1 แผ่น ไว้ในแผ่นทองแดงที่ประกบเข้ากับชุดทำความร้อน เพื่อทำหน้าที่เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านพื้นผิวของวัสดุทดสอบ และมีเทอร์โมคัปเปิล (Type K) จำนวน 4 เส้น วางบริเวณผิวหน้าของ วัสดุทดสอบโดยให้สัมผัสกับแผ่นทองแดง สายเทอร์โมคัปเปิลและสายไฟจากตัววัดฟลักซ์ความร้อน จะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ WISCO รุ่น AI210 ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop) สำหรับด้านข้างของชุดอุปกรณ์ จะถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนแบบแผ่นที่ผลิตจาก โพลีเอทิลีน (Polyethylene foam) เพื่อบังคับให้ความร้อนไหลในทิศทางเดียว

## 2. การหาค่าการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM

การทดลองในตอนนี้จะแสดงวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่นำมาใช้เป็นตัววัดพลังความร้อน โดยอาศัยชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ดังแสดงในภาพที่ 3 และใช้วัสดุที่ทราบค่าการนำความร้อนมาเป็นวัสดุทดสอบ ในการทดลองเลือกใช้แผ่นโฟมโพลิสไตรีน (Polystyrene foam) ที่มีความหนาแน่น 1.0 LB/FT ขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  หนา 10.0 mm มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ  $0.03510 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (วัดตามมาตรฐาน ASTM C518 โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ) ณ ช่วงอุณหภูมิทดสอบเฉลี่ย  $23.0 \pm 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นวัสดุทดสอบ



ภาพที่ 4 ตัวแปรในการวัดที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของชุดอุปกรณ์

พิจารณาภาพที่ 4 ในการทดลองจะควบคุมให้ชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็นมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $33.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $12.71 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ โดยอาศัยการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามสมการที่ (1) – (2) ความร้อนจากชุดทำความร้อนจะถ่ายโอนไปยังตัววัดพลังความร้อนและวัสดุทดสอบ ซึ่งในที่นี้ คือ แผ่นโฟมโพลิสไตรีน ความร้อนที่ถ่ายโอนผ่านตัววัดพลังขึ้น (เทียบเท่ากับปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังวัสดุ) ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านของ TEM ( $T_a - T_b$ ) ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{output}$ ) ตามปรากฏการณ์ซีเบค และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิที่พื้นผิวของแผ่นโฟมโพลิสไตรีน  $T_H$  (ค่าเฉลี่ยของ  $T_{H1}$  และ  $T_{H2}$ ) และ  $T_C$  (ค่าเฉลี่ยของ  $T_{C1}$  และ  $T_{C2}$ ) จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในการทดลองจะทำการบันทึกค่า  $T_{H1}$ ,  $T_{H2}$ ,  $T_{C1}$ ,  $T_{C2}$  และ  $V_{output}$  โดยใช้ data logger เป็นระยะเวลา 60 นาที โดยจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่ทำหน้าที่เป็นตัววัดพลังความร้อน ซึ่งคำนวณจากปริมาณความร้อน ( $Q$ ) ที่ถ่ายโอนผ่านตัววัดพลัง (เทียบเท่ากับปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังวัสดุ) ดังสมการที่ (4)

$$Q = \frac{kA(T_H - T_C)}{L} \quad (4)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุทดสอบ ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )

$Q$  คือ ปริมาณความร้อน (W)

$L$  คือ ความหนาของวัสดุทดสอบ (m)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ ( $m^2$ )

และ  $T_H - T_C$  คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่พื้นผิวทั้ง 2 ด้านของวัสดุ (K)

แทนค่า  $T_H - T_C$  ที่ได้จากการทดลองลงในสมการที่ (4) กำหนดให้ค่าการนำความร้อนของแผ่นโพลีไธรีน เท่ากับ  $0.03510 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ความหนา  $10.0 \text{ mm}$  และพื้นที่หน้าตัด  $16 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำค่า  $Q$  ที่คำนวณได้ไปหาค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านของ TEM ( $T_a - T_b$ ) ดังสมการที่ (5)

$$T_a - T_b = \frac{QL_{te}}{k_{te}A_{te}} \quad (5)$$

เมื่อ  $k_{te}$  คือ ค่าการนำความร้อนของ TEM มีค่าเท่ากับ  $1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

$A_{te}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่น TEM มีค่าเท่ากับ  $16 \text{ cm}^2$

และ  $L_{te}$  คือ ความหนาของแผ่น TEM มีค่าเท่ากับ  $3.8 \text{ mm}$

นำค่า  $T_a - T_b$  ที่คำนวณได้และค่า  $V_{output}$  ที่ได้จากการทดลอง ลงในสมการที่ (6) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

$$\alpha = \frac{V_{output}}{(T_a - T_b)} \quad (6)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่คำนวณได้ จะนำไปใช้เป็นค่าคงตัวของตัววัดพลังค์ความร้อนในการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุต่อไป

### 3. การทดสอบความถูกต้องของชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ

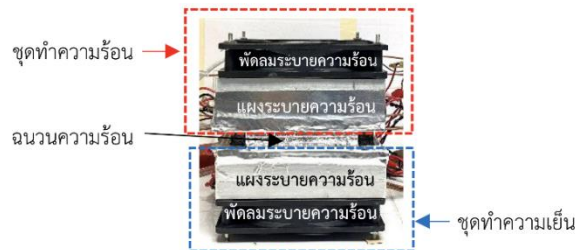
หลังจากออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ และหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่นำมาใช้เป็นตัววัดพลังค์ความร้อนแล้ว การทดลองในขั้นตอนนี้ จึงเป็นการดำเนินการทดสอบความถูกต้อง (Validation) ของชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้วัสดุทดสอบที่ทราบค่าการนำความร้อนตามมาตรฐานในการทดลองนี้เลือกใช้แผ่นโพลีไธรีน ที่มีความหนาแน่น  $1.25 \text{ LB/FT}$  ขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  หนา  $10.0 \text{ mm}$  และมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ  $0.03467 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (วัดตามมาตรฐาน ASTM C518 โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ) ควบคุมให้ชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็นมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $33.07^\circ\text{C}$  และ  $12.71^\circ\text{C}$  ตามลำดับ และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว บันทึกค่า  $T_{H_1}$ ,  $T_{H_2}$ ,  $T_{C_1}$ ,  $T_{C_2}$  และ  $V_{output}$  เป็นระยะเวลา 60 นาที และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และ  $V_{output}$  แทนลงในสมการที่ (6) เพื่อหาค่า  $T_a - T_b$  จากนั้นนำค่า  $T_a - T_b$  แทนในสมการที่ (5) เพื่อหาค่า  $Q$  และแทนค่า  $Q$  ที่หาได้ลงในสมการที่ (4) เพื่อหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ หลังจากนั้นเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากวิธีตามมาตรฐาน และหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะบ่งบอกถึงความถูกต้องของชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

นอกจากทดสอบความถูกต้องของชุดอุปกรณ์แล้ว ยังได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าการนำความร้อนของวัสดุตัวอย่างที่ไม่ทราบค่าการนำความร้อนอีก 3 ชนิด ได้แก่ โพลีเอทิลีน ยางสังเคราะห์เอทิลีนโพรพิลีนโมโนเมอร์ และกระดาษลูกฟูก ที่มีขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  และหนา  $10.0 \text{ mm}$   $10.0 \text{ mm}$  และ  $2.5 \text{ mm}$  ตามลำดับ

## ผลการทดลองและวิจารณ์

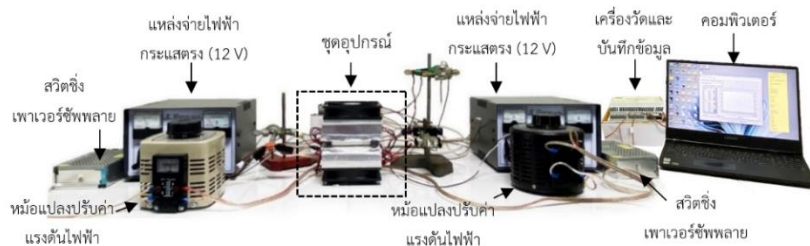
### 1. ผลการสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ

จากที่ได้ออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ ตามหลักการวัดแบบสภาวะคงตัว ที่นำเอาข้อดีของทั้งวิธี GHP และ HFM มารวมกัน และประยุกต์เอา TEM มาสร้างเป็นชุดทำความร้อน ชุดทำความเย็น และตัววัดฟลักซ์ความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 3 ไปแล้วนั้น ในตอนนี้จะอธิบายถึงชุดอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นจริงตามที่ได้ ออกแบบไว้



ภาพที่ 5 การติดตั้งชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็นเข้ากับแผ่นทองแดงและวัสดุทดสอบ

ภาพที่ 5 เป็นภาพถ่ายของชุดทำความร้อนและชุดทำความเย็น ที่แต่ละชุดประกอบด้วย TEM ขนาด  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$  จำนวน 4 โมดูล มาต่อกันแบบขนาน แล้วติดตั้งกับแผ่นระบายความร้อนและพัดลมระบายความร้อน ซึ่งชุดทำความร้อนและความเย็นจะประกบอยู่ด้านบนและด้านล่าง โดยมีแผ่นทองแดงทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อน ให้แก่ วัสดุทดสอบที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นทองแดงทั้ง 2 แผ่น ในรูปแบบแซนวิช จากภาพที่ 5 แผ่นทองแดงและวัสดุทดสอบถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกไปด้านข้าง และภาพที่ 6 แสดงภาพถ่าย การติดตั้งระบบต่าง ๆ เข้ากับชุดอุปกรณ์สำหรับวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยวัสดุที่จะ นำมาทดสอบเพื่อหาค่าการนำความร้อน ต้องตัดให้มีขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$



ภาพที่ 6 การติดตั้งระบบของชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อน เข้ากับระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุมและแสดงผล

## 2. ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM

การหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่นำมาใช้เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อนนั้น หาจากชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งดังแสดงในภาพที่ 6 โดยใช้แผ่นโคมพอลิस्टไร์นที่มีความหนาแน่น 1.0 LB/FT ขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  หนา 10.0 mm และมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.03510 W/m·K มาเป็นวัสดุทดสอบ โดยทำการบันทึกค่า  $T_{H1}$ ,  $T_{H2}$ ,  $T_{C1}$ ,  $T_{C2}$  และ  $V_{output}$  โดยใช้ data logger เป็นระยะเวลา 60 นาที ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่นำมาใช้เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อน

| ครั้งที่  | $T_H$<br>(°C) | $T_C$<br>(°C) | $T_H - T_C$<br>(K) | $Q$<br>(W)   | $V_{output}$<br>(V) | $T_a - T_b$<br>(K) | $\alpha$<br>(V/K)  |
|-----------|---------------|---------------|--------------------|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 1         | 32.50         | 14.27         | 18.23              | 0.1024       | 0.012               | 0.1621             | 0.0750             |
|           | $\pm 0.01$    | $\pm 0.01$    | $\pm 0.02$         | $\pm 0.0078$ | $\pm 0.001$         | $\pm 0.0185$       | $\pm 0.0185$       |
| 2         | 32.16         | 14.14         | 18.02              | 0.1012       | 0.012               | 0.1602             | 0.0760             |
|           | $\pm 0.01$    | $\pm 0.01$    | $\pm 0.02$         | $\pm 0.0077$ | $\pm 0.001$         | $\pm 0.0183$       | $\pm 0.0183$       |
| 3         | 33.05         | 13.54         | 19.51              | 0.1096       | 0.013               | 0.1735             | 0.0769             |
|           | $\pm 0.01$    | $\pm 0.01$    | $\pm 0.02$         | $\pm 0.0083$ | $\pm 0.001$         | $\pm 0.0198$       | $\pm 0.0198$       |
| ค่าเฉลี่ย |               |               |                    |              |                     |                    | $0.0760 \pm 0.001$ |

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0760 \pm 0.001 \text{ V/K}$  ซึ่งเมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM ที่นำมาใช้เป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อนแล้ว จึงจะสามารถใช้ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ไปหาค่าการนำความร้อนของวัสดุตัวอย่างได้

## 3. ผลการทดสอบความถูกต้องของชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ

หลังจากที่ได้สร้างชุดอุปกรณ์และทราบค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ TEM แล้ว ในตอนนี้จะแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น โดยหาค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ทราบค่ามาตรฐาน ได้แก่ แผ่นโคมพอลิस्टไร์น ที่มีความหนาแน่น 1.25 LB/FT ขนาด  $8.0 \times 8.0 \text{ cm}^2$  หนา 10.0 mm มีค่าการนำความร้อนมาตรฐานเท่ากับ 0.03467 W/m·K โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการนำความร้อนของโคมพอลิस्टไร์น ที่มีความหนาแน่น 1.25 LB/FT และหนา 10.0 mm

| $k$ ที่ได้จากการทดลอง |                      |                      |                      | $k$ มาตรฐาน<br>(W/m·K) | %error |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|--------|
| ครั้งที่ 1            | ครั้งที่ 2           | ครั้งที่ 3           | ค่าเฉลี่ย            |                        |        |
| $0.03524 \pm 0.0141$  | $0.03463 \pm 0.0141$ | $0.03505 \pm 0.0140$ | $0.03497 \pm 0.0002$ | 0.03467                | 0.87   |

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าการนำความร้อนของโพลีเอทิลีนที่ได้จากการทดลอง มีค่าเฉลี่ย  $0.03497 \pm 0.0002$  W/m·K และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากค่าที่หาจากวิธีการตามมาตรฐาน 0.87 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำชี้ให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์นี้มีความถูกต้องสูง ด้วยระบบที่ออกแบบบังคับให้ความร้อนไหลไปในทิศทางเดียว มีแหล่งกำเนิดความร้อนและความเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิสอดคล้องกับการวัดตามมาตรฐาน และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาค่าการนำความร้อนของวัสดุตัวอย่างที่ไม่ทราบค่าการนำความร้อนอีก 3 ชนิด ได้แก่ โพลีเอทิลีน ยางสังเคราะห์ เอทิลีนโพรพิลีนโมโนเมอร์ และกระดาษลูกฟูก ที่มีขนาด  $8.0 \times 8.0$  cm<sup>2</sup> และหนา 10.0 mm, 10.0 mm และ 2.5 mm ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ค่าการนำความร้อนของโพลีเอทิลีน ยางสังเคราะห์เอทิลีนโพรพิลีนโมโนเมอร์ และกระดาษลูกฟูก มีค่าเฉลี่ย 0.0305, 0.0385 และ 0.0687 W/m·K ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับวรรณกรรมอ้างอิง (Du et al., 2019; Umnyakova, 2020) กล่าวคือ วัสดุที่มีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนมาก จะถ่ายโอนความร้อนได้ไม่ดี ค่าการนำความร้อนจึงต่ำ จากการทดลองนี้จะเห็นว่า โพลีเอทิลีนมีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด มีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนมากที่สุด ซึ่งปัจจุบันโพลีเอทิลีนนิยมใช้เป็นวัสดุฉนวนความร้อนที่ใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น วัสดุบุหลังคา วัสดุที่มีความเป็นฉนวนรองลงมา คือ ยางสังเคราะห์เอทิลีนโพรพิลีนโมโนเมอร์ เป็นฉนวนกันความร้อนที่ใช้อย่างหลากหลายในงานอุตสาหกรรม และเป็นที่ยอมรับเช่นเดียวกับโพลีเอทิลีน ขณะที่วัสดุที่มีความเป็นฉนวนความร้อนน้อยที่สุด คือ กระดาษลูกฟูก ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนความร้อนสำหรับบรรจุภัณฑ์

## สรุป

งานวิจัยนี้ได้สร้างชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยอาศัยปรากฏการณ์ เทอร์โมอิเล็กทริก ออกแบบชุดทดลองภายใต้การวัดแบบสภาวะคงตัว สามารถนำเอาหลักการของวิธี GHP และ HFM มารวมเข้าด้วยกัน สำหรับใช้ในการทดสอบกับวัสดุเพียง 1 แผ่น มีการบังคับความร้อนถ่ายเทไปในทิศทางเดียว โดยการนำเอา TEM ที่หาได้ง่ายในท้องตลาดและมีราคาถูก มาประยุกต์ทำหน้าที่เป็นทั้งชุดทำความร้อน ชุดทำความเย็น และเป็นตัววัดฟลักซ์ความร้อนแทนเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนที่มีราคาสูงในท้องตลาด เมื่อทดสอบ หาค่าการนำความร้อนของโพลีเอทิลีนที่ทราบค่าการนำความร้อน จากวิธีการมาตรฐาน ASTM C518 (วิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐาน 0.87% ชี้ให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ มีความถูกต้องสูงโดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากหลาย ๆ งานวิจัยที่ผ่านมา (Tananchai, 2014 ; Ajiwiguna & Kim, 2016 ; Khaothong, 2019 ; Dubois, 2013) ดังนั้นจึงสามารถนำชุดอุปกรณ์นี้ไปใช้สำหรับหาค่าการนำความร้อนของวัสดุได้ อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่ใช้ในการวัดที่ค่อนข้างนานประมาณ 60 นาที ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการวัดให้น้อยลงได้ หากใช้ตัววัดฟลักซ์ความร้อนแบบสำเร็จรูป หรือทำให้อุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้นโดยการลดขนาดของชุดอุปกรณ์ ซึ่งนอกจากจะลดระยะเวลาในการวัดลงแล้ว ยังส่งผลให้ขนาดของแผ่นวัสดุที่ต้องการนำมาทดสอบมีขนาดเล็กลง

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณวัชชัย นิมพญา และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ยืมเครื่องสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- ASTM C117. (2002). ASTM C177-97 Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. **Annual Book of ASTM Standards**, 4(6), 21-32.
- ASTM C518. (1998). ASTM C518 Standard test method for steady-state heat flux measurement and thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. **Annual Book of ASTM Standards**, 4(6), 163-174.
- Ajiwiguna, T. A. & Kim S. Y. (2016). Thermal conductivity measurement using thermoelectric module. **Journal of Physics: Conference Series**, 8(776), 1-4.
- Chinnaboon, P. (2012). **University physics 1**. Bangkok: Witthayaphat. 240-243. (In Thai)
- Du, B. X., Kong, X. X., Li, J., & Xiao, M. (2019). High thermal conductivity insulation and sheathing materials for electric vehicle cable application. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 26(4), 1363–1370.
- Dubois, S. (2013). Design construction and validation of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurement of high thickness crop-based specimens. **Materials and Structures**, 48, 407-421.
- Feofanov, S. A. & Chashchin, S. L. (2021). Thermoelectric modular systems based on semiconductor elements of Peltier-Seebeck for vehicles. **Journal of Physics: Conference Series**, 2061, 012015.
- Harun, M. H., Azmi, M. W. N., Aras, M. S. M., Azlan, U. A., Azahar, A. H., Annuar, K. A. M., Halim, M. F. M. A., Yaakub, M.F. & Abidin, A.F.Z. (2018). Study on the potential of peltier in generating electricity using heat loss at engine and exhaust vehicle. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, 49(1), 77-84.
- Khaothong, K. (2019). Experimental setup for measuring thermal conductivity of architecture fabrics. **The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Prarong**, 31(1), 145-154. (In Thai)
- Kraemer, D., & Chen, G. (2014). A simple differential steady-state method to measure the thermal conductivity of solid bulk materials with high accuracy. **Review of Scientific Instruments**, 85(2), 025108.
- RDI-SNRU. (2019). **Thermoelectric technology**. Retrieved from <http://rdi.snru.ac.th/wpcontent/uploads/2015/08/%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B9%88%E0%B8%99%E0%B8%9E%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B9%82%E0%B8%A1-%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B9%89%E0%B9%84%E0%B8%82.pdf> [2023, 6 Apr.]

- Reddy, K. S. & Jayachandran, S. (2016). Investigations on design and construction of a square guarded hot plate (SGHP) apparatus for thermal conductivity measurement of insulation materials. **International Journal of Thermal Sciences**, **120**, 136-147.
- Rincon-Tabares, J. S., Velasquez-Gonzalez J. C., Ramirez-Tamayo, D., Montoya, A., Millwater, H. & Restrepo, D. (2022). Sensitivity analysis for transient thermal problems using the complex-variable finite element method. **Applied Sciences**, **12**(5), 1-23.
- Sánchez-Calderón, I., Merillas, B., & Bernardo, V. (2022). Methodology for measuring the thermal conductivity of insulating samples with small dimensions by heat flow meter technique. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, **147**, 12523–12533.
- Seetawan, T. (2015). **Thermoelectric technology**. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House. (In Thai)
- Tananchai, T. (2014). **Design and construction of an experimental set to determine the coefficient of thermal conductivity of materials**. (Master of Science). Burapha University. (In Thai)
- Thongchainumchok, K., Phutthaheng, W., Kirdsiri, K., & Srisittipokakun, N. (2022). **Development of thermal insulator from sugarcane leaves**. In W. Pinkeaw (Ed.), The 14<sup>th</sup> NPRU National Academic Conference. Nakhon Pathom: Research and Development Institute. 313-317.
- Umnyakova, N. (2020). **Thermal protective qualities of the combined material with reflective thermal insulation from aluminium foil**. In N. Vatin (Ed.), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 896, 012018.
- Yüksel, N. (2016). **The review of some commonly used methods and techniques to measure the thermal conductivity of insulation materials**. In A. Almusaed (Ed.), Insulation Materials in Context of Sustainability. 113-140.
- Zhang, J., Kutlu, S., Liu, G., & Tansu, N. (2011). High-temperature characteristics of Seebeck coefficients for AlInN alloys grown by metalorganic vapor epitaxy. **Journal of Applied Physics**, **110**(4), 043710.