



การพัฒนาและทดสอบกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ศาสตราจารย์

พจน ปณฺฑิต สีวะ

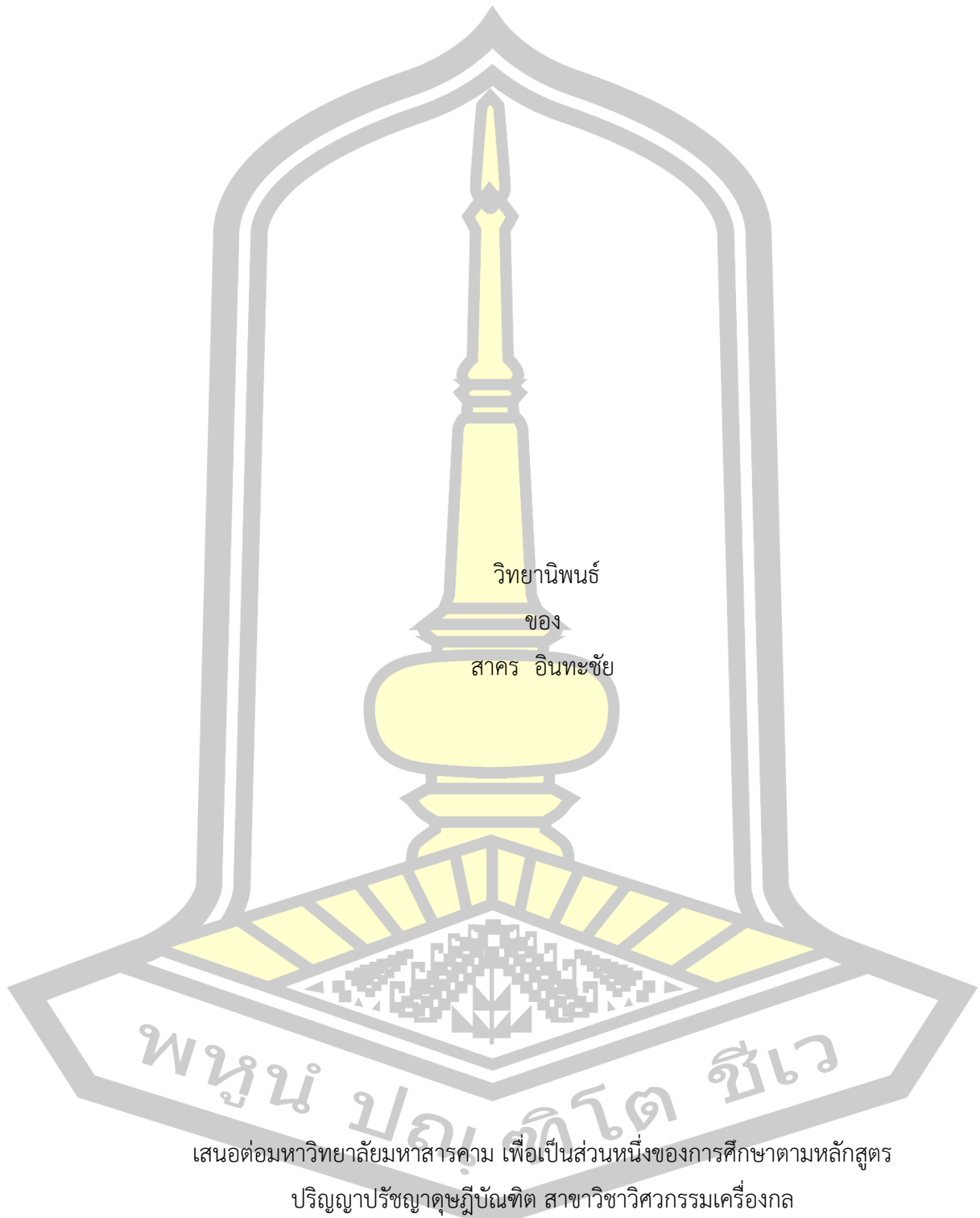
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาและทดสอบกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก



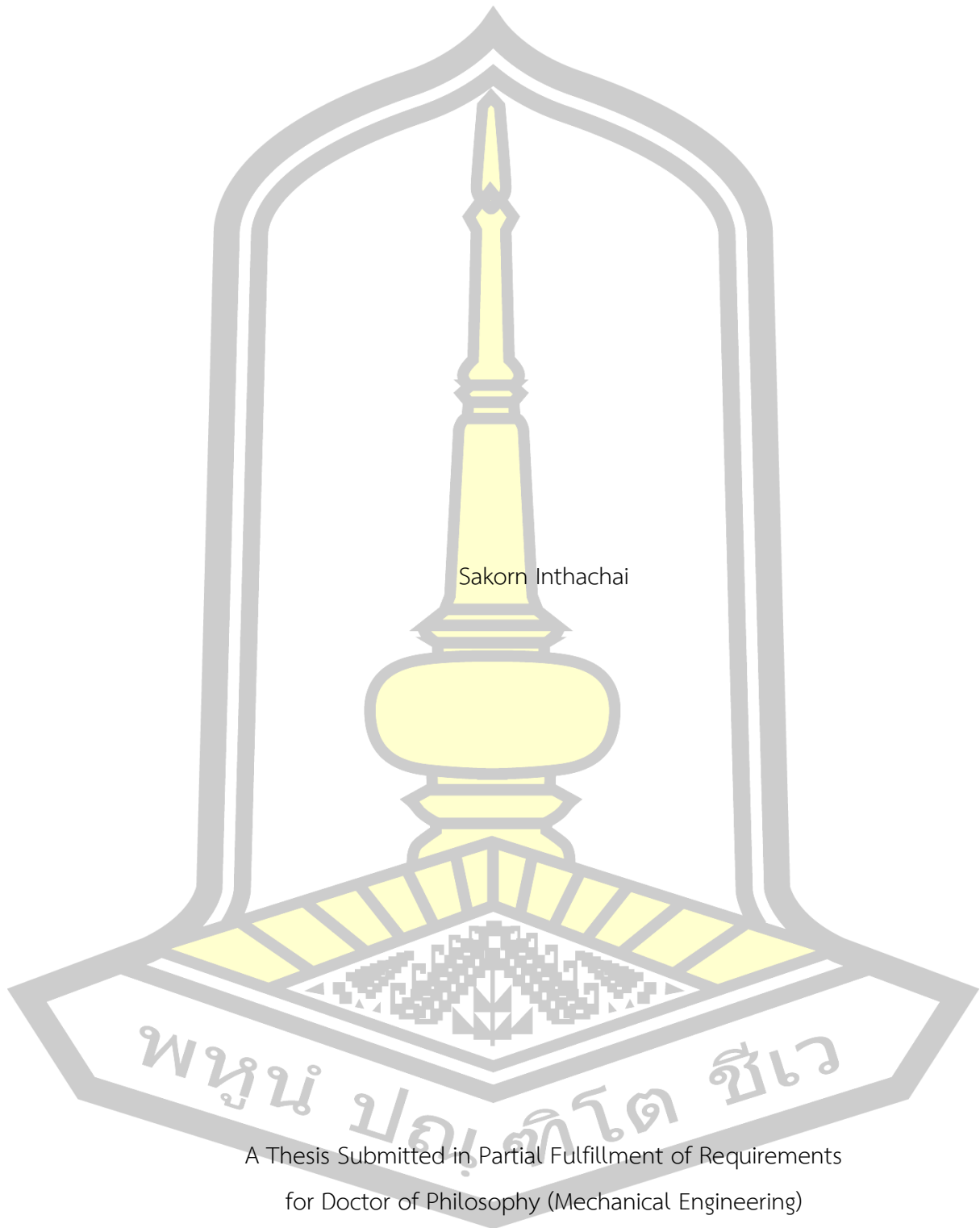
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development and Test of Thermoelectric Roof Tiles



Sakorn Inthachai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

August 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสาคร อินทะชัย แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

( ผศ. ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผศ. ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รศ. ดร. ทศวรรษ สีตะวัน )

กรรมการ

( ผศ. ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด )

กรรมการ

( ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ )

กรรมการ

( ผศ. ดร. จักรมาส เลหาวิช )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

( รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

( ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาและทดสอบกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก		
ผู้วิจัย	สาคร อินทะชัย		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ทศวรรษ สีตะวัน		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

### บทคัดย่อ

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งการทำความเย็น การทำความร้อน และการผลิตพลังงานไฟฟ้า งานวิจัยนี้เป็น การพัฒนาและทดสอบกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ขนาดกว้าง  $33 \times 42 \text{ cm}^2$  เพื่อผลิตพลังงาน ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเข้ากับแผ่นกระเบื้องหลังคา ใช้ผลต่าง อุณหภูมิจากแหล่งความร้อนจากดวงอาทิตย์ (ด้านร้อน) ระบายความร้อนด้วยแผ่นอลูมิเนียมบางและ อากาศ(ด้านเย็น) โดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 4 ส่วนคือ 1) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุเทอร์ โมอิเล็กทริก 2) การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคา เทอร์โมอิเล็กทริก 3) การทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก และ 4) การ ทดลองประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก มีรายละเอียดดังนี้ ได้วิเคราะห์โครงสร้าง ผลึกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  และชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  ด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเป็นเฟสเดี่ยวไม่พบเฟสเจือปนสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิง ได้จำลองทาง คณิตศาสตร์เพื่อทำนายการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ในโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 18.0 พบว่า ที่ผลต่างของอุณหภูมิ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  การจำลองทาง คณิตศาสตร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1172.87 มิลลิโวลต์ ได้ประดิษฐ์และทดสอบสมรรถนะของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลรูปแบบ A, B และ C เพื่อ ประกอบเข้ากับกระเบื้องหลังคา พบว่า ที่ผลต่างอุณหภูมิเดียวกันประมาณ 100 องศาเซลเซียส เทอร์ โมอิเล็กทริกโมดูลรูปแบบ A, B และ C ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้าสอดคล้องกับการจำลอง เช่น เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลรูปแบบ C ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงสุดเท่ากับ 1172.87 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้า 186.97 มิลลิแอมป์ และกำลังไฟฟ้า 35.16 มิลลิวัตต์ เมื่อต่อเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบผสมอนุกรมภายในแถวและขนานระหว่างแถวเข้ากับกระเบื้อง หลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดได้ 33.70 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้า 4.89 ไมโครแอมป์ และกำลังไฟฟ้า 26.38 พิโกวัตต์ และได้ทดลองหาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของ

กระเบื้องหลังคา เทอร์โมอิเล็กทริก ที่ประดิษฐ์ขึ้นกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ซื้อมาพบว่า วันที่ 10 มิถุนายน 2562 เวลา 11.30 น. ที่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ เฉลี่ย 6.7 องศาเซลเซียส กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 6.7 มิลลิโวลต์ และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลซื้อ มา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 39.4 มิลลิโวลต์ ที่ความเร็วของอากาศแวดล้อม 0.7 เมตรต่อวินาที และมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 1068.7 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าทางเลือกในอนาคต

คำสำคัญ : กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก, เทอร์โมอิเล็กทริก



<b>TITLE</b>	Development and Test of Thermoelectric Roof Tiles		
<b>AUTHOR</b>	Sakorn Inthachai		
<b>ADVISORS</b>	Assistant Professor Jindaporn Jamradloedluk , Ph.D. Associate Professor Tosawat Seetawan , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Doctor of Philosophy	<b>MAJOR</b>	Mechanical Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2019

### ABSTRACT

Thermoelectric devices can be applied with solar energy systems for different applications including cooling, heating and power generation. In this research thermoelectric roof tiles ( $33 \text{ cm} \times 42 \text{ cm}^2$ ) were developed by affixing them with thermoelectric generators, and were then tested for their electricity generation. Heat source from the sun (hot side) cooling with thin aluminum sheets and air (cold side) produced temperature differences for this purpose. The study was divided into four stages: 1) Analyzing the crystal structure of thermoelectric materials; 2) Mathematical modelling to predict electricity amount generated by thermoelectric roof tiles; 3) Capacity testing of thermoelectric roof tiles; and 4) Efficiency testing of thermoelectric roof tiles. In Stage 1, p-type  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  and n-type  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  were analyzed with an x-ray diffraction technique. Single phase was found without any mixed phases, which is in compliance with the referenced data. In Stage 2, the mathematical modelling to predict the electricity amount generated by the thermoelectric roof tiles using finite element in ANSYS 18.0 software showed that thermoelectric module model C produced the maximum electric potential difference of 1172.87 mV at the temperature difference of  $100^\circ\text{C}$ . In Stage 3, the thermoelectric module models A, B and C were invented and tested for their capacity. All the models produced an electric potential, electric current, and electric power corresponding with simulations. For example, thermoelectric module model C produced the electric potential difference of 1172.87 mV, the electric current of 186.97 mA, and the electric power of 35.16 mW. The roof tiles affixed with these

thermoelectric module models by mixing the series within as well as parallel between the rows generated the maximum electric potential difference of 33.70 mV, electric current of 4.89  $\mu\text{A}$ , and electric power of 26.38  $\mu\text{W}$ . In the last stage, an efficiency test of thermoelectric roof tiles was conducted. The comparisons between the invented thermoelectric modules and the commercial ones revealed that on 10 June 2019 at 11.30 am at the average temperature difference of 6.7  $^{\circ}\text{C}$ , the roof tiles affixed with thermoelectric module model B generated the maximum voltage of 6.7 mV while the roof tiles affixed with the commercial thermoelectric modules produced the maximum voltage of 39.4 mV at the air velocity of 0.7  $\text{m s}^{-1}$  and the sunray intensity of 1068.7  $\text{W m}^{-2}$ . Thermoelectric roof tiles are thus a source of alternative energy for the future.

Keyword : Thermoelectric Roof Tiles, Thermoelectric





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาดูแลให้คำปรึกษา ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้คำแนะนำช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ทศวรรษ สีตะวัน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรมาศ เลหาทนิช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญพร เลิศสถิตธนกร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานทางเลือก (ศลพ.) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยให้ลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ license โปรแกรม ANSYS และศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่กรุณาช่วยแนะนำ สอนโปรแกรม ANSYS อีกทั้งให้ที่พักอาศัยในการใช้โปรแกรม ANSYS

ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัยให้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือการทำวิจัยให้ลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณนักศึกษาปริญญาเอก นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาตรี ศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานทางเลือก (ศลพ.) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัย

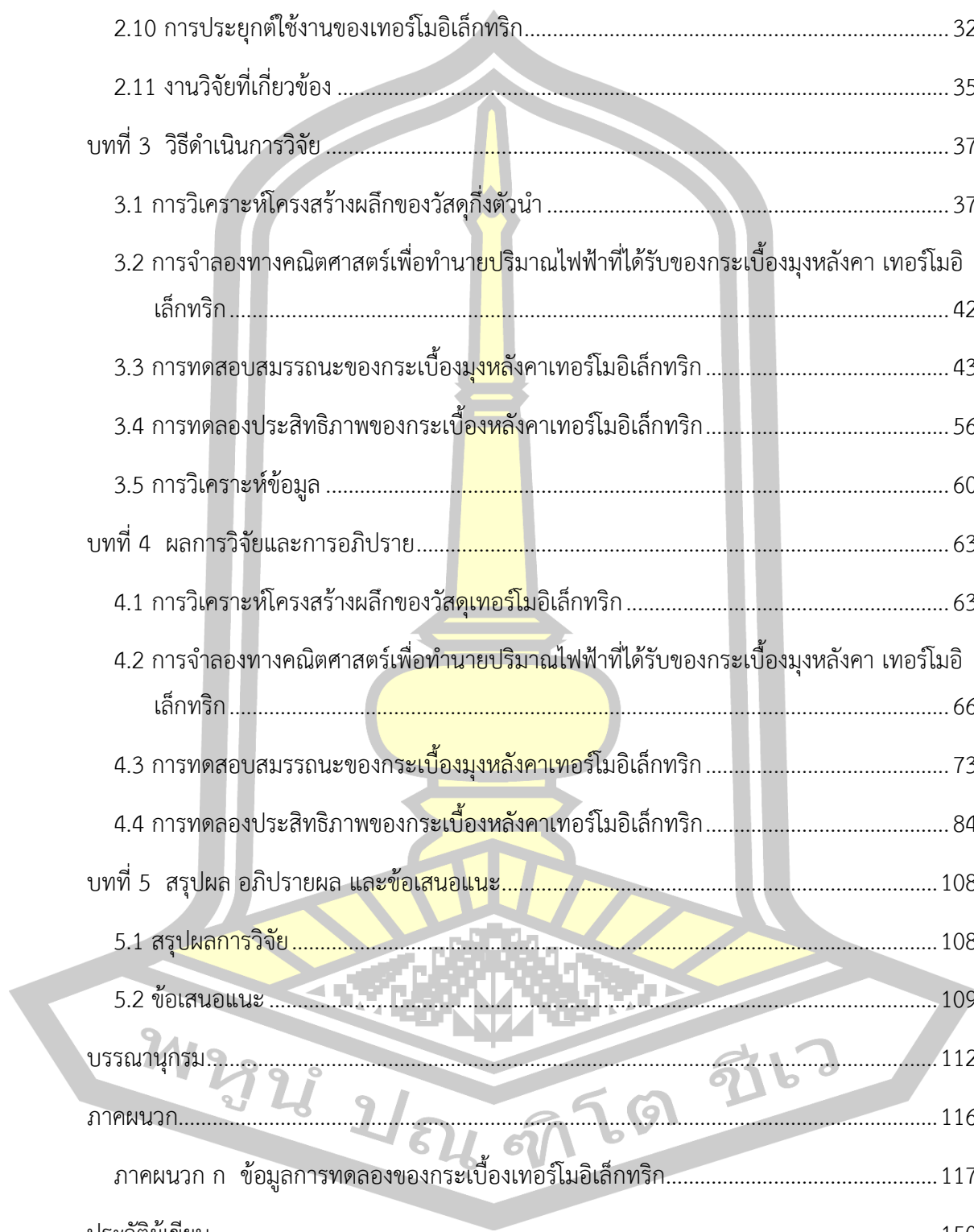
คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบุพการี  
คุณพ่อสุวิทย์-คุณแม่ลำคอง อินทะชัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณพี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในทุกๆ เรื่องตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 ความสำคัญของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 กระเบื้องหลังคา.....	5
2.2 เทอร์โมอิเล็กทริก.....	8
2.3 ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	9
2.4 คุณสมบัติวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี.....	12
2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกเชิงพาณิชย์.....	12
2.6 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	18
2.7 การระบายความร้อนสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	20
2.8 ประสิทธิภาพเทอร์โมอิเล็กทริก.....	29

2.9 การใช้พลังงานความร้อนทิ้งสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก.....	30
2.10 การประยุกต์ใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	32
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุกึ่งตัวนำ.....	37
3.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคา เทอร์โมอิเล็กทริก.....	42
3.3 การทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	43
3.4 การทดลองประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	56
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	60
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	63
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	63
4.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคา เทอร์โมอิเล็กทริก.....	66
4.3 การทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	73
4.4 การทดลองประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	84
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	109
บรรณานุกรม.....	112
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองของกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	150



## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1 ตัวแปรพื้นฐานในการทำนายของระบบเทอร์โมอิเล็กทริก .....	62
ตาราง 4.1 ค่าการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดย Seebeck Coefficient/ Electrical Resistance Measurement System, ZEM-3 series .....	65
ตาราง ก.1 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 21 มีนาคม 2562 .....	118
ตาราง ก.2 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 22 มีนาคม 2562 .....	119
ตาราง ก.3 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 23 มีนาคม 2562 .....	120
ตาราง ก.4 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นวันที่ 25 มีนาคม 2562 .....	121
ตาราง ก.5 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 26 มีนาคม 2562 .....	122
ตาราง ก.6 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 27 มีนาคม 2562 .....	123
ตาราง ก.7 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 3 เมษายน 2562 .....	124

ตาราง ก.8 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 10  
มิถุนายน 2562..... 125

ตาราง ก.9 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น วันที่ 11  
มิถุนายน 2562..... 126

ตาราง ก.10 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทาน  
ที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 6 เมษายน 2562 ..... 127

ตาราง ก.11 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทาน  
ที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 7 เมษายน 2562 ..... 128

ตาราง ก.12 ค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิ  
ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A..... 129

ตาราง ก.13 ค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิ  
ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B..... 137

ตาราง ก.14 ค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิ  
ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C..... 143



## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ [29].....	6
ภาพประกอบ 2.2 อาคารที่มุงกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ [29].....	6
ภาพประกอบ 2.3 กระเบื้องหลังคาคอนกรีต [30].....	7
ภาพประกอบ 2.4 (ก) โมดูลของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (ข) แสดงโครงสร้างขององค์ประกอบของ p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริก (ค) แสดงโครงสร้างโมดูลของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกหลาย p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	9
ภาพประกอบ 2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกแบบชั้นเดียว [4].....	9
ภาพประกอบ 2.6 เทอร์โมอิเล็กทริกแบบหลายชั้น [5].....	10
ภาพประกอบ 2.7 วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ผลิตเทอร์โมอิเล็กทริก [7].....	11
ภาพประกอบ 2.8 ข้อมูลเชิงเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิด้านร้อน 160 °C และอุณหภูมิด้านเย็น 50 °C [10].....	12
ภาพประกอบ 2.9 ข้อมูลเชิงเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิด้านร้อน 300 °C และอุณหภูมิด้านเย็น 50 °C [10].....	13
ภาพประกอบ 2.10 รูปแบบการต่อขั้วไฟฟ้าและวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (a) แบบดั้งเดิมทั่วไป (b) แบบที่ใช้เฉพาะสารชนิดใดชนิดหนึ่งในการต่อ.....	13
ภาพประกอบ 2.11 การประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลเข้ากับเตาให้ความร้อนภายในบ้าน และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ.....	14
ภาพประกอบ 2.12 แหล่งความร้อนขนาดใหญ่จากเรือขนส่งสินค้า (M/V Rosita managed by Uglund Marine Services AS) เครื่องยนต์ 8.7 MW.....	15
ภาพประกอบ 2.13 เทอร์โมอิเล็กทริกประยุกต์กับเตา.....	15
ภาพประกอบ 2.14 ผลการเก็บข้อมูล (a) อุณหภูมิ (b) กำลังไฟฟ้า.....	16
ภาพประกอบ 2.15 แบบจำลองผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก [20].....	16

ภาพประกอบ 2.16 ออกแบบอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกและระบายความร้อนด้วย ลำ ธาร [20].....	17
ภาพประกอบ 2.17 แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก ต่าง ๆ [20].....	17
ภาพประกอบ 2.18 แสดงคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดของแผ่นระบายความร้อน [23].....	20
ภาพประกอบ 2.19 ลักษณะในการระบายความร้อน [23].....	21
ภาพประกอบ 2.20 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 1 [23].....	21
ภาพประกอบ 2.21 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 2 [23].....	22
ภาพประกอบ 2.22 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 3 [23].....	22
ภาพประกอบ 2.23 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 4 [23].....	23
ภาพประกอบ 2.24 ค่าความต้านทานความร้อนที่จำนวนครีบริบแตกต่างกันของแผ่นระบาย ความร้อนที่ ทำจากแกรไฟต์ [23] .....	23
ภาพประกอบ 2.25 ค่าความต้านทานความร้อนที่จำนวนครีบริบแตกต่างกันของแผ่นระบาย ความร้อนที่ ทำจากอะลูมิเนียม [23].....	24
ภาพประกอบ 2.26 ค่าความต้านทานความร้อนที่จำนวนครีบริบแตกต่างกันของแผ่นระบาย ความร้อนที่ ทำจากทองแดง [23] .....	24
ภาพประกอบ 2.27 อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของวัสดุที่แผ่นระบายความร้อนที่แตกต่างกัน [23].....	25
ภาพประกอบ 2.28 แบบจำลองในการศึกษาผลกระทบจากความสูงและหนาของครีบริบาย ความ ร้อน [24].....	25
ภาพประกอบ 2.29 การแสดงวัสดุของแผ่นระบายความร้อนในการศึกษาผลกระทบจากความสูง และ หนาของครีบริบายความร้อน [24].....	26
ภาพประกอบ 2.30 อุณหภูมิครีบริบายความร้อนที่ความหนาแตกต่างกัน (ก) อุณหภูมิต่ำสุด (ข) อุณหภูมิสูงสุด [24].....	26
ภาพประกอบ 2.31 อุณหภูมิครีบริบายความร้อนที่ความสูงแตกต่างกัน (ก) อุณหภูมิต่ำสุด (ข) อุณหภูมิสูงสุด [24].....	27
ภาพประกอบ 2.32 คำนวณความร้อนของวัสดุต่างชนิดที่ใช้ทำแผ่นระบายความร้อน [25].....	27

ภาพประกอบ 2.33 แสดงจำนวนครีบ ความกว้างและพื้นผิวของแผ่นระบายความร้อน [25].....	28
ภาพประกอบ 2.34 แผ่นระบายความร้อนจำนวน 4, 6, 8,10 และ 12 ครีบ [25] .....	28
ภาพประกอบ 2.35 แสดงอุณหภูมิรอยต่อความต้านทานความร้อนของแผ่นระบายความร้อน ที่ จำนวนครีบต่างกัน [25] .....	28
ภาพประกอบ 2.36 แหล่งความร้อนทั้งต่าง ๆ ที่สามารถนำเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ได้ [15]	30
ภาพประกอบ 2.37 แหล่งความร้อนทั้งอุณหภูมิสูง [15].....	31
ภาพประกอบ 2.38 แหล่งความร้อนทั้งอุณหภูมิปานกลาง [15].....	31
ภาพประกอบ 2.39 แหล่งความร้อนทั้งอุณหภูมิต่ำ [15].....	31
ภาพประกอบ 2.40 การออกแบบโมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริกในรูปแบบต่าง ๆ กัน .....	32
ภาพประกอบ 2.41 (ก) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสร้างไฟฟ้าจากความร้อนท่อไอเสียรถยนต์ (ข) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสร้างไฟฟ้าจากท่อน้ำร้อนและท่อน้ำเย็นเหลือทิ้ง .....	33
ภาพประกอบ 2.42 แสดงการประยุกต์ใช้งานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก .....	34
ภาพประกอบ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน ทำการวัดที่ ศูนย์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.....	38
ภาพประกอบ 3.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทำการวัดที่ศูนย์ ความเป็นเลิศด้านพลังงานทางเลือก (ศลพ.) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร. 38	
ภาพประกอบ 3.3 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกและสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ศูนย์ ความเป็นเลิศด้านพลังงานทางเลือก(ศลพ.) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร.. 39	
ภาพประกอบ 3.4 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ .....	39
ภาพประกอบ 3.5 สายเทอร์โมคัปเปิล.....	40
ภาพประกอบ 3.6 เครื่องวัดทางไฟฟ้าแบบคล่องสาย .....	40
ภาพประกอบ 3.7 เครื่องวัดทางไฟฟ้าแบบดิจิตอล .....	41
ภาพประกอบ 3.8 เครื่องวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องบันทึกข้อมูล .....	41
ภาพประกอบ 3.9 ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแต่ละแบบ .....	43
ภาพประกอบ 3.10 แม่พิมพ์ของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแต่ละแบบ .....	44



ภาพประกอบ 3.11 ดินขาวที่ผ่านการเผาไล่สิ่งเจือปน .....	45
ภาพประกอบ 3.12 ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก .....	45
ภาพประกอบ 3.13 แผ่นดินขาว VCB ที่ได้จากการขึ้นรูปไปเผาผนึก อุณหภูมิ 950 °C เป็น เวลา 5 ชั่วโมง.....	46
ภาพประกอบ 3.14 การผลิตแผ่นเซรามิกฐานรองเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ A ขนาด 50 x 50 mm <sup>2</sup> .....	46
ภาพประกอบ 3.15 การผลิตแผ่นเซรามิกฐานรองเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ C ขนาด 30 x 30 mm <sup>2</sup> .....	47
ภาพประกอบ 3.16 การผลิตแผ่นเซรามิกฐานรองเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ B ขนาด 30 x 30 mm <sup>2</sup> แบบเรียบ .....	47
ภาพประกอบ 3.17 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี คือ p-type-Sb <sub>0.405</sub> Te <sub>0.595</sub> .....	48
ภาพประกอบ 3.18 เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น คือ n-type Bi <sub>0.58</sub> Te <sub>1.42</sub> .....	48
ภาพประกอบ 3.19 วัสดุฐานรองพร้อมขั้วไฟฟ้าเงิน.....	49
ภาพประกอบ 3.20 แผนผังการประดิษฐ์วัสดุฐานรองพร้อมขั้วไฟฟ้าเงิน.....	50
ภาพประกอบ 3.21 แบบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก .....	52
ภาพประกอบ 3.22 ส่วนประกอบของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก .....	53
ภาพประกอบ 3.23 การเตรียมประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก .....	54
ภาพประกอบ 3.24 การประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	55
ภาพประกอบ 3.25 กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	56
ภาพประกอบ 3.26 การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล .....	56
ภาพประกอบ 3.27 การทดสอบประสิทธิภาพของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก .....	57
ภาพประกอบ 3.28 ส่วนประกอบในการทดลองภาคสนามของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก .....	57
ภาพประกอบ 3.29 ด้านหน้าการทดลองภาคสนามของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก .....	58
ภาพประกอบ 3.30 ด้านหลังการทดลองภาคสนามของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก .....	58

ภาพประกอบ 3.31 การติดอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิผิวของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกด้านบน	59
.....	
ภาพประกอบ 3.32 การติดอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิผิวของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกด้านล่าง	59
.....	
ภาพประกอบ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุ $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$ โดยเทียบกับ PDF อ้างอิงหมายเลข 00-022-0117.....	64
ภาพประกอบ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุ $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$ โดยเทียบกับ PDF อ้างอิงหมายเลข 00-045-1228.....	64
ภาพประกอบ 4.3 แบบสามมิติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A.....	66
ภาพประกอบ 4.4 แบบสามมิติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B.....	67
ภาพประกอบ 4.5 แบบสามมิติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C.....	67
ภาพประกอบ 4.6 การกระจายของอุณหภูมิพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A.....	67
ภาพประกอบ 4.7 การกระจายของอุณหภูมิพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B.....	68
ภาพประกอบ 4.8 การกระจายของอุณหภูมิพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C.....	68
ภาพประกอบ 4.9 การไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A.....	70
ภาพประกอบ 4.10 การไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B.....	70
ภาพประกอบ 4.11 การไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C.....	70
ภาพประกอบ 4.12 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A.....	71
ภาพประกอบ 4.13 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B.....	71

ภาพประกอบ 4.14 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C..... 71

ภาพประกอบ 4.15 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A..... 72

ภาพประกอบ 4.16 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B..... 72

ภาพประกอบ 4.17 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C..... 72

ภาพประกอบ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A..... 74

ภาพประกอบ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B..... 75

ภาพประกอบ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C..... 76

ภาพประกอบ 4.21 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของแต่ละเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ..... 77

ภาพประกอบ 4.22 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แต่ละแบบ ..... 77

ภาพประกอบ 4.23 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 100 °C ของแต่ละเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ..... 78

ภาพประกอบ 4.24 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 100 °C ของแต่ละเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ..... 79

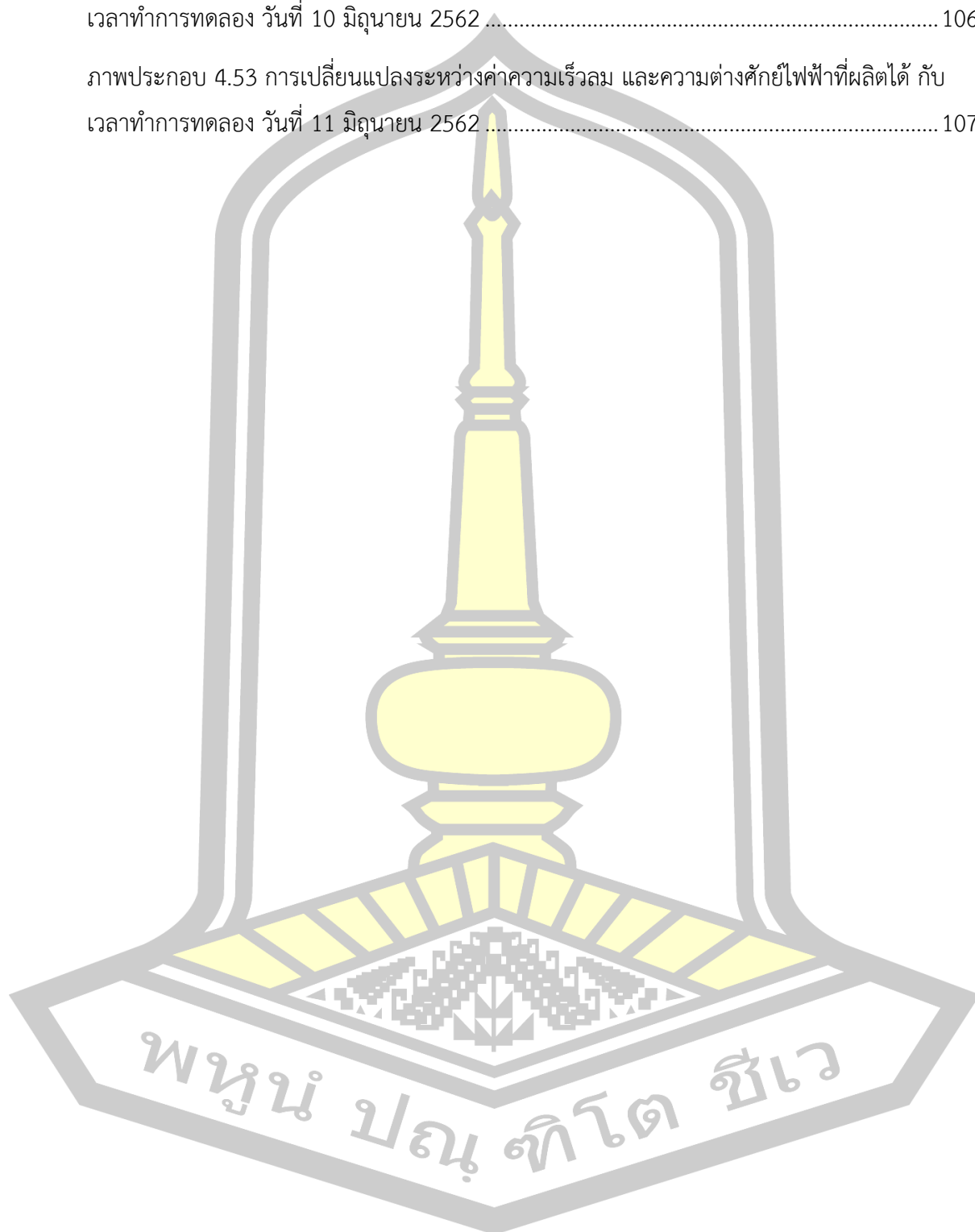
ภาพประกอบ 4.25 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับผลต่างอุณหภูมิของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ..... 80

ภาพประกอบ 4.26 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 5 °C ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก..... 81

ภาพประกอบ 4.27 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้า แบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 5 °C ตัวของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	82
ภาพประกอบ 4.28 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้า แบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 5 °C ตัวของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก.....	83
ภาพประกอบ 4.29 การทดสอบประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการประกอบ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) .....	84
ภาพประกอบ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ ทดลองวันที่ 21 มีนาคม 2562 .....	85
ภาพประกอบ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 21 มีนาคม 2562.....	85
ภาพประกอบ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ ทดลองวันที่ 22 มีนาคม 2562 .....	87
ภาพประกอบ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 22 มีนาคม 2562.....	87
ภาพประกอบ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ ทดลองวันที่ 23 มีนาคม 2562 .....	89
ภาพประกอบ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 23 มีนาคม 2562.....	89
ภาพประกอบ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ ทดลองวันที่ 25 มีนาคม 2562 .....	91
ภาพประกอบ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 25 มีนาคม 2562.....	91
ภาพประกอบ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ ทดลองวันที่ 26 มีนาคม 2562 .....	93



ภาพประกอบ 4.52 การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเร็วลม และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ กับ เวลาทำการทดลอง วันที่ 10 มิถุนายน 2562 .....	106
ภาพประกอบ 4.53 การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเร็วลม และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ กับ เวลาทำการทดลอง วันที่ 11 มิถุนายน 2562 .....	107



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ภูมิหลัง

สถานการณ์พลังงานของประเทศไทยในช่วงห้าเดือนแรกปี 2559 มีการใช้พลังงานปริมาณ 26,781 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อนร้อยละ 1.4 คิดเป็นมูลค่ากว่า 227,757 ล้านบาท การใช้พลังงานยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตทางเศรษฐกิจโดยพลังงานที่ใช้มากที่สุดสองอันดับคือ น้ำมันสำเร็จรูป และพลังงานไฟฟ้าที่ร้อยละ 50.2 และ 19.1 ตามลำดับ [1] การฟื้นตัวของเศรษฐกิจทำให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นและมีความจำเป็นต้องนำเข้าพลังงานคิดเป็นมูลค่ากว่า 205,533 ล้านบาท ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของประเทศ รัฐบาลและกระทรวงพลังงานจึงมีนโยบาย ส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดปริมาณการนำเข้าพลังงาน และตามแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554-2573) และแผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2558-2579 โดยแนวทางสำคัญคือ การส่งเสริมการผลิตและการใช้พลังงานทดแทน การรณรงค์สร้างจิตสำนึกและประชาสัมพันธ์ให้ความรู้ และการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาตามพลังงาน ซึ่งในด้านนี้มีเป้าหมายคือสามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดให้เกิดผลอย่างเป็นรูปธรรม [2]

นอกจากพลังงานที่ได้จากน้ำมันเชื้อเพลิงและไฟฟ้าแล้ว พลังงานความร้อนเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานที่น่าสนใจที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตไฟฟ้าทั้งนี้พบว่า พลังงานความร้อนของประเทศไทยจากรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั่วประเทศจากทุกพื้นที่เป็นค่ารายวันเท่ากับ  $5.05 \text{ kW h m}^{-2}$  [3, 4] ซึ่งพลังงานความร้อนยังวนเวียนในชั้นบรรยากาศ บนพื้นผิวโลก และได้พิภพ ผ่านกระบวนการต่าง ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานที่มหาศาลที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ [5, 6]

นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง คือ เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (Thermoelectrics) [8]-[12] ข้อดี คือ กระบวนการเปลี่ยนพลังงานที่ไม่ซับซ้อนสามารถเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ตามจำนวนของเทอร์โมอิเล็กทริก การบำรุงรักษาต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีทั้งในส่วนการนำความร้อนทั้งเช่น จากท่อไอเสียรถยนต์ แก๊สร้อน (Flue gas) จากเตาเผา มาเป็นแหล่งความร้อน นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าให้กับนาฬิกาโดยอาศัยความร้อนจากผิวหนัง [5] สำหรับการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเป็นทางเลือกทดแทนการผลิตความร้อนจากเซลล์

แสงอาทิตย์นั้น ถือเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้อยู่บ้าง ตัวอย่างเช่น การพัฒนาหลังคาโลหะประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า [24] การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบกับอุปกรณ์รวบรวมแสงอาทิตย์ติดตั้งใต้หลังคาคอนกรีตเพื่อผลิตไฟฟ้าและนำไปใช้กับพัดลมเพื่อช่วยระบายความร้อนลดอุณหภูมิใต้หลังคา [25] เครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อใช้งานกับเปลือกอาคารและระบบผนังสองชั้นระบายอากาศ การทำความเย็นของแผ่นฝ้าเย็นที่ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นตัวทำความเย็น [26] และการรวมรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ผ่านอุปกรณ์ชุดทดลองที่มีเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบซึ่งมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าใช้เพื่อการระบายความร้อนใต้หลังคา [27] นอกจากนี้ยังมีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

การเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านหลังคาสู่ภายในอาคารให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกถือเป็นหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าสนใจ เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกไม่มีการเผาผลาญเชื้อเพลิง ไม่ทำให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายจากการเผาไหม้ ไร้เสียงเพราะไม่มีวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องเคลื่อนไหว และตัวอุปกรณ์เองมีอายุการใช้งานยาวนานและสามารถถอดประกอบได้รวมไปถึงการบำรุงรักษาที่ไม่ยุ่งยาก เนื่องจากไม่มีการใช้ของเหลว ไม่ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบ เหมือนกับการผลิตพลังงานลักษณะอื่น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนากระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับเป็นแนวทางในการนำไปออกแบบอาคารและระบบประกอบอาคารเพื่อให้ได้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนต่อไป

## 1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาและทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก
- 1.2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

## 1.3 ความสำคัญของการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อนำกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกมาแทนกระเบื้องหลังคาบ้านแบบเดิมโดยสามารถลดความร้อนใต้หลังคาและให้พลังงานไฟฟ้าได้
- 1.3.2 เป็นการนำเสนอกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างออกไปจากที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบันและสามารถจะพัฒนาไปสู่ระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือในงานจริงได้ในอนาคต



## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 กระจกเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกมีขนาด กว้าง 33 cm x ยาว 42 cm กระจกเบื้องคอนกรีตแบบลอนคู่

1.4.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระจกเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

1.4.3 เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตจากวัสดุกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น คือ  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  ชนิดพี คือ  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$

1.4.4 กระจกเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกด้านบนผลิตจากวัสดุ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )

1.4.5 กระจกเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกด้านล่างผลิตจากวัสดุ Aluminum Plate

1.4.6 ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกระจกเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในระดับห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

1.4.7 นำกระจกเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกประยุกต์ใช้กับการผลิตไฟฟ้าเมื่อต่อเข้ากับระบบแสงสว่าง

1.4.8 ศึกษามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเรื่องกระจกเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใกล้เคียงกัน ดังนี้ มอก. 535-2537

1.4.8.1 ความกว้างยาวของกระจกเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา ต้องไม่ต่างจากขนาดที่ผู้ทำกำหนดไว้เกิน  $\pm 3$  mm

1.4.8.2 ความหนาต้องไม่น้อยกว่า 9 mm

1.4.8.3 สามารถรับแรงด้านทางขวางไม่น้อยกว่า 450 N

1.4.8.4 การดูดซึมน้ำ กระจกเบื้องคอนกรีตมุงหลังคาต้องมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

1.4.8.5 ความไม่รั่วซึมต้องไม่ปรากฏหยดน้ำได้แผ่นกระจกเบื้อง หลังจากกักน้ำไว้เหนือผิวกระจกเบื้องสูง 50 mm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้ต้นแบบของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

1.5.2 ทำให้เกิดความรู้และเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

1.5.3 ได้แนวทางในการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์

1.5.4 บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติในฐานที่ยอมรับ



## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการพัฒนาและทดสอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก รวมทั้งสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับเป็นแนวทางในการนำไปออกแบบอาคารและระบบประกอบอาคาร เพื่อให้ได้ประโยชน์ในด้านพลังงาน โดยมีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

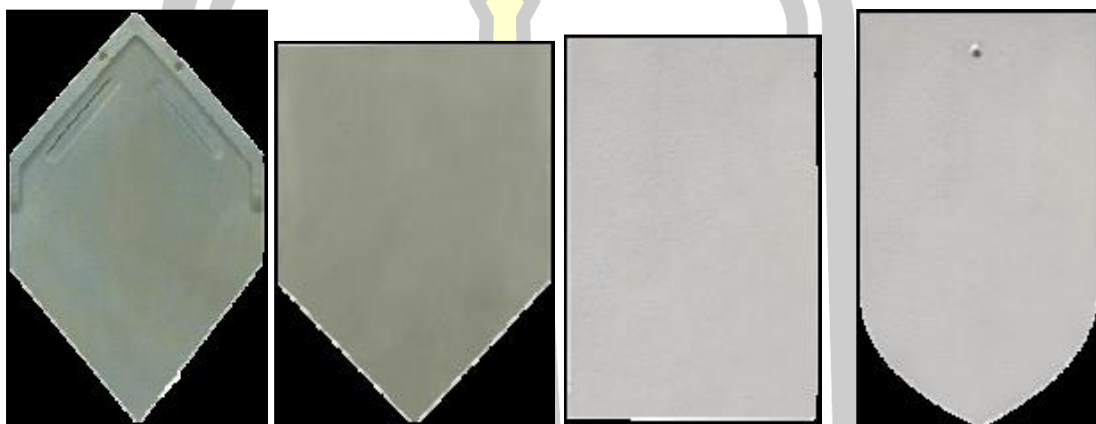
#### 2.1 กระเบื้องหลังคา

##### 2.1.1 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ (Cement roofing tile)

หลังคา (Roof) เป็นส่วนปกคลุมอาคารที่มีความสำคัญอย่างยิ่งส่วนหนึ่งของอาคาร และมีวัสดุและโครงสร้างหลากหลายแบบตามรูปทรงอาคาร หลังคาเป็นส่วนปกคลุมอาคารภายนอกและรวมถึงโครงสร้างที่ค้ำจุนหลังคาด้วย หลังคาเป็นองค์ประกอบของอาคารส่วนแรกที่ปกป้องให้ร่มเงากับพื้นที่ว่างภายในอาคาร หน้าที่กำบังฝน หิมะ แสงแดด ฯลฯ รูปทรงของหลังคาและระบบการก่อสร้างหลังคาที่ดี จะทำหน้าที่ควบคุมการไหลของน้ำออกจากหลังคา รวมทั้งเป็นทางผ่านของอากาศ ความร้อน และความเย็นอีกด้วย ระบบโครงสร้างหลังคาก็เช่นเดียวกับระบบโครงสร้างพื้น ซึ่งต้องสร้างพาดช่วงข้ามที่ว่างโดยทำหน้าที่รับน้ำหนักของตัวเองและทำหน้าที่รับน้ำหนักจร ซึ่งได้แก่น้ำหนักของลม ฝน หิมะ เป็นต้น น้ำหนักที่ถ่วงลงสู่อาคารนั้นจะเริ่มต้นจากน้ำหนักของหลังคา และถ่ายผ่านส่วนต่าง ๆ ของอาคาร เช่น เสา คาน ลงมาสู่ฐานรากของอาคาร ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร โครงสร้างหลังคาและวัสดุหลังคาควรทำด้วยวัสดุทนไฟ นอกจากนี้แล้วพื้นที่ว่างส่วนใต้หลังคาบางครั้งยังใช้เป็นทางเดินของสายไฟ และอุปกรณ์เครื่องกลต่าง ๆ แตกต่างกันไปตามประโยชน์ใช้สอยของอาคาร เนื่องจากหลังคาใช้คลุมพื้นที่กว้างไกลตามประโยชน์ใช้สอยของอาคาร ดังนั้นระบบโครงสร้างหลังคาจึงมักจะเป็นส่วนที่มีราคาแพงที่สุดส่วนหนึ่งของอาคาร [28]

กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ หมายถึง กระเบื้องที่ทำมาจากทรายผสมซีเมนต์และน้ำเมื่อคลุกเคล้ากันดีแล้วนำมาเข้าเครื่องอัดให้เป็นรูปร่างที่ต้องการการอัดด้วยแรงคน หรือโดยใช้เครื่องที่มีก้านโยกเพื่อผ่อนแรง เป็นวัสดุที่จัดเป็นวัสดุพื้นถิ่นชนิดหนึ่ง ส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ต่อทรายอยู่ระหว่าง 1:2 ถึง 1:4 โดยน้ำหนักเมื่อขึ้นรูปวัสดุจากเครื่องอัดแล้ว นำมาวางบ่มให้ซีเมนต์แข็งตัวประมาณ 3-7 วันจึงนำไปใช้ได้ รูปลักษณะของกระเบื้องมีทั้งรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเช่น ขนาด 15X28 cm<sup>2</sup> หนาประมาณ 8-10 mm ปลายกระเบื้องจะมีส่วนสำหรับยึดเกาะกับแป หรือระแนง กระเบื้อง

ซีเมนต์เป็นกระเบื้องที่นิยมใช้กันมาแต่โบราณ มีหลายรูปทรง เช่น กระเบื้องซีเมนต์ทรงว่าว, กระเบื้องซีเมนต์หม่อม, กระเบื้องหางมน, กระเบื้องปลายตัดและกระเบื้องซีเมนต์ทรงหกเหลี่ยม มีทั้งสีซีเมนต์หรือสีอื่น ๆ เช่น สีแดง, สีเหลือง หรือสีเขียว เมื่อต้องการให้เป็นสีใด ก็โรยผงซีเมนต์สีลงไป เมื่ออัดเป็นแผ่นแล้วปาดให้เรียบเสมอกัน ปัจจุบันสามารถผลิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยแรงงานคน หรือเครื่องก้านโยกระบบไฮดรอลิก ใช้ผงหลังคาที่มีความชื้นไม่น้อยกว่า  $20^{\circ}$



ภาพประกอบ 2.1 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ [29]



ภาพประกอบ 2.2 อาคารที่มุงกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ [29]

#### 2.1.1.1 เกณฑ์มาตรฐานกระเบื้องหลังคา

สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม มิได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมในเรื่องกระเบื้องมุงหลังคา จึงได้ศึกษามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเรื่อง

กระเบื้องหลังคาที่ใกล้เคียงกัน ดังนี้ มอก. 535-2537 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา มอก. 535-2537 ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ได้กำหนดให้กระเบื้องหลังคาคอนกรีตมุงหลังคามีเกณฑ์ไว้ดังนี้

- 1) ความกว้างยาวของกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา ต้องไม่ต่างจากขนาดที่ผู้ทำกำหนดไว้เกิน  $\pm 3$  มิลลิเมตร
- 2) ความหนาต้องไม่น้อยกว่า 9 mm
- 3) สามารถรับแรงด้านทางขวางไม่น้อยกว่า 450 N
- 4) การดูดซึมน้ำ กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคาต้องมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- 5) ความไม่รั่วซึมต้องไม่ปรากฏหยดน้ำได้แผ่นกระเบื้อง หลังจากกักน้ำไว้เหนือผิวกระเบื้องสูง 50 mm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 2.3 กระเบื้องหลังคาคอนกรีต [30]

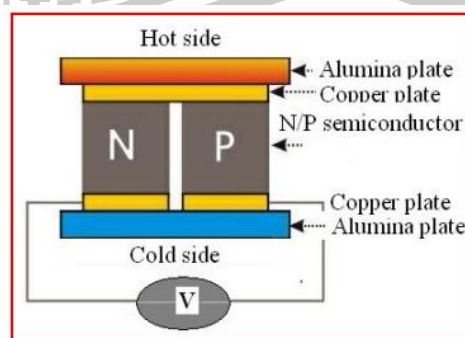
สำหรับการศึกษาการออกแบบและสร้างกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ในการทดสอบการรับแรงด้านทางขวางจะยึดใช้มาตรฐานของกระเบื้องคอนกรีต (มอก. 535-2537) ที่ไม่น้อยกว่า 450 N ส่วนการทดสอบการรั่วซึมและซึมผ่านของน้ำเลือกใช้ค่ามาตรฐานของกระเบื้องคอนกรีต (มอก. 535-2537) ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานของกระเบื้องดินเผา

## 2.2 เทอร์โมอิเล็กทริก

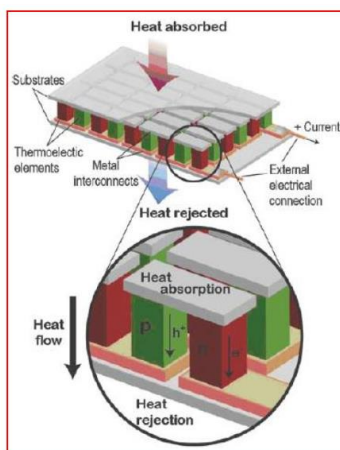
เทอร์โมอิเล็กทริกใช้หลักการเคลื่อนที่ของพาหะประจุอิเล็กตรอนหรือโฮลอิสระ และการสั่นของโฟนอนภายในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏการณ์เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อวัสดุมีผลต่างอุณหภูมิ เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีเบก (Seebeck effect) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric generator) ส่วนปรากฏการณ์การสร้างความร้อนหรือความเย็นเมื่อให้กระแสไฟฟ้ากับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เป็นเครื่องทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric cooler) สำหรับปรากฏการณ์ซีเบกนั้นจะมีค่าคงที่ของวัสดุซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับผลต่างของอุณหภูมิ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck's coefficient) โดยมีค่าทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของเทอร์โมอิเล็กทริก เช่น ในวัสดุสารกึ่งตัวนำจะมีสัมประสิทธิ์ ซีเบกเป็นบวกสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ สัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นลบสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สำหรับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าหรือตัวทำความเย็นนั้นจะประดิษฐ์ขึ้นจากโมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบขึ้นจากเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกหลายๆเซลล์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 (ก) โดยโมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูลจะประดิษฐ์จากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบด้วยขา (เซลล์) ที่เป็นชนิดเอ็น และขา (เซลล์) ที่เป็นชนิดพี อย่างละ 1 ขา (เซลล์) มาเชื่อมต่อกันด้วยแผ่นตัวนำบาง เช่น แผ่นทองแดง สำหรับให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้สะดวก จากนั้นประกบด้านบนและล่างด้วยแผ่นเซรามิคบางเพื่อเป็นตัวดูดซับหรือคายความร้อนให้ไหลผ่านโมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริกได้ดีและเสริมความแข็งแรงได้เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก p-n เทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 (ข) และในการประดิษฐ์อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีโมดูลประกอบจำนวนมากนั้นสร้างได้โดย นำ p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนหลาย ๆ อันมาต่ออนุกรม ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 (ค)



(ก)



(ข)



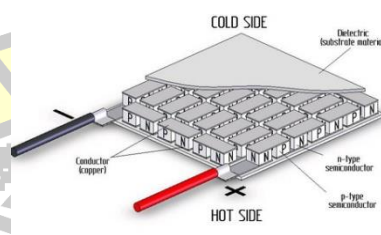
(ค)

ภาพประกอบ 2.4 (ก) โมดูลของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (ข) แสดงโครงสร้างขององค์ประกอบของ p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริก (ค) แสดงโครงสร้างโมดูลของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกหลาย p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

### 2.3 ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริก

ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกแบ่งออกได้ 2 แบบ [3] คือ

2.3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกแบบขั้นเดียว (Single-stage Peltier module) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.5



ภาพประกอบ 2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกแบบขั้นเดียว [4]

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบขั้นเดียวเป็นเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่าผลต่างอุณหภูมิระหว่างสองด้านไม่สูงมากนักประมาณ  $67^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

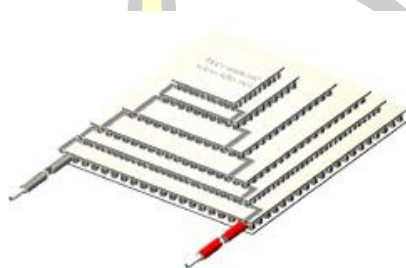
- 1) ขนาดพื้นที่ผิวเซรามิกของแผ่นขนาด  $1.8 \times 3.4 \text{ mm}^2$  ถึง  $62 \times 62 \text{ mm}^2$
- 2) ขนาดความหนาของแผ่นหนา  $2.54 \text{ mm}$  ถึง  $5.8 \text{ mm}$

3) ความสามารถในการระบายความร้อน 0.2 W ถึง 125 W

4) ค่ากระแสสูงสุดที่ผลิตได้ ตั้งแต่ 0.8 A ถึง 60 A

5) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตั้งแต่ 0.4 V ถึง 15.4 V

### 2.3.2 เทอร์โมอิเล็กทริกแบบหลายชั้น (Multistage thermoelectric module)



ภาพประกอบ 2.6 เทอร์โมอิเล็กทริกแบบหลายชั้น [5]

เทอร์โมอิเล็กทริกแบบหลายชั้น (ดูภาพประกอบ 2.6) เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต่อกันเป็นจำนวน 2 ชั้นขึ้นไปมีลักษณะและคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [6]

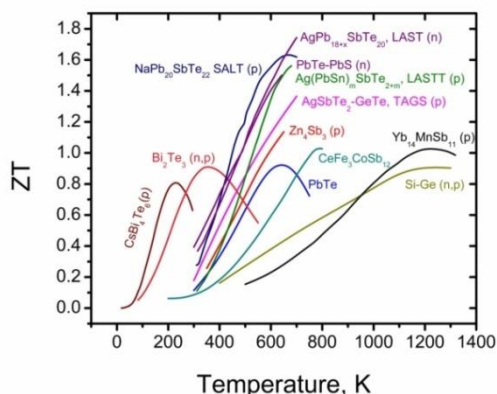
- 1) ขนาดพื้นที่ผิวเซรามิกด้านร้อนขนาด  $3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$  ถึง  $62 \times 62 \text{ mm}^2$
- 2) ขนาดพื้นที่ผิวเซรามิกด้านเย็นขนาด  $3.8 \times 3.8 \text{ mm}^2$  ถึง  $62 \times 62 \text{ mm}^2$
- 3) ขนาดความหนาของแผ่นหนา 3.8 mm ถึง 21.4 mm
- 4) ค่ากระแสสูงสุดที่ผลิตได้ ตั้งแต่ 0.7 A ถึง 9.5 A
- 5) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตั้งแต่ 0.8 V ถึง 14 V

ประเภทของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแบ่งได้ตามวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิต ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7 ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มตามอุณหภูมิใช้งานออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- 1) กลุ่มอุณหภูมิต่ำที่ 180-473 K เช่น Bi-Te, Sb-Te, Sb-Se เป็นต้น
- 2) กลุ่มอุณหภูมิระดับปานกลางที่ 500-900 K เช่น Pb-Te, Pb-Sn-Te, Sb-Se เป็นต้น
- 3) กลุ่ม อุณหภูมิระดับสูงที่ 800-1,300 K เช่น Si-Ge เป็นต้น

วัสดุที่นิยมใช้ในปัจจุบันเป็นวัสดุในกลุ่มที่ใช้งานอุณหภูมิต่ำ เช่น Bi-Te, Sb-Te เป็นต้น [7] โดยสามารถนำไปประยุกต์ได้หลากหลาย เพราะสามารถทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิห้อง จึงเป็นที่นิยมและศึกษากันเป็นจำนวนมาก





ภาพประกอบ 2.7 วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ผลิตเทอร์โมอิเล็กทริก [7]

จากการวิจัยและทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า เทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  เมื่อนำมาทดสอบที่อุณหภูมิด้านร้อนประมาณ  $210\text{ }^\circ\text{C}$  อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 7 ชั่วโมง ประสิทธิภาพลดลงประมาณ 37% เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100\text{ }^\circ\text{C}$  จะคืนสภาพกลับ ไม่ได้เกิดความเสียหาย สำหรับการทดลองอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิด้านร้อนประมาณ  $160\text{ }^\circ\text{C}$  แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะเกิดจากรอยต่อภายในเซลล์ [16] ในส่วนการนำไปทดสอบกับความร้อนทั้งจากอุตสาหกรรมจำลองโดยใช้เครื่องทำความร้อนขนาด 2 kW เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในแง่ของอัตราการถ่ายโอนความร้อนและพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ พบว่า เทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงสุดถึง 41% ควบคุมความเร็ว  $1.1\text{ m s}^{-1}$  ระบบผลิตความร้อน 1,079 W สามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 7 W เท่ากับ 0.7% [17] ในขณะที่การศึกษาระบบไฮบริดน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  โดยใช้ท่อสะสมความร้อนหัวพาราโบลาถ่ายโอนความร้อนไปยังด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก และใช้น้ำเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิที่แตกต่าง พบว่า หัวพาราโบลาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าใช้  $ZT = 1.0$  ของ  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  สามารถเพิ่มขึ้นจาก  $100\text{ }^\circ\text{C}$  ไปถึง  $200\text{ }^\circ\text{C}$  และอัตราส่วนที่กำหนดอยู่ที่ 0.92 ประสิทธิภาพไฟฟ้า 3.3% และความร้อนของระบบเป็น 48.6% เมื่อพลังงานรังสีแสงอาทิตย์  $800\text{ W m}^{-2}$  และอุณหภูมิของน้ำอยู่ที่  $20\text{ }^\circ\text{C}$  [18]

## 2.4 คุณสมบัติวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี

สารกึ่งตัวนำที่นำมาเป็นวัสดุในการผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีต้องมีคุณสมบัติ [8] ดังนี้

- 1) มีสภาพความนำไฟฟ้าสูงและการนำความร้อนต่ำ (ความร้อนเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานอุปกรณ์)
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกที่สูงซึ่งเป็นค่าที่บอกความสามารถในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้ดี
- 3) มีสภาพการนำความร้อนต่ำ

## 2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกเชิงพาณิชย์

เทอร์โมอิเล็กทริกถูกผลิตออกมาหลากหลายบริษัทจากหลายประเทศ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8 และ 2.9 เช่น สหรัฐอเมริกา รัสเซีย ยูเครน สาธารณรัฐประชาชนจีน เป็นต้น [9] ซึ่งผลิตออกมาในรูปแบบที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น การนำเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน ตัวอย่างชุดเทอร์โมอิเล็กทริกในเชิง [10]

The following specification are based on that the hot side temperature is at 160°C and cold side at 50°C.									
TEG P/N	Dimensions(mm)		V/K	Open circuit V	Matched load Ohm	Matched output Voltage	Matched output Power W	$\lambda$ -W/°C	Heat Flow through module W
	Hot side	Cold							
TEG31-2.8-1.2	30×30	30×30	0.02273	2.5	0.3	0.84	6.5	1	154.8
TEG49-4.5-2.0	62×62	62×62	0.03091	3.4	2	1.33	13	1.3	220.3
TEG49-4.5-2.5	62×62	62×62	0.03091	3.4	0.24	1.33	12.2	1	200.0
TEG71-1.4-1.6	30×30	30×30	0.04636	5.1	1.9	1.92	3.9	0.5	84.8
TEG127-1.4-1.0	40×40	40×40	0.05818	6.4	1.8	3.2	5.2	2	104.0
TEG127-2.0-1.3	50×50	50×54	0.05818	6.4	1.3	3.2	7.9	2.02	143.6
TEG127-2.0-1.6	50×50	50×54	0.05818	6.4	1.6	3.2	6.4	1.62	114.3
TEG161-1.2-2.0	40×40	40×40	0.05818	6.4	6.8	4.04	3.7	0.85	77.1
TEG161-1.2-4.0	40×40	40×40	0.05727	6.3	13.4	4.04	3	0.6	54.5
TEG241-1.0-1.2	40×40	40×40	0.11000	12.1	10	6	3.6	1	72.0
TEG241-1.4-1.2	54×54	54×57	0.10455	11.5	4.5	7	7	2.18	120.7
TEG254-1.4-1.2	40×80	44×80	0.10455	11.5	4.8	7	7	2.3	125.0
TEG254-1.4-1.6	40×80	44×80	0.11636	12.8	7.2	6.7	6.2	1.6	101.6
TEG450-0.8-1.0	54×54	54×57	0.19091	21	28	12	5	1.45	83.3

ภาพประกอบ 2.8 ข้อมูลเชิงเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิด้านร้อน 160 °C และอุณหภูมิด้านเย็น 50 °C [10]

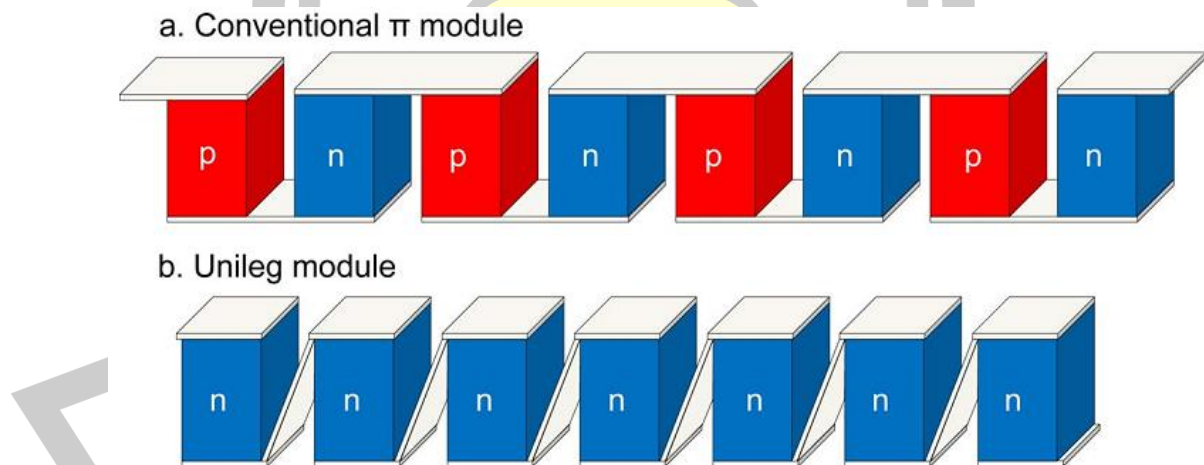
The following specification are based on that the hot side temperature is at 300°C and cold side at 50°C.

TEG P/N	Length	Width	V/K	Open circuit V	Matched output Ohm	Matched output Voltage	Matched output current A	Matched output power W	Heat flow through module W
TEG126-30A	30	30	0.03963	9.91	5.3	5.1	0.97	4.9	120.4
TEG126-40A	40	40	0.03963	9.91	5.3	5.2	0.98	5	120.4
TEG126-60A	56	56	0.03111	7.78	1.6	4	3.36	13.2	338.0
TEG241-60A	56	56	0.06519	16.30	4.1	8.5	1.96	16.5	362.0
TEG126-30B	30	30	0.03333	8.33	2.5	4.4	1.52	6.7	144.4
TEG126-40B	40	40	0.02667	6.67	1.7	3.58	1.9	6.8	137.0
TEG126-60B	56	56	0.03111	7.78	0.8	4.12	4.4	18	357.4
TEG241-60B	56	56	0.05333	13.33	2.3	7	2.84	19.7	387.0

ภาพประกอบ 2.9 ข้อมูลเชิงเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิด้านร้อน 300 °C และอุณหภูมิด้านเย็น 50 °C [10]

### 2.5.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

Jeffrey W. Fergus (2012) [33] ได้รายงานเกี่ยวกับรูปแบบการประดิษฐ์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แบบดั้งเดิม ซึ่งใช้วัสดุชนิด p และ n เชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้า และ แบบที่ใช้เฉพาะสารชนิด n ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้า ดังแสดงภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.10 รูปแบบการต่อขั้วไฟฟ้าและวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (a) แบบดั้งเดิมทั่วไป (b) แบบที่ใช้เฉพาะสารชนิดใดชนิดหนึ่งในการต่อ

### 2.5.2 การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล

Goudarzi และคณะ (2013) [34] ได้นำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล จำนวน 21 มอดูล มาประกอบติดกับผนังเตาที่ใช้ให้ความอบอุ่นและทำอาหารภายในบ้าน เพื่อนำเอาความร้อนที่เหลือทิ้งจากเตามาผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น ระบบแสงสว่าง วิทยุ โทรศัพท์ และอื่น ๆ ซึ่งในการติดตั้งนั้นมีการใช้น้ำเพื่อระบายความร้อนและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอดูลให้เพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด 14.7 W อีกทั้งยังได้ผลพลอยได้เป็นน้ำอุ่นเพื่อใช้ในการอุปโภคอีกด้วย



ภาพประกอบ 2.11 การประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลเข้ากับเตาให้ความร้อนภายในบ้าน และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

N.R. Kristiansen และ H.K. Nielsen (2010) [35] ได้สังเกตเห็นความสำคัญของความร้อนที่เหลือทิ้งอย่างมากมายจากเรือขนส่งสินค้า ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12 โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งความร้อนต่าง ๆ ที่อยู่บนเรือทั้งหมด 9 แห่ง ได้แก่ หน่วยผลิตไฟฟ้า เตาเผาขยะ ไอเสีย เครื่องยนต์หลักหลังจากหม้อน้ำ เครื่องยนต์หลักปรับอากาศ ใอน้ำส่วนเกินออกจากหม้อไอน้ำ เครื่องยนต์หลักระบายความร้อนด้วยน้ำ หน่วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าน้ำมันหล่อเย็น และคอนเดนเซอร์ ได้กำลังไฟฟ้าเป็น 10, 9.7, 42.4, 46.4, 5.9, 11.8, 4.3, 2.1 และ 0.4 kW ตามลำดับ

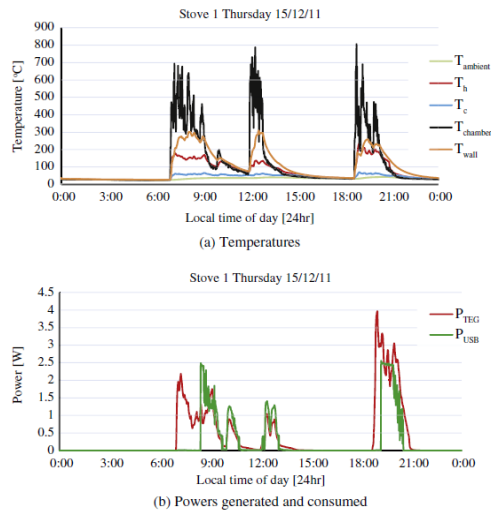


ภาพประกอบ 2.12 แหล่งความร้อนขนาดใหญ่จากเรือขนส่งสินค้า (M/V Rosita managed by Uglund Marine Services AS) เครื่องยนต์ 8.7 MW

S.M. O'Shaughnessy และคณะ (2013) [36] ได้ประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลกับเตา ดังแสดงในภาพประกอบ 2.13 และใช้แบตเตอรี่ ลิเทียม-ไอออนฟอสเฟต เก็บไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลผลิตได้ ผลการทดลองการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกกับเตาหุงต้ม พบว่า มีความสามารถในการผลิตถึง 9 Wh ซึ่งแบตเตอรี่ต้องใช้เพียง 8 Wh



ภาพประกอบ 2.13 เทอร์โมอิเล็กทริกประยุกต์กับเตา

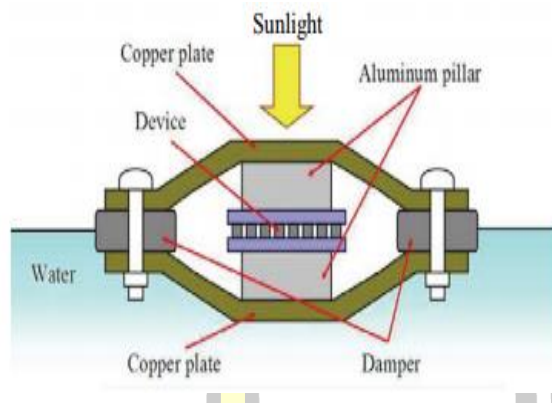


ภาพประกอบ 2.14 ผลการเก็บข้อมูล (a) อุณหภูมิ (b) กำลังไฟฟ้า

งานวิจัยของ Tetsuya Otaki [20] ได้ทำการศึกษากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกที่หลายค่าผลต่างอุณหภูมิทั้งสอง โดยจำลองแหล่งความร้อนด้วยเตารีด และระบายความร้อนด้านเย็นด้วยน้ำแข็ง และออกแบบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และระบายความร้อนด้วยน้ำในแม่น้ำ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ได้ดังแสดงในภาพประกอบ 2.15



ภาพประกอบ 2.15 แบบจำลองผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก [20]



ภาพประกอบ 2.16 ออกแบบอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกและระบายความร้อนด้วย  
ลำธาร [20]

Voltage [mV]	Temperature [°C]	Seebeck coefficient [V/K]
466.3	67.9	0.007
430.6	67.9	0.006
578.4	66.9	0.009
345.6	51.6	0.007
265.1	34.8	0.008

ภาพประกอบ 2.17 แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก  
ต่าง ๆ [20]

## 2.6 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก

การเพิ่มประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกแบ่งเป็น 3 วิธี [11] ดังต่อไปนี้

- 1) การเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนในระบบ
- 3) การรักษาผลต่างอุณหภูมิระหว่างสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริก

### 2.6.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ในช่วงปี ค.ศ.1990 นักวิจัยส่วนใหญ่ได้ให้ความสนใจในการศึกษาวิจัยคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้โลหะเรียกว่าโลหะผสมเชิงสอง (Binary elements) โดยมีเป้าหมายเพื่อที่จะพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีค่าที่สูงซึ่งส่งผลต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก แต่ด้วยข้อจำกัดทางคุณสมบัติวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทำให้สามารถทำให้ค่าฟิสิกเกอร์ออฟเมริท (ZT) ได้ประมาณ 1 ในเวลาต่อมา นักวิจัยได้พบว่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับคุณสมบัติการนำความร้อน หรือวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีจะสามารถนำความร้อนได้ดีด้วยตามความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ของ Wiedemann-Franz ซึ่งกล่าวว่า วัสดุที่มีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ภายในจะนำไฟฟ้าและความร้อนไปพร้อมกัน แต่เป้าหมายของนักวิจัยคือความต้องการในการเพิ่มค่า ZT ในวัสดุ โดยเพิ่มการนำไฟฟ้าแต่ลดค่าการนำความร้อน ซึ่งเป็นข้อจำกัด ต่อมา ในปี ค.ศ. 1995 เทคโนโลยีได้มีความก้าวหน้ามากขึ้น จึงได้นำวัสดุที่ผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นนาโนวัสดุ งานวิจัยขององค์การ NASA-JPL มหาวิทยาลัยมิชิแกน และองค์กรต่าง ๆ ได้ทำการคิดค้นวัสดุเทอร์โม อิเล็กทริกใหม่ขึ้น เช่น วัสดุ Thin-film superlattice, วัสดุ skutterudites, วัสดุควอนตัมเวลล์ (quantum well), โลหะผสม PbAgSbTe (LAST) และ พลอย โดยผลึกเมทริกซ์มีโครงสร้างแบบนาโน แฝงด้วยปรากฏการณ์ควอนตัมเวลล์ ซึ่งคุณสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้ดีและนำความร้อนต่ำ ทำให้ค่าฟิสิกเกอร์ออฟเมริท (ZT) มีค่าสูงขึ้นประมาณ 1.5 – 2 ในบางกรณีค่า ZT มีค่าเกือบถึง 3 หรือ 4 จากปรากฏการณ์ควอนตัมเวลล์ ทำให้คุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้มีค่า ZT สูงขึ้นด้วยเหตุผลหลัก 2 ข้อ คือ

- 1) สัมประสิทธิ์ซีเบกในวัสดุจะมีค่าสูง
- 2) วัสดุนาโนมีโครงสร้างที่มีลักษณะนำไฟฟ้าดีกว่า และมีโครงสร้างการนำความร้อนแยกออกจากกัน ทำให้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ [12]

### 2.6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนในระบบ

การเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อนเข้ามาในระบบต้องการให้ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายความร้อน เพื่อที่จะสามารถส่งพลังค์ความร้อนเข้ามายังอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกให้มากที่สุด โดยปกติแล้วเทคโนโลยีในการส่ง



ถ่ายความร้อนนี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนที่มีค่าผลต่างอุณหภูมิต่ำได้ ซึ่งมีหลายเทคนิควิธี [13] ดังนี้

- 1) แผ่นรับความร้อนที่ขนาดเล็ก (Microchannel & mini-channel heat-sinks)
- 2) ท่อความร้อนระบบ (Heat pipe systems)
- 3) ระบบการไหลสองเฟส (Two-phase flow systems)
- 4) การรับความร้อนอย่างรวดเร็วหรือระบบสเปรย์ความร้อน (Jet impingement or spray heat transfer systems)
- 5) อุปกรณ์ที่มีรูพรุน (Porous media)

ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจำเป็นต้องเพิ่มราคาต้นทุนของอุปกรณ์ ดังนั้นการนำเทคนิคดังกล่าวไปประยุกต์ใช้นั้น ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ได้ต่อต้นทุน และควรประยุกต์ใช้กับพลังงานความร้อนทิ้ง

#### 2.6.3 การรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริก

ปริมาณไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกค่าฟิสิกเกอร์ออฟเมริท (ZT) ที่มีค่าสูงซึ่งส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากเท่านั้น การรักษาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างแต่ละด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกก็สำคัญเช่นกัน เทคนิคส่วนใหญ่ที่ใช้คือการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยในการระบายความร้อน ซึ่งสามารถแบ่งเทคนิคดังกล่าวได้ [13] ดังนี้

- 1) การใช้ของเหลวในระบบ (Single-phase liquid systems)
- 2) การออกแบบครีปเพื่อเพิ่มพื้นผิวในการระบายความร้อน (Fined and Pin-Fin extended surface)
- 3) เทคนิคช่องขนาดเล็ก (Microchannel and mini-channel techniques)
- 4) ระบบท่อความร้อน (Heat pipe systems)

การระบายความร้อนที่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนทิ้งในปัจจุบัน นิยมใช้ของเหลวที่มีอัตราการไหลต่ำในการระบายความร้อน เพราะสามารถลดการนำความร้อนได้ดีกว่าการระบายความร้อนด้วยแก๊ส แต่การระบายความร้อนดังกล่าวต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมสำหรับคุณภาพแหล่งจ่ายความร้อนที่ต่างกัน เพราะการติดตั้งการระบายความร้อนเข้ามาในระบบจำเป็นต้องมีราคาต้นทุนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

## 2.7 การระบายความร้อนสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก

การระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีความสำคัญต่อการผลิตแรงดันไฟฟ้า โดยปัจจัยที่สำคัญในการระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ อุณหภูมิแวดล้อม ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนซึ่งการทดสอบการระบายความร้อนของ Melcor Corporation ได้แบ่งการระบายความร้อนสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกออกได้ 3 แบบ [3] ดังนี้

1) การระบายความร้อนด้วยอากาศโดยการพาความร้อนด้วยครีบแบบบังคับ (Finned forced air) มีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก 10-15 °C

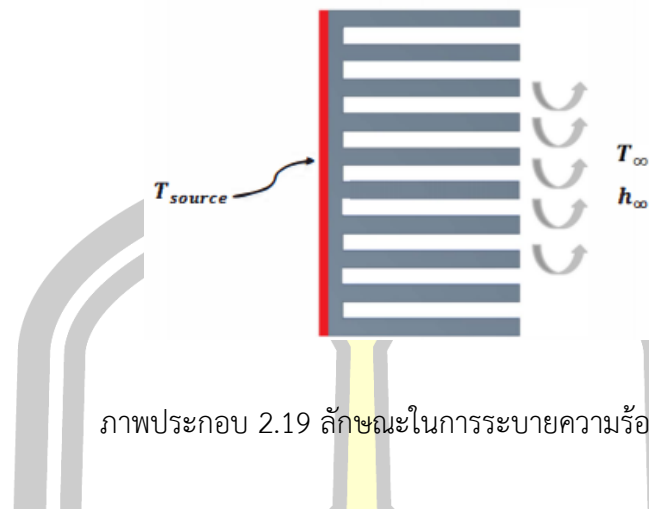
2) การระบายความร้อนด้วยอากาศโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection air) มีค่าอุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่าค่าอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 15-20 °C

3) การระบายความร้อนด้วยของเหลว (Liquid exchangers) ซึ่งค่าอุณหภูมิของเหลวจะต่ำกว่าค่าอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกประมาณ 2-5 °C

งานวิจัยของ Abdelhadi Bouknadel [23] ได้นำเสนอวัสดุที่ใช้ทำแผ่นระบายความร้อน 3 ชนิด ได้แก่ แกร์ไฟต์ ทองแดง และ อะลูมิเนียม ทดสอบกับแผ่นระบายความร้อนที่แตกต่างกัน 4 แบบ พบว่า แผ่นระบายความร้อนที่ทำจากแกร์ไฟต์สามารถลดค่าความต้านทานความร้อนและระบายความร้อนได้ดีที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 2.18-2.27

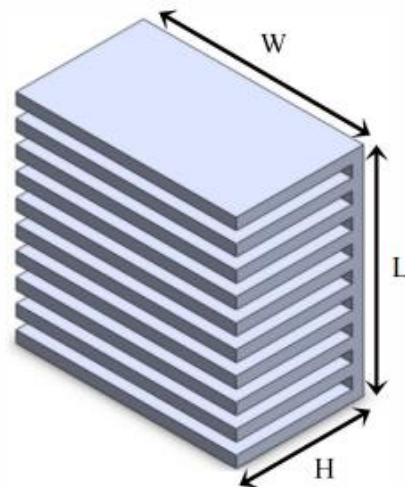
Materials	Parameter properties		
	Thermal Conductivity W/(m*K)	Density Kg/m <sup>3</sup>	Specific heat J/(Kg*K)
Aluminum	236	2710	386
Copper	398	8930	902
Graphite	1500	700 ~ 2100	1400 ~ 1600
	50 ~ 60		

ภาพประกอบ 2.18 แสดงคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดของแผ่นระบายความร้อน [23]



ภาพประกอบ 2.19 ลักษณะในการระบายความร้อน [23]

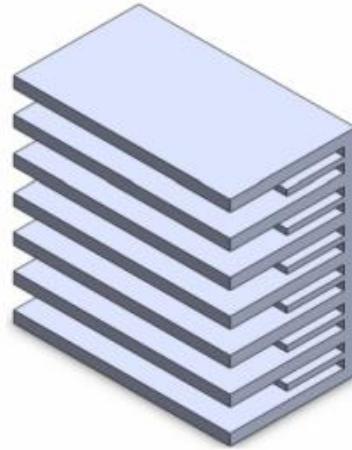
<i>Fin Length</i>	<i>Sink Width</i>	<i>Fin Height</i>	<i>Fin thickness</i>	<i>Fin spacing</i>	<i>Fin Number</i>
L/mm	W/mm	$H_f$ /mm	t/mm	b/mm	N
38	38	20	2	2	10



ภาพประกอบ 2.20 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 1 [23]

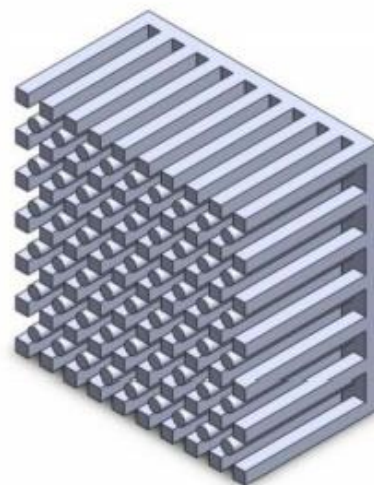


<i>Fin Length</i>	<i>Sink Width</i>	<i>Fin Height1</i>	<i>Fin Height2</i>	<i>Fin Spacing</i>	<i>Fin Number</i>
L/mm	W/mm	$H_{f1}$ /mm	$H_{f2}$ /mm	b/mm	N
38	38	20	10	2	13



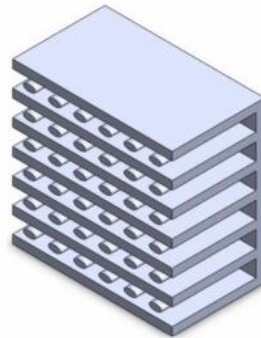
ภาพประกอบ 2.21 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 2 [23]

<i>Fin Length</i>	<i>Sink Width</i>	<i>Height of square fin</i>	<i>Height of circular fin</i>	<i>Radius of circular fin</i>	<i>Section of square fin</i>
L/mm	W/mm	$H_{sf}$ /mm	$H_{cf}$ /mm	$r_{cf}$ /mm	S/mm
38	38	20	20	4	2

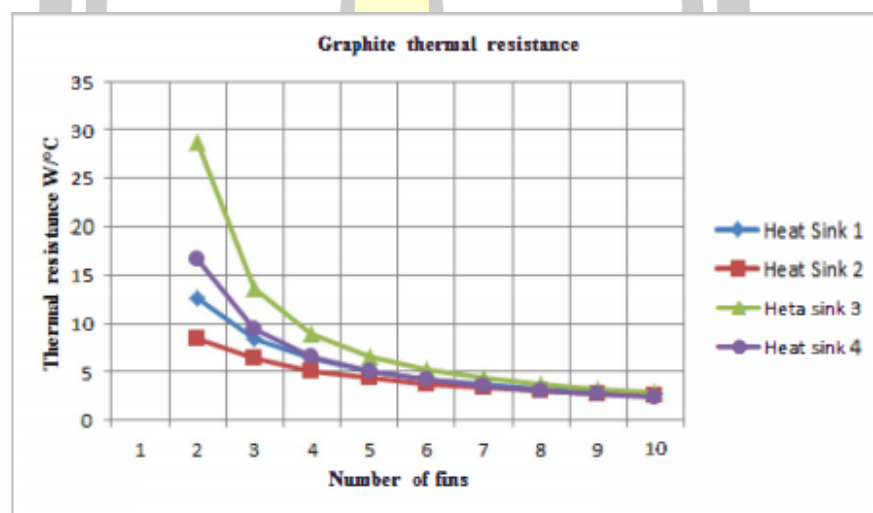


ภาพประกอบ 2.22 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 3 [23]

<i>Fin Length</i>	<i>Sink Width</i>	<i>Elliptical fin Height</i>	<i>Rectangular fin Height</i>	<i>Major Axis</i>	<i>Minor Axis</i>
L/mm	W/mm	$H_{ef}$ /mm	$H_{rf}$ /mm	c/mm	a/mm
38	38	20	20	3	1.5

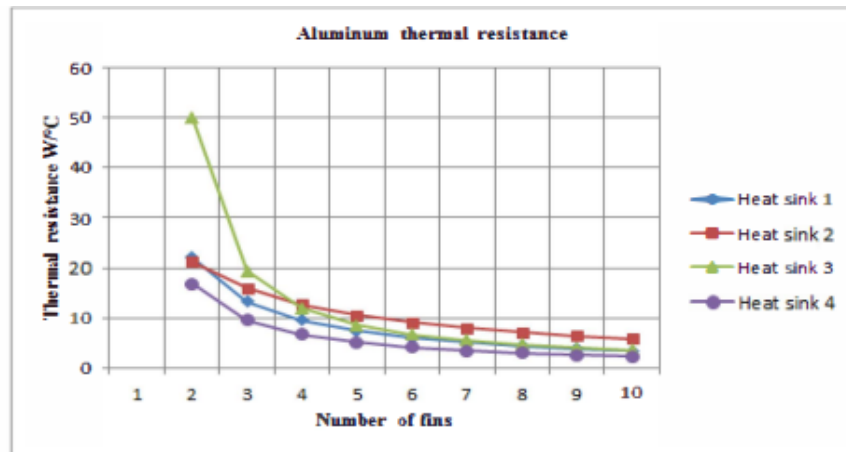


ภาพประกอบ 2.23 คุณลักษณะของแผ่นระบายความร้อนแบบที่ 4 [23]

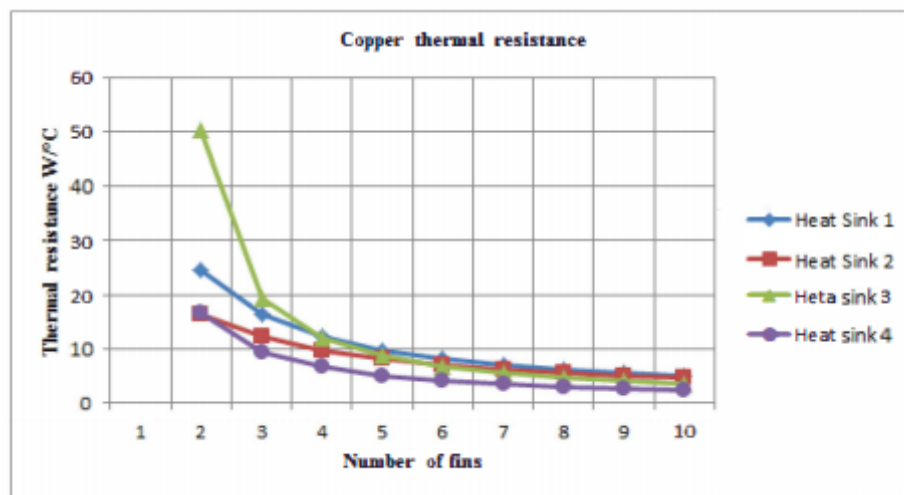


ภาพประกอบ 2.24 ค่าความต้านทานความร้อนที่จำนวนครีบอกต่างกันของแผ่นระบายความร้อนที่ทำจากแกรไฟต์ [23]

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบ 2.25 ค่าความต้านทานความร้อนที่จำนวนครีบแตกต่างกันของแผ่นระบายความร้อนที่ทำจากอะลูมิเนียม [23]



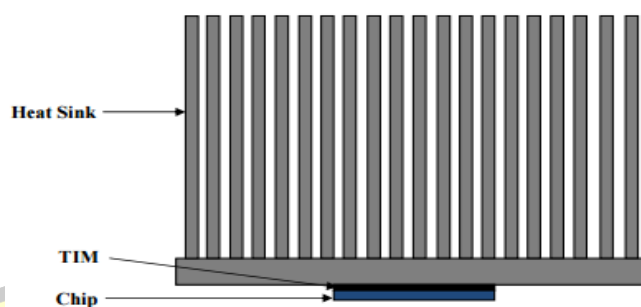
ภาพประกอบ 2.26 ค่าความต้านทานความร้อนที่จำนวนครีบแตกต่างกันของแผ่นระบายความร้อนที่ทำจากทองแดง [23]

พหุ ประถม ๓๓๓๓

Materials	Temperature of heat sinks models (°C)				
	Temperature	Heat sink 1	Heat sink 2	Heat sink 3	Heat sink 4
Aluminum	$T_{max}$	60	60	60	60
	$T_{min}$	25.52	25.51	25.13	25.12
Copper	$T_{max}$	60	60	60	60
	$T_{min}$	26.62	26.61	25.56	25.53
Graphite	$T_{max}$	60	60	60	60
	$T_{min}$	32.71	32.39	30.39	30.32

ภาพประกอบ 2.27 อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของวัสดุที่แผ่นระบายความร้อนที่แตกต่างกัน [23]

งานวิจัยของ Mathias Ekpu [24] ได้ศึกษาความหนาของแผ่นระบายความร้อนโดยเปรียบเทียบจากวัสดุที่ใช้ในการทำแผ่นระบายความร้อน 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองแดงและซิลิกอน โดยทดสอบที่อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุด พบว่าความบาง และความสูงของครีระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการระบายความร้อนดีขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในภาพประกอบ 2.28- 2.35

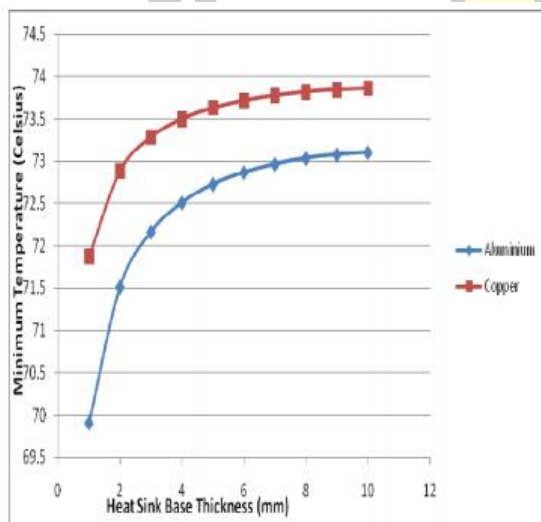


ภาพประกอบ 2.28 แบบจำลองในการศึกษาผลกระทบจากความสูงและหนาของครีระบายความร้อน [24]

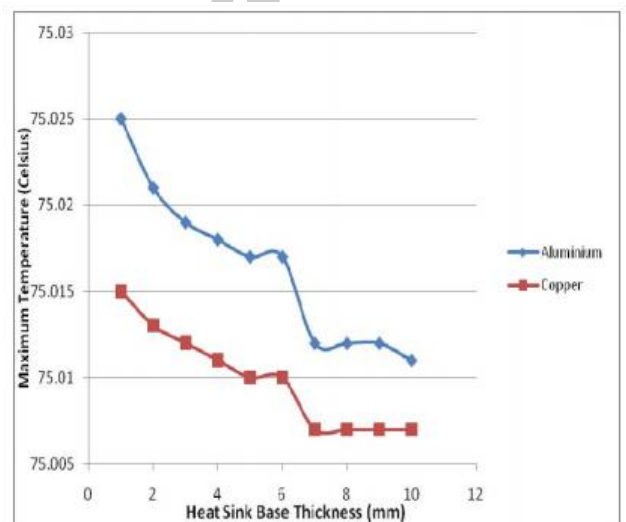
พหุ ประถม ทัต ชีเว

Material	Thermal Conductivity (W/mK)
Aluminium	237.5
Copper	400.0
Silicon	148.0
Thermal Interface Material	10.0

ภาพประกอบ 2.29 การแสดงวัสดุของแผ่นระบายความร้อนในการศึกษาผลกระทบจากความสูงและหนาของครีระบายความร้อน [24]



(ก)

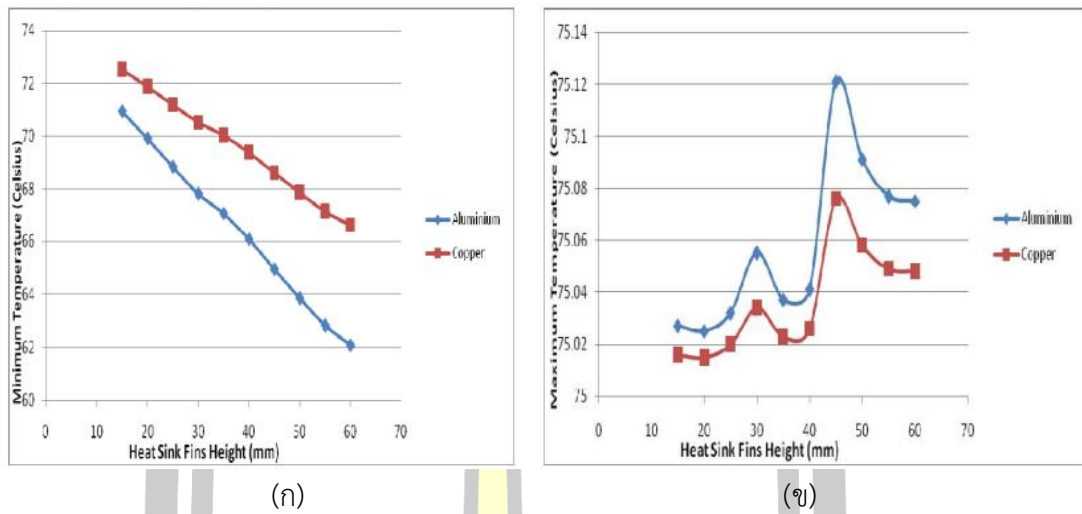


(ข)

ภาพประกอบ 2.30 อุณหภูมิครีระบายความร้อนที่ความหนาแตกต่างกัน (ก) อุณหภูมิต่ำสุด (ข) อุณหภูมิสูงสุด [24]

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์





ภาพประกอบ 2.31 อุณหภูมิครีบบระบายความร้อนที่ความสูงแตกต่างกัน (ก) อุณหภูมิต่ำสุด (ข) อุณหภูมิสูงสุด [24]

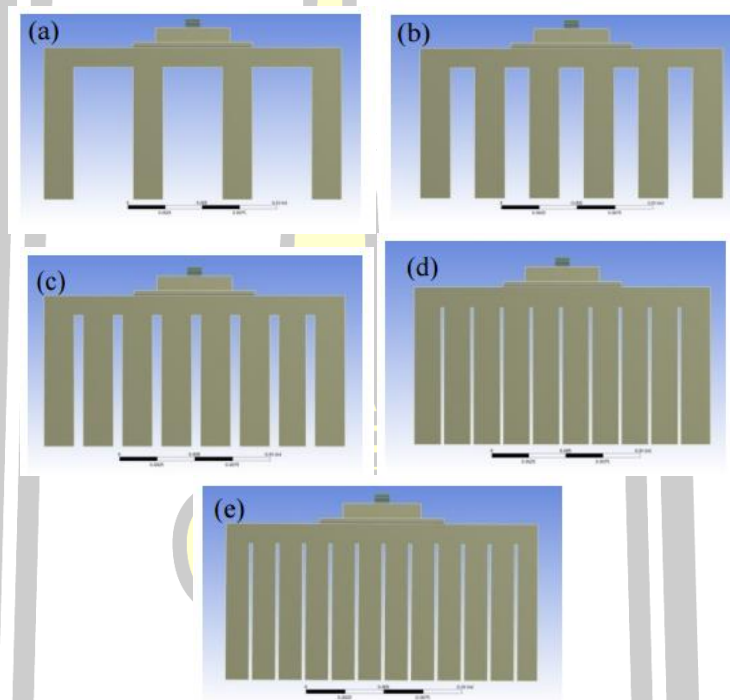
งานวิจัยของ Retnasamy, V. [25] ได้พบปัญหาของหลอดแอลอีดีที่ไม่สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าทั้งหมดเป็นแสงสว่างซึ่งมีพลังงานบางส่วนเป็นความร้อนสูญเสียซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแสงและอายุการใช้งานของแอลอีดี จึงได้ทำการศึกษหาจำนวนของครีบบระบายความร้อนสำหรับหลอดแอลอีดีที่เหมาะสม โดยแผ่นระบายความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนครีบบแตกต่างกันทั้งหมด 5 แบบ ได้แก่ แบบ 4 ครีบบ 6 ครีบบ 8 ครีบบ 10 ครีบบและ 12 ครีบบ ตามลำดับ และทดสอบกับแผ่นระบายความร้อนที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.32-2.34 พบว่าจำนวนครีบบที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้สมรรถภาพในการระบายความร้อนเพิ่มตามไปด้วย

Material	Thermal conductivity k (W/m°C)
GaN	130
Sapphire	42
Au-20Sn ( Die Attach)	57
Copper (Heat slug)	401
MCPCB	201
TIM	0.75
Aluminum(Heat sink)	237

ภาพประกอบ 2.32 คำนนำความร้อนของวัสดุต่างชนิดที่ใช้ทำแผ่นระบายความร้อน [25]

Number of fins	4	6	8	10	12
Fin width (mm)	2	2	2	1.8	1.5
Spacing (mm)	4	1.6	0.57	0.22	0.18

ภาพประกอบ 2.33 แสดงจำนวนครีบ ความกว้างและพื้นที่ผิวของแผ่นระบายความร้อน [25]



ภาพประกอบ 2.34 แผ่นระบายความร้อนจำนวน 4, 6, 8, 10 และ 12 ครีบ [25]

Heat sink (Fins)	Junction Temperature (°C)	Von Mises Stress (MPa)	Thermal Resistance (°C/W)
4	108.71	212.46	83.71
6	93.23	173.76	68.23
8	83.45	148.48	58.45
10	76.88	128.91	51.88
12	72.32	115.65	47.32

ภาพประกอบ 2.35 แสดงอุณหภูมิรอยต่อความต้านทานความร้อนของแผ่นระบายความร้อนที่จำนวนครีบต่างกัน [25]

## 2.8 ประสิทธิภาพเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุที่แสดงความเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีค่าบ่งชี้ความเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก  
คือค่า

$$ZT = S^2 \sigma T / \kappa \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ  $S$  คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก ( $V K^{-1}$ )

$\sigma$  คือ ค่าสภาพความนำไฟฟ้า ( $\Omega m^{-1}$ )

$\kappa$  คือ ค่าสภาพความนำความร้อน ( $W \cdot m K^{-1}$ )

และ  $T$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

โดยวัสดุที่มีค่า  $ZT$  สูงก็แสดงความเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสูง คือสามารถผันพลังงานไฟฟ้าได้สูงตามไปด้วย โดยค่า  $ZT$  จะมีค่าสูงเมื่อวัสดุมีค่าของ  $S$  และ  $\sigma$  มีค่าสูงมาก แต่สำหรับค่า  $\kappa$  ต้องมีค่าน้อยมาก และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกควรสามารถใช้งานที่อุณหภูมิ ( $T$ ) สูงได้ด้วย (ไม่หลอมละลายที่จุดอุณหภูมิทำงาน หรือไม่หลอมละลายที่ความร้อนเหลือทิ้ง) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกของตัวผันไฟฟ้าจากความร้อน พิจารณาจากสัดส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ได้กับพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าไปเขียนความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกตัวผันไฟฟ้าความร้อน ( $\eta$ ) ได้เป็น

$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{in}} \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ  $P_{out}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา (W)

และ  $Q_{in}$  คือ กำลังของความร้อนที่ให้เข้าไป (W)

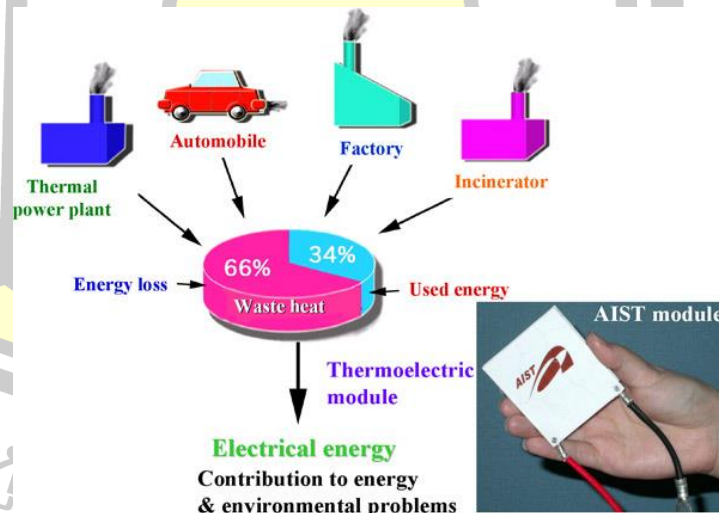
พจนานุกรมศัพท์โตชีวะ

## 2.9 การใช้พลังงานความร้อนทิ้งสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก

พลังงานความร้อนที่ใช้ในชีวิตประจำวันและงานด้านอุตสาหกรรม เช่น การสันดาปของเครื่องยนต์ การใช้ความร้อนแปรรูปโลหะ การผลิตไฟฟ้าจากเครื่องจักรไอน้ำ เกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล เชื้อเพลิงฟอสซิล ไบโอดีเซล เป็นต้น ซึ่งพบว่า สามารถนำความร้อนจากแหล่งพลังงานดังกล่าวไปใช้ได้เพียงร้อยละ 30-40 เท่านั้น ในส่วนความร้อนที่เหลือต้องทิ้งไปกับระบบระบายความร้อน คิดเป็นร้อยละ 60-70 เนื่องจากข้อจำกัดของประสิทธิภาพคาร์โนต์ที่ว่า ระบบใดที่ผ่านกระบวนการดูดความร้อนจากแหล่งกักเก็บอุณหภูมิหนึ่ง ไม่สามารถแปลงความร้อนทั้งหมดไปเป็นพลังงานกลได้ [14] ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\eta_c = \frac{T_{hot} - T_{cool}}{T_{hot}} \dots\dots\dots(2.3)$$

เมื่อ  $\eta_c$  คือ ประสิทธิภาพคาร์โนต์  
 $T_{hot}$  คือ อุณหภูมิสัมพัทธ์ของแหล่งกำเนิดความร้อน (K)  
 $T_{cool}$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์การระบายความร้อน (K)



ภาพประกอบ 2.36 แหล่งความร้อนทิ้งต่าง ๆ ที่สามารถนำเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ได้ [15]

คุณภาพความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้งในอุตสาหกรรม

ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้งสามารถแบ่งตามคุณภาพความร้อนได้เป็น 3 ระดับ คือ อุณหภูมิสูง หมายถึง ช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 650 °C อุณหภูมิปานกลาง หมายถึง อุณหภูมิระหว่าง 230-650 °C อุณหภูมิต่ำ หมายถึง อุณหภูมิต่ำกว่า 230 °C [15] ดังแสดงในตารางที่ 2.37-2.39

แหล่งความร้อนทิ้ง	อุณหภูมิ (°C)
Nickel Refining Furnace	1,371-1,649
Aluminum Refining Furnace	649-760
Zinc Refining Furnace	760-1,093
Copper Refining Furnace	760-816
Steel Heating Furnace	927-1,038
Glass Melting Furnace	982-1,538
Solid Waste Incinerators	649-982

ภาพประกอบ 2.37 แหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง [15]

แหล่งความร้อนทิ้ง	อุณหภูมิ (°C)
Steam Boiler Exhausts	232-482
Gas Turbine Exhausts	371-538
Reciprocating Engine Exhausts	316-593
Heat Treating Furnace	427-649
Drying and Baking Ovens	232-593

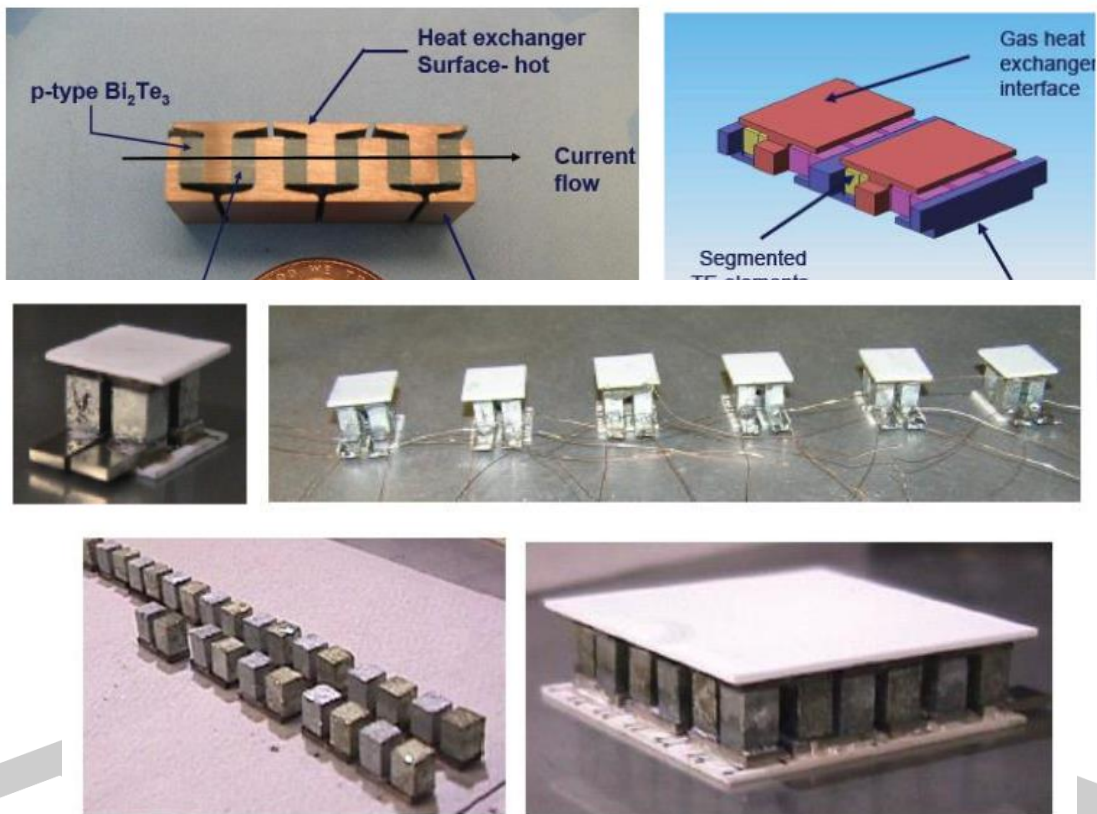
ภาพประกอบ 2.38 แหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิปานกลาง [15]

แหล่งความร้อนทิ้ง	อุณหภูมิ (°C)
Process Steam Condensate	54-88
Cooling Water from:	
Furnace Doors	32-54
Bearings	32-88
Welding Machines	32-88
Injection Molding Machines	32-88
Air Compressor	27-49
Internal Combustion Engine	66-121
Condenser of Air Conditioner and Refrigerator	32-43

ภาพประกอบ 2.39 แหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิต่ำ [15]

## 2.10 การประยุกต์ใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ได้ออกมาจะวัดเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผันได้จะขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดวัสดุ และความต่างของอุณหภูมิที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ โดยยิ่งป้อนผลต่างอุณหภูมิให้แก่อุปกรณ์สูงขึ้นก็จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น และเมื่อสร้างอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้จำนวน p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีจำนวนมากขึ้น จะได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นตามด้วย สำหรับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีจำนวน p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนมากได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.40

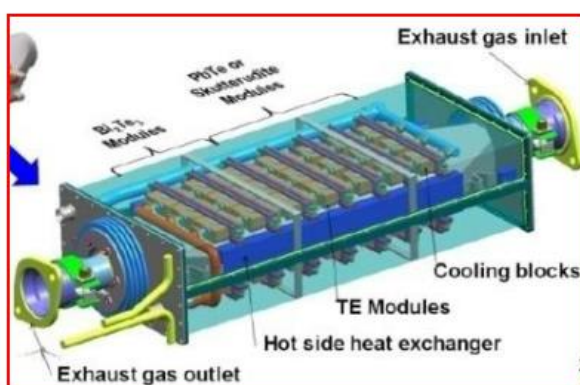


ภาพประกอบ 2.40 การออกแบบโมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริกในรูปแบบต่าง ๆ กัน

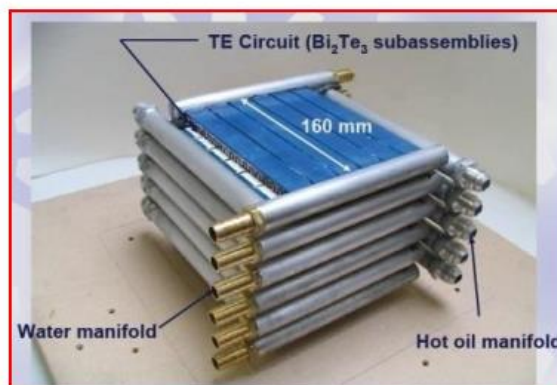
การประยุกต์ในปรากฏการณ์ซีเบกนั้นสามารถนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาประดิษฐ์เป็นตัวกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากความร้อน ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ผันไฟฟ้าจากความร้อนที่เหลือทิ้งหรือความร้อนส่วนเกินจากกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ เช่น ความร้อนจากท่อไอเสียรถยนต์ ความร้อนจากหม้อต้มน้ำ ความร้อนสูง ความร้อนจากร่างกายมนุษย์ หรือแม้แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ความร้อนจากแสงแดด ความร้อนจากน้ำพุร้อน ความร้อนจากดินหรือความร้อนที่เกิด

จากสภาวะโลกร้อน สำหรับการสร้างอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความ ร้อน สามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในรูปทรงแบบต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นจาก p-n โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ดังแสดงในภาพประกอบ 2.41

เมื่อได้โมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริกแล้วก็สามารถนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ประยุกต์ สำหรับการใช้งานในแบบต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผันไฟฟ้าจากความร้อนท่อไอ เสียดังแสดงในรูปภาพประกอบ 2.41 (ก) และอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสร้างไฟฟ้าจากท่อน้ำร้อนและ ท่อน้ำเย็นเหลือทิ้งจากโรงงานดังแสดงในภาพประกอบ 2.41 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2.41 (ก) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสร้างไฟฟ้าจากความร้อนท่อไอเสียดรถยนต์

(ข) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสร้างไฟฟ้าจากท่อน้ำร้อนและท่อน้ำเย็นเหลือทิ้ง

การประยุกต์ใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนในท่อไอเสียดรถยนต์ และผลิตพลังงาน ไฟฟ้าให้กับดาวเทียมโดยใช้ความร้อนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ดังแสดงในรูปภาพประกอบ 2.42 (ก) การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกในด้านความเย็นโดยสร้างตู้เย็นขนาดเล็กที่พกพาเคลื่อนที่ได้โดยใช้ พลังงานไฟฟ้าจากการแบตเตอรี่ และใช้สำหรับการระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังแสดง ในรูปภาพประกอบ 2.42 (ข) การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกสร้างไฟฟ้าจากความร้อนจากแสงแดด โดยการรวมความร้อนจากแสงแดดไปยังอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปภาพประกอบ 2.42 (ค) การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนในท่อไอเสียดบรรทุก ดังแสดง ในดังแสดงในรูปภาพประกอบ 2.42 (ง) การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นตัว กำเนิดไฟฟ้าให้กับ นาฬิกาโดยอาศัยความร้อนจากผิวหนังของมนุษย์ ดังแสดงในดังแสดงในรูปภาพประกอบ 2.42 (จ)

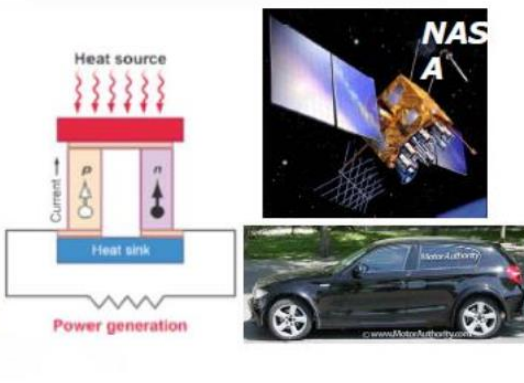
การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนแสงแดดแทนเซลล์แสงอาทิตย์  
 (ช) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.42



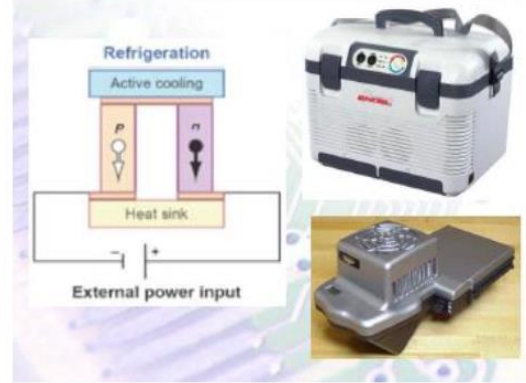
(ก)



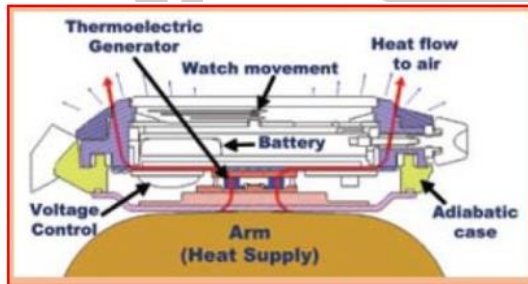
(ข)



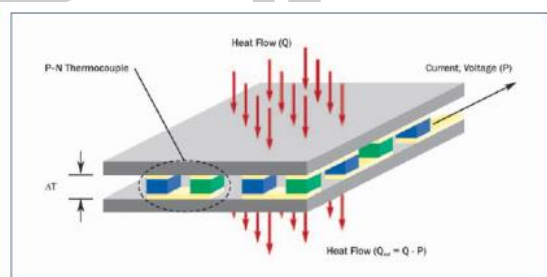
(ค)



(ง)



(จ)



(ช)

ภาพประกอบ 2.42 แสดงการประยุกต์ใช้งานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก



## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมมาตร ละบายูไซ้ (2556) [25] การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบหลังคาโลหะ เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ชุดทดสอบประกอบด้วย (Solar collector) หลังคาโลหะ (พ่นสีดำ) ขนาด  $0.70 \times 0.70 \text{ cm}^2$  อุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้า (Thermoelectric Generator) ที่ประกอบด้วย แผ่นทองแดงขนาด  $20 \times 12 \text{ cm}^2$  เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 4 หน่วย ต่ออนุกรมจำนวน 1 ชุด, แผงอลูมิเนียม (heat sink) และพัดลมระบาย (DC Fan) การทดลองกำหนดให้การระบายของหลังคาโลหะ (พ่นสีดำ) และอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้ามีการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และการใช้พัดลม ในการระบายอากาศโดยธรรมชาติ วัดผลต่างอุณหภูมิด้านร้อนกับด้านเย็น ได้  $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (เฉลี่ย  $8.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) และวัดได้สูงสุดถึง  $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (เฉลี่ย  $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ในการระบายอากาศด้วยพัดลม โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ  $0.12 \text{ V}$  ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ส่วนการนำไปใช้ประโยชน์และเป็นพลังงานทางเลือกในงานสถาปัตยกรรม ควรมีการออกแบบ และพัฒนาอุปกรณ์ เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้ามากขึ้นต่อไป

ธนากร (2553) [24] ออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และนำกระแสไฟฟ้าไปใช้กับพัดลมระบายความร้อนใต้หลังอาคารพักอาศัย โดยใช้ประกอบชุดทดลองที่ประกอบด้วย ชุดหลังคาจำลอง ประกอบกับชุดทดลองที่มีการร่วมแสง และความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ที่มีเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยค่าความต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของชุดทดลอง ผลการทดสอบอุปกรณ์ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ผลต่างอุณหภูมิได้  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  วัดแรงดันไฟฟ้าได้  $0.30 \text{ V}$  จากจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริก 4 ตัว และได้แสงธรรมชาติประมาณ  $200 \text{ lux}$  สามารถใช้งานห้องใต้หลังคา เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นใช้ความแตกต่างด้านอุณหภูมิ ของชุดทดสอบ เพื่อนำกระแสไฟฟ้าใช้กับพัดลมระบายอากาศใต้หลังคา เพื่อช่วยระบายความร้อนและลดอุณหภูมิใต้หลังคา พร้อมกับได้แสงธรรมชาติ

พรหมพิทักษ์ อัสรางชัย (2557) [27] ศึกษาวิธีการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยค่าความต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล ในระบบที่เกิดจากความร้อนของแสงอาทิตย์ตกกระทบบและสะสมบนเปลือกอาคารกับอุณหภูมิภายในอาคารปรับอากาศ โดยความต่างของอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ซีเบก ในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล และจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก จากความต่างของอุณหภูมิที่เกิดจากการใช้งานอาคารและความร้อนจากแสงอาทิตย์ว่าสามารถตอบโจทย์ด้านการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากน้อยขนาดไหน รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เช่น

ความสามารถในการระบายและเก็บความร้อนของระบบ พื้นผิวที่ทำการติดตั้งระบบ และ ระบบ เครื่องกลอื่น ๆ ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวระบบนี้ได้มากขึ้น โดยปัจจัยหลักคือ ค่าความต่างของอุณหภูมิผิวทั้งสองด้านของ TE Modules ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยการใช้ระบบ Active/Passive Airflow Window และการทาสีดำบริเวณผิวด้านที่สัมผัสความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย จากการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพดังกล่าวสรุปได้ว่า ระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลองทั้ง 2 วัน คือระบบ Active airflow window แบบทาสีดำ โดยผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้ที่  $1,052.75 \text{ W m}^{-2}$  รองลงมาคือระบบ Active airflow window แบบสีขาวผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้  $520.02 \text{ W m}^{-2}$  รองลงมาคือระบบ Passive airflow window แบบทาสีดำผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้  $339.89 \text{ วัตต์/ตารางเมตร}$  และสุดท้ายคือระบบ Passive airflow window แบบสีขาว ผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมได้  $236.51 \text{ W m}^{-2}$

จากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการประกอบอาคาร แต่ยังไม่มีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบกับกระเบื้องมุงหลังคา จากการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านหลังคาสู่ภายในอาคารให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกถือเป็นหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าสนใจ เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกไม่มีการเผาผลาญเชื้อเพลิง ไม่ทำให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายจากการเผาไหม้ ไร้เสียงเพราะไม่มีวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องเคลื่อนไหว และตัวอุปกรณ์เองมีอายุการใช้งานยาวนานและสามารถถอดประกอบได้ รวมไปถึงการบำรุงรักษาที่ไม่ยุ่งยาก เนื่องจากไม่มีการใช้ของเหลว ไม่ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบเหมือนกับการผลิตพลังงานลักษณะอื่น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนากระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับเป็นแนวทางในการนำไปออกแบบอาคารและระบบประกอบอาคารเพื่อให้ได้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนต่อไป

พจนัน ปณฺ ทิโต ชีเว

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกต้นแบบ โดยวิธีการดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก สร้างแม่พิมพ์ของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแต่ละแบบเพื่อใช้ในการประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก และการทดสอบ โครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุกึ่งตัวนำ

##### 3.1.1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองทดสอบประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก จึงต้องใช้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ในการทดลอง ดังนี้

##### 3.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

3.1.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM ยี่ห้อ: JEOL รุ่น: JSM-7610FPlus) โดยใช้หัววัด Secondary Electron Detector ถ่ายภาพออกมาในโหมด Secondary Electron Image (SEI) และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) โดยแสดงผลเป็นสเปกตรัมพลังงานของธาตุต่าง ๆ พร้อมกับระบุสัดส่วนปริมาณของแต่ละส่วนประกอบ

พหุ ประ โท ชี เว



ภาพประกอบ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ทำการวัดที่ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3.1.2.2 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD ยี่ห้อ: SHIMADZU รุ่น: XRD-6100) ซึ่งใช้รังสีเอกซ์  $\text{CuK}\alpha 1$  ความยาวคลื่น  $1.54056 \text{ \AA}$



ภาพประกอบ 3.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทำการวัดที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานทางเลือก (ศลพ.) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

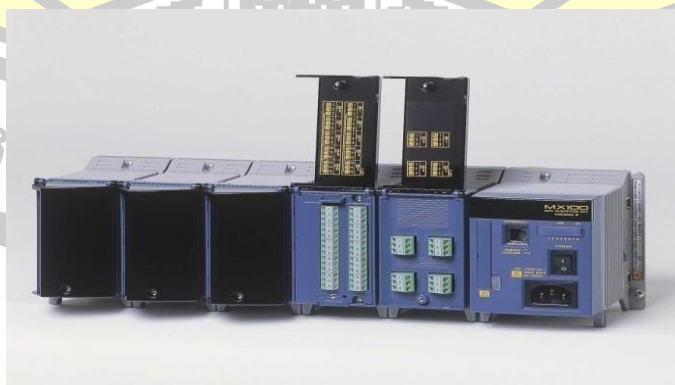
3.1.2.3 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกและสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Seebeck Coefficient/ Electrical Resistance Measurement System, ZEM-3 ยี่ห้อ ULVAC-RIKO)



ภาพประกอบ 3.3 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกและสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานทางเลือก(ศลพ.) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

### 3.1.3 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data acquisition)

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data acquisition) ยี่ห้อ YOKOGAWA Model IM MX 100 มีจุดวัดอุณหภูมิ 30 ช่องสัญญาณ มีช่วงวัดอุณหภูมิ  $-200^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1,100^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 3.4 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ

### 3.2.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

ในการทดลองนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ช่วงวัดอุณหภูมิ  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ YOKOGAWA Model IM MX 100



ภาพประกอบ 3.5 สายเทอร์โมคัปเปิล

### 3.1.4 เครื่องวัดทางไฟฟ้าแบบคล้องสาย (Clamp on power meter)

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแบบคล้องสาย ยี่ห้อ Yokogawa: model CW 140 ซึ่งในการทดลองนี้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3.6 เครื่องวัดทางไฟฟ้าแบบคล้องสาย

### 3.1.5 เครื่องวัดทางไฟฟ้าแบบดิจิตอล (Digital multimeter)

ยี่ห้อ FUKE : model DT 9205 ซึ่งในการทดลองนี้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3.7 เครื่องวัดทางไฟฟ้าแบบดิจิตอล

### 3.1.5 เครื่องวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์ (Pyranometer)

ยี่ห้อ Hukseflux รุ่น LP02-LI19 pyranometer สำหรับการวัดค่ารังสีรวม (Global Solar Radiation) ในขณะที่ทำการทดสอบโดยใช้ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ดังแสดงในภาพประกอบ 3.8



ภาพประกอบ 3.8 เครื่องวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องบันทึกข้อมูล

### 3.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

3.2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

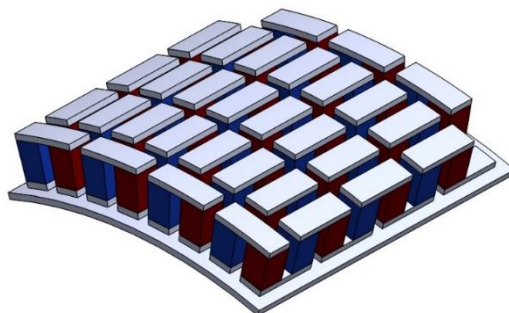
การจำลองเพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกโดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Solidwork 2019 และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 18.0 โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ผลจำลองที่สร้างขึ้น โดยกำหนดสารทำงานเป็นอากาศ ที่มีความหนาแน่นคงที่ และการไหลเป็นแบบสภาวะคงตัว (Steady State) เงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณ คือ แบ่งเอลิเมนต์เป็นแบบปิรามิด (tetrahedral) ซึ่งในกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกจะประกอบไปด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบ ดังแสดงดังต่อไปนี้

3.2.1.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A โดยกำหนดให้เอลิเมนต์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย 413,214 จุดต่อ และ 81,591 เอลิเมนต์

3.2.1.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B โดยกำหนดให้ เอลิเมนต์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย 370,752 จุดต่อ และ 72,555 เอลิเมนต์

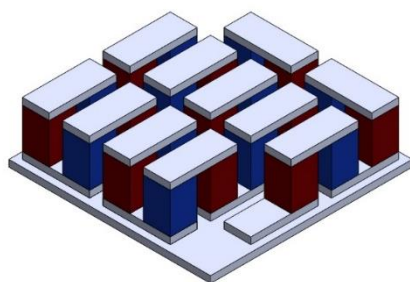
3.2.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C โดยกำหนดให้ เอลิเมนต์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย 1,022,629 จุดต่อ และ 202,269 เอลิเมนต์

3.1.2 สร้างแม่พิมพ์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบซึ่งประกอบไปด้วย 1) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบ A ขนาด  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  แบบโค้ง 2) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบ B ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  แบบเรียบ และ 3) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบ C ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  แบบโค้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1

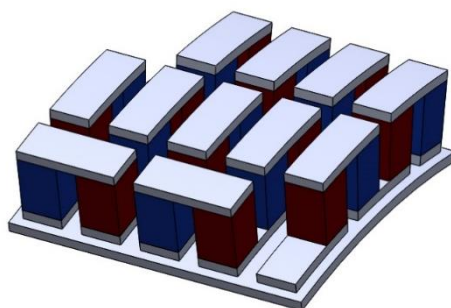


(ก) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบ A ขนาด  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  แบบโค้ง





(ข) เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ B ขนาด 30 x 30 mm<sup>2</sup> แบบเรียบ



(ค) เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ C ขนาด 30 x 30 mm<sup>2</sup> แบบโค้ง

ภาพประกอบ 3.9 ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแต่ละแบบ

### 3.3 การทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

#### 3.3.1 จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี ผลิตแผ่นเซรามิกฐานรอง

##### 3.3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์การเตรียมแผ่นเซรามิกฐานรอง

- 1) ดินผสมสำเร็จรูป Vitreous China Body (VCB)
- 2) Polyvinyl Alcohol (PVA)
- 3) ซ้อนตักสารสแตนเลส
- 4) โกร่งบดสาร
- 5) ถ้วยอะลูมินาและฝาปิด
- 6) เครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 7) ชุดบัวอัดสี่เหลี่ยมขนาด 63 mm<sup>2</sup>



ภาพประกอบ 3.10 แม่พิมพ์ของเทอร์โมอีเล็กทริกมอดูลแต่ละแบบ

- 8) เครื่องอัดไฮดรอลิกแบบแกนเดี่ยว
- 9) เตาเผาสารอุณหภูมิสูง 1,500 °C
- 10) เครื่องตัดละเอียด
- 11) เครื่องขัด

#### 3.3.1.2 วิธีการเตรียมเซรามิก

การเตรียมแผ่นเซรามิกหนา 0.5 – 1 mm โดยใช้เข้าอัดสี่เหลี่ยมเทอร์โมอีเล็กทริกมอดูลแบบ A ขนาด 50 x 50 mm<sup>2</sup> แบบโค้ง เทอร์โมอีเล็กทริกมอดูลแบบ B ขนาด 30 x 30 mm<sup>2</sup> แบบเรียบ และ เทอร์โมอีเล็กทริกมอดูลแบบ C ขนาด 30 x 30 mm<sup>2</sup>

- 1) ชั่งดินขาวผสมสำเร็จรูปกลุ่ม Vitreous China Body (VCB) ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง จำนวน 10 g บดด้วยมือละเอียด และเผาไล่สิ่งเจือปน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็น เวลา 5 ชั่วโมง

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 3.11 ดินขาวที่ผ่านการเผาไล่สิ่งเจือปน

- 2) นำดินขาวที่เผาไล่สิ่งเจือปน มาบดด้วยมือให้ละเอียดเป็นเวลา 30 นาที ผสม Polyvinyl Alcohol (PVA) ในอัตราส่วน 1 ml ต่อ 10 g บดให้เข้ากันเป็นเวลา 5 min
- 3) อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกแบบแกนเดี่ยวที่ความดัน  $150 \text{ Kg cm}^{-2}$  เป็นเวลา 2 min



ภาพประกอบ 3.12 ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

4) นำแผ่นดินขาว VCB ที่ได้จากการขึ้นรูปไปเผาผนึก ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็น เวลา 5 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 3.13 แผ่นดินขาว VCB ที่ได้จากการขึ้นรูปไปเผาผนึก อุณหภูมิ 950 °C เป็น เวลา 5 ชั่วโมง

5) นำแผ่นดินขาว VCB หลังการเผาผนึกครั้งที่ 1 มาขัดและตัดให้ได้ขนาดเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ A, B และ C

6) นำแผ่นดิน VCB หลังการขัดและตัดไปเผาผนึกครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1,300 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

7) นำแผ่นเซรามิกไปขัดให้ได้ขนาดเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ A, B และ C

### 3.3.1.3 ทดสอบการผลิตแผ่นเซรามิกฐานรองเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแต่ละแบบ



ภาพประกอบ 3.14 การผลิตแผ่นเซรามิกฐานรองเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ A ขนาด 50 x 50 mm<sup>2</sup>



ภาพประกอบ 3.15 การผลิตแผ่นเซรามิกฐานรองเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ C  
ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$



ภาพประกอบ 3.16 การผลิตแผ่นเซรามิกฐานรองเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ B ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$   
แบบเรียบ



3.3.1.4 จัดเตรียมอุปกรณ์และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น คือ n-type  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$   
ชนิดพี คือ p-type- $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$



ภาพประกอบ 3.17 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี คือ p-type- $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$



ภาพประกอบ 3.18 เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น คือ n-type  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$

พจนานุกรมศัพท์โตะชีว

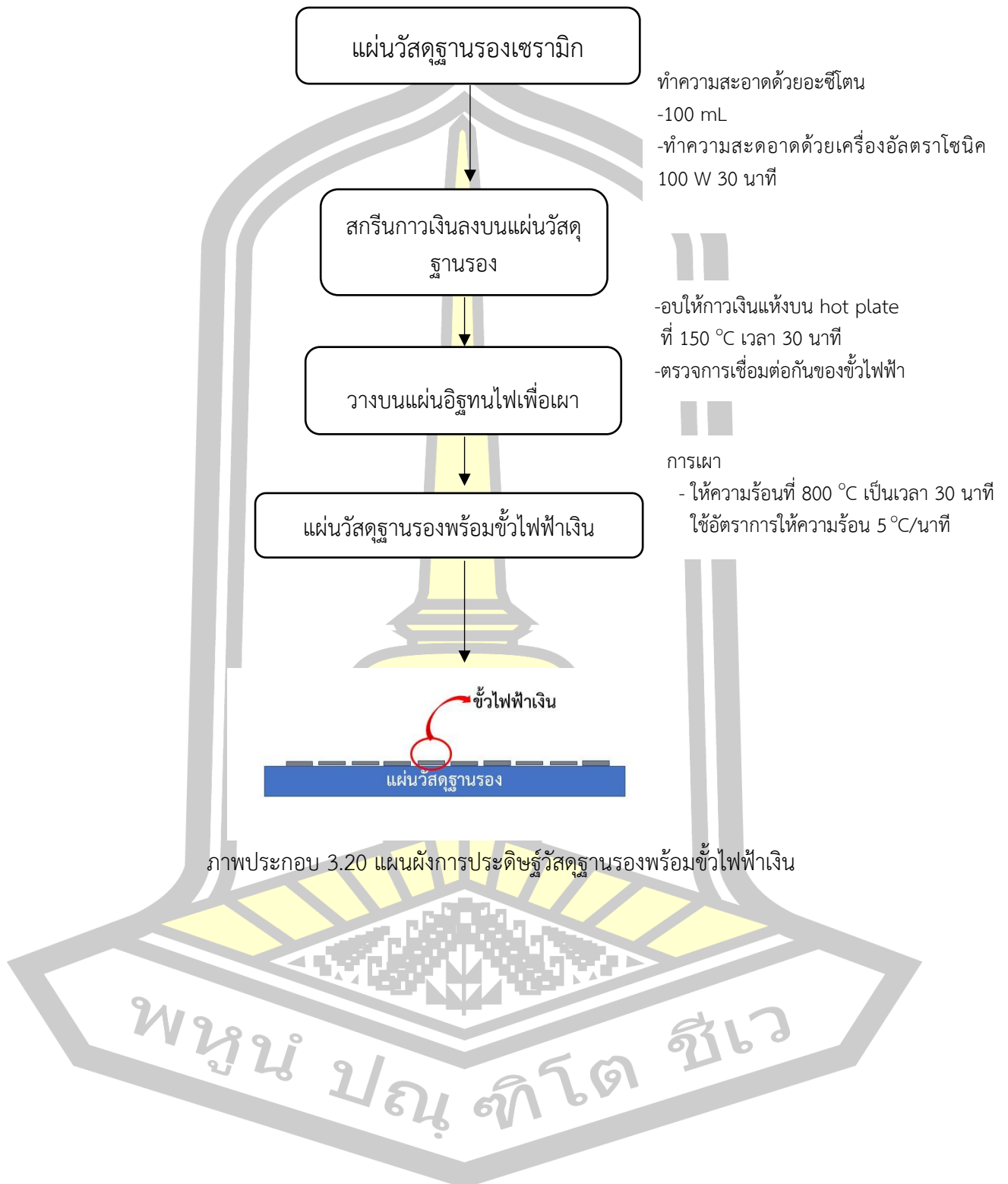
### 3.3.1.5 การประดิษฐ์วัสดุฐานรองพร้อมขั้วไฟฟ้าเงิน 3 แบบ



ภาพประกอบ 3.19 วัสดุฐานรองพร้อมขั้วไฟฟ้าเงิน

การประดิษฐ์วัสดุฐานรองพร้อมขั้วไฟฟ้า 3 แบบ คือ แบบโค้งขนาด  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  แบบโค้งขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  และแบบเรียบขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  โดยใช้วัสดุฐานรองจากดินขาวที่ขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ  $1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นใช้กาวเงินสำหรับเผาเชื่อมเป็นขั้วไฟฟ้าโดยใช้การสกรีนกาวเงินลงไปบนวัสดุฐานรอง จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที นำวัสดุฐานรองพร้อมขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการอบแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้กาวเงินติดลงไปบนแผ่นวัสดุฐานรองสำหรับประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแต่ละแบบ

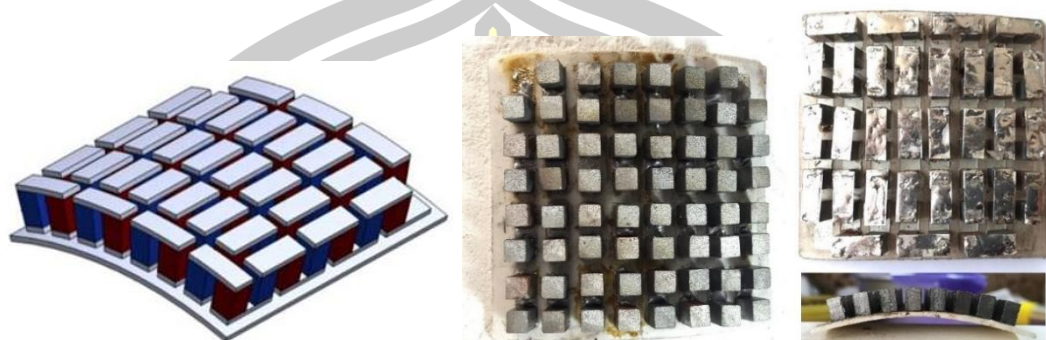
พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์





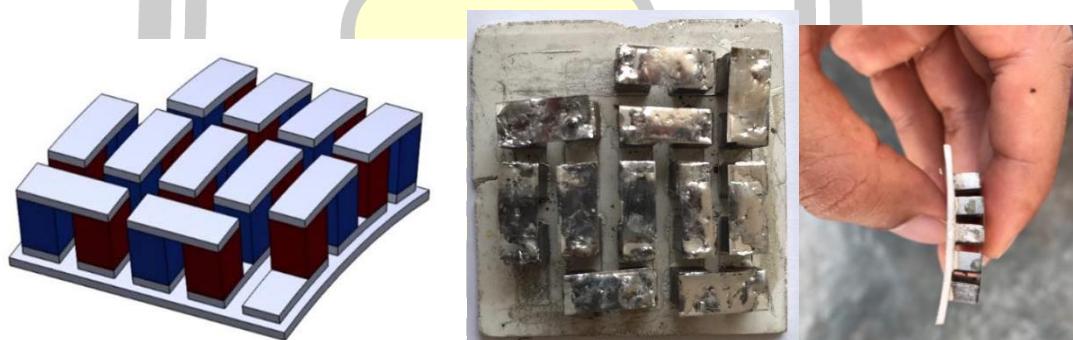
### 3.3.1.6 การประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล 3 แบบ

#### 3.3.1.6.1 มอดูลแบบโค้งขนาด $50 \times 50 \text{ mm}^2$



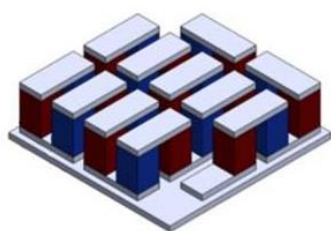
การประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบโค้งขนาด  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  ใช้ก้อนสารทั้งหมด 62 ก้อน สารชนิดพีและเอ็นอย่างละ 31 ก้อน ขนาดก้อนสาร  $4 \times 4 \times 6 \text{ mm}^3$  ต่อกันแบบอนุกรม โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเงินเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์และนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง เชื่อมด้วยตะกั่วเหลวหลอมด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

#### 3.3.1.6.2 มอดูลแบบโค้งขนาด $30 \times 30 \text{ mm}^2$



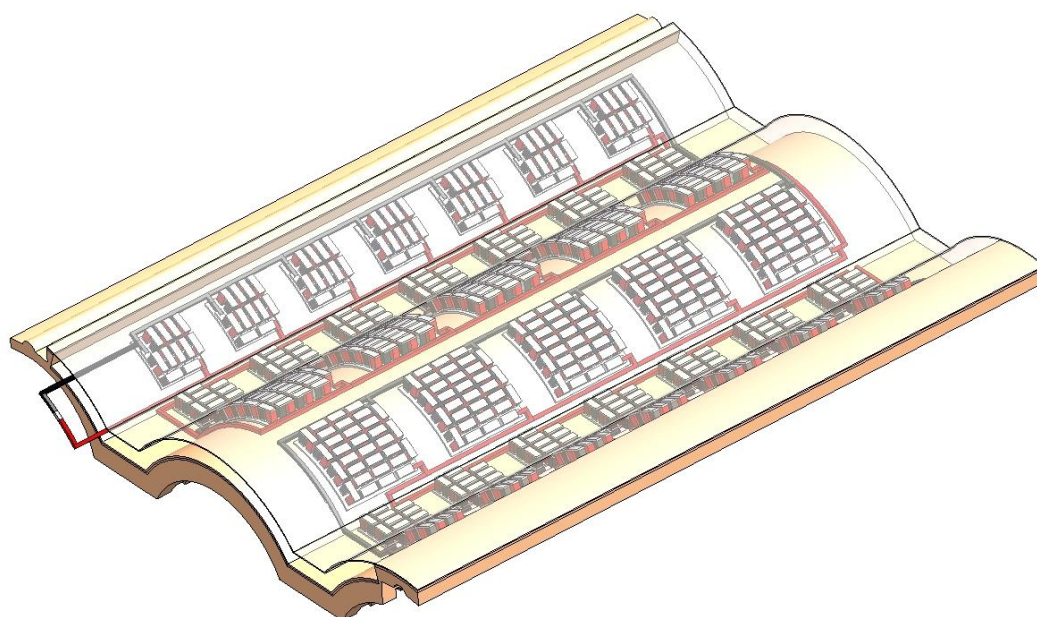
การประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบโค้งขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  ใช้ก้อนสารทั้งหมด 22 ก้อน สารชนิดพีและเอ็นอย่างละ 11 ก้อน ขนาดก้อนสาร  $4 \times 4 \times 6 \text{ mm}^3$  ต่อกันแบบอนุกรม โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเงินเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์และนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง เชื่อมด้วยตะกั่วเหลวหลอมด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

### 3.3.1.6.3 มอดูลแบบเรียบขนาด $30 \times 30 \text{ mm}^2$



การประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบเรียบขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  ใช้ก้อนสารทั้งหมด 22 ก้อน สารชนิดพีและเอ็นอย่างละ 11 ก้อน ขนาดก้อนสาร  $4 \times 4 \times 6 \text{ mm}^3$  ต่อกันแบบอนุกรม โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเงินเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์และนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง เชื่อมด้วยตะกั่วเหลวหลอมด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

3.3.1.7 สร้างแม่พิมพ์ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 535-2537 ดังแสดงในภาพประกอบ 3.13

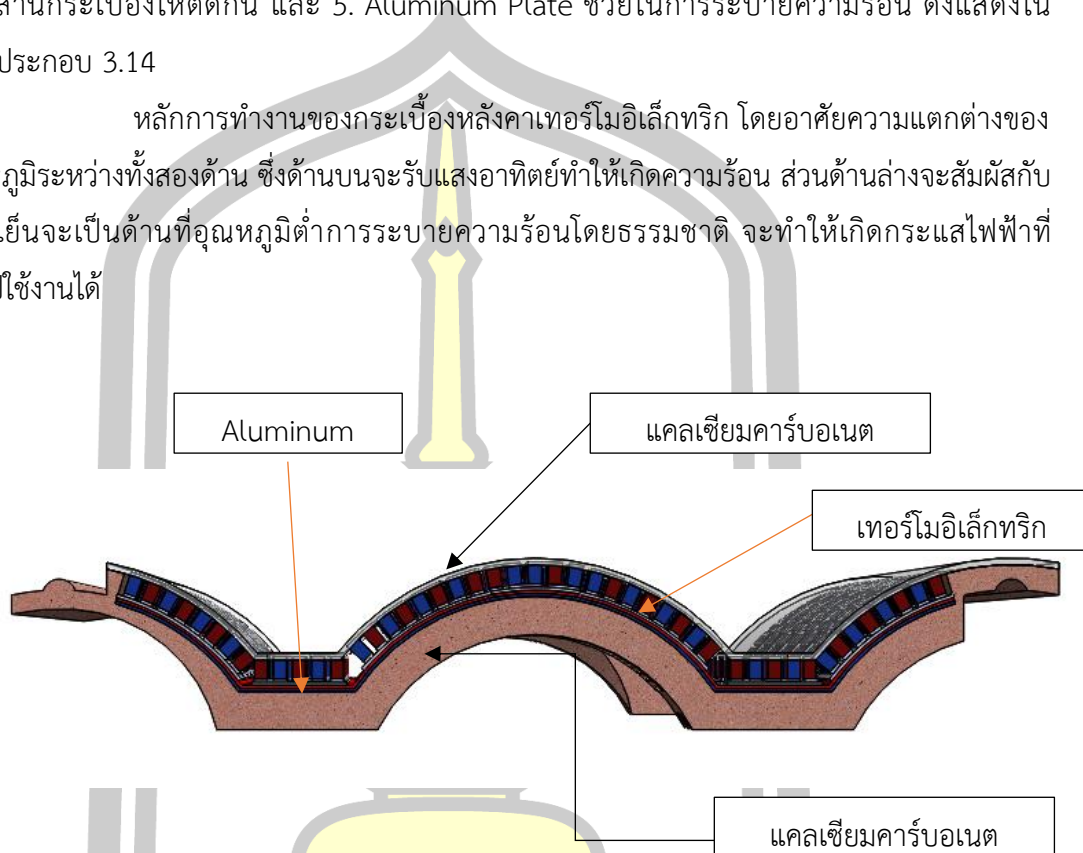


ภาพประกอบ 3.21 แบบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

3.3.1.8 สร้างกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ 1. เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ A ขนาด  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  แบบโค้ง 2. เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ B ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  แบบเรียบ 3. เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ C ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  แบบโค้ง ซึ่งจะนำมา

เรียงไว้ตรงกลางของกระเบื้อง ส่วน 4. แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จะทำหน้าที่เป็นฉนวนและประสานกระเบื้องให้ติดกัน และ 5. Aluminum Plate ช่วยในการระบายความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 3.14

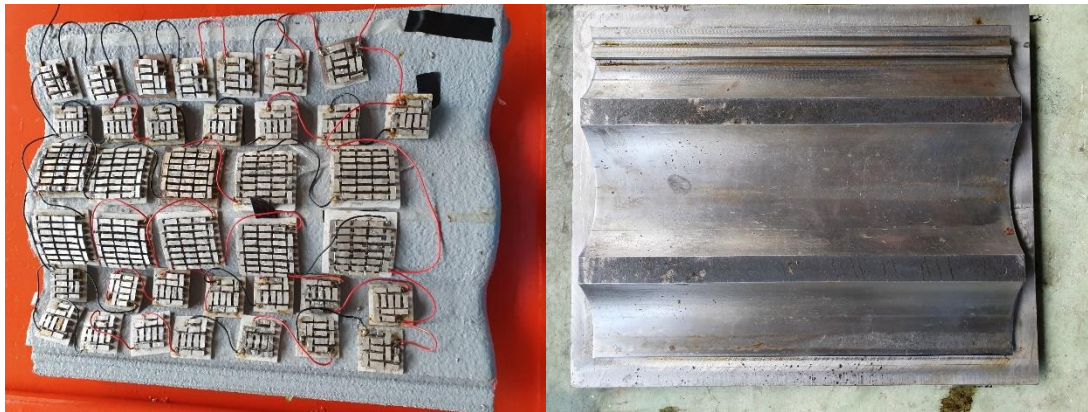
หลักการทำงานของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างทั้งสองด้าน ซึ่งด้านบนจะรับแสงอาทิตย์ทำให้เกิดความร้อน ส่วนด้านล่างจะสัมผัสกับด้านเย็นจะเป็นด้านที่อุณหภูมิต่ำการระบายความร้อนโดยธรรมชาติ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่นำไปใช้งานได้



ภาพประกอบ 3.22 ส่วนประกอบของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

### 3.3.1.8.1 ขั้นตอนการประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

1) ขั้นตอนการเตรียมประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก โดยการนำแม่พิมพ์กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกทำความสะอาด และชโลมน้ำมันเพื่อป้องกันการติดแม่พิมพ์ (ก1) การเรียงเทอร์โมอิเล็กทริก ที่จะนำมาประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก (ก2) ด้านล่างของแม่พิมพ์กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก (ก3) ด้านบนของแม่พิมพ์กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก (ก4) ทำความสะอาด และชโลมน้ำมันแม่พิมพ์ กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกดังแสดงในภาพประกอบ 3.15



(ก1)

(ก2)



(ก3)

(ก4)

ภาพประกอบ 3.23 การเตรียมประกอบกระเบื้องสูงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก



(ข1)

(ข2)



(ข3)

(ข4)

ภาพประกอบ 3.24 การประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

2) ขั้นตอนการประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ชุดทดลองของแต่ละส่วน คือ เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล กับแผ่นอลูมิเนียม ชั้นบนและชั้นล่างประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (ข1) ชั้นบนเทแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ให้มีความหนาประมาณ 3 mm (ข2) นำเทอร์โมอิเล็กทริกวางลงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เทไว้ จำนวน 38 มอดูล ซึ่งมีเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ A ขนาด  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  แบบโค้ง จำนวน 10 มอดูล เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ B ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  แบบเรียบ จำนวน 14 มอดูล และเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบ C ขนาด  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  แบบโค้ง จำนวน 14 มอดูล ต่อเชื่อมวงจรแบบอนุกรม (ข3) ช่องว่างในการวางเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลประมาณ 4 เซนติเมตร (ข4) วางแผ่นอลูมิเนียม เพื่อช่วยในการระบายความร้อน (ค1) ชั้นล่างแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ให้มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร (ค2) การวางแม่พิมพ์ด้านบนของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก (ค3) ใช้ค้อนทุบด้านบนของแม่พิมพ์กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อให้ล่ออากาศของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก (ค4) กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำการถอดออกจากโถงหลังจากทำการบ่มไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงให้ดังแสดงในภาพประกอบ 3.16-3.17



(ค1)

(ค2)



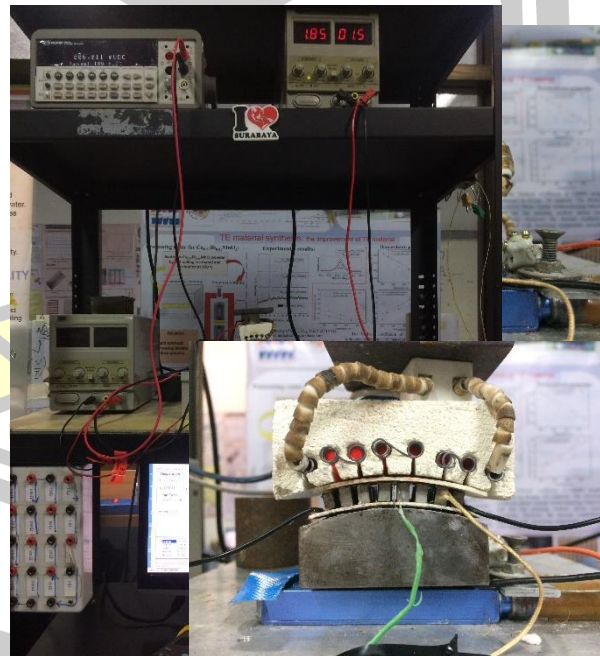
(ค3)

(ค4)

ภาพประกอบ 3.25 กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

### 3.4 การทดลองประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

#### 3.4.1 การทดสอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในระดับห้องปฏิบัติการและภาคสนาม



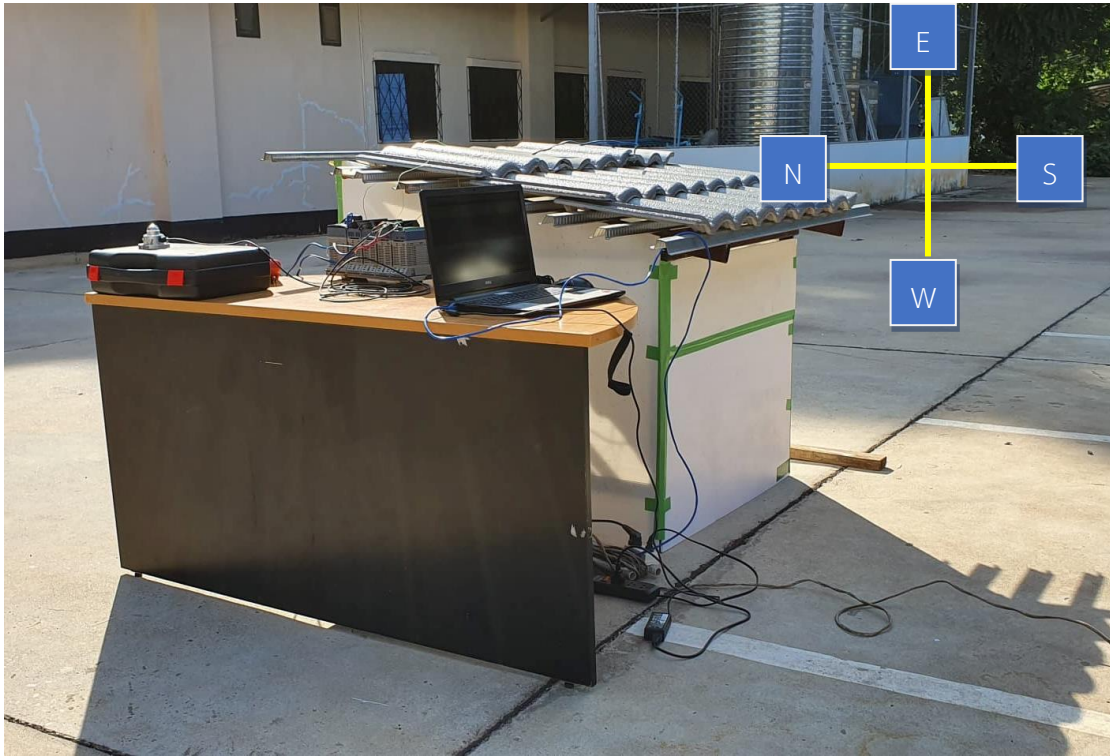
ภาพประกอบ 3.26 การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล



ภาพประกอบ 3.27 การทดสอบประสิทธิภาพของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 3.28 ส่วนประกอบในการทดลองภาคสนามของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

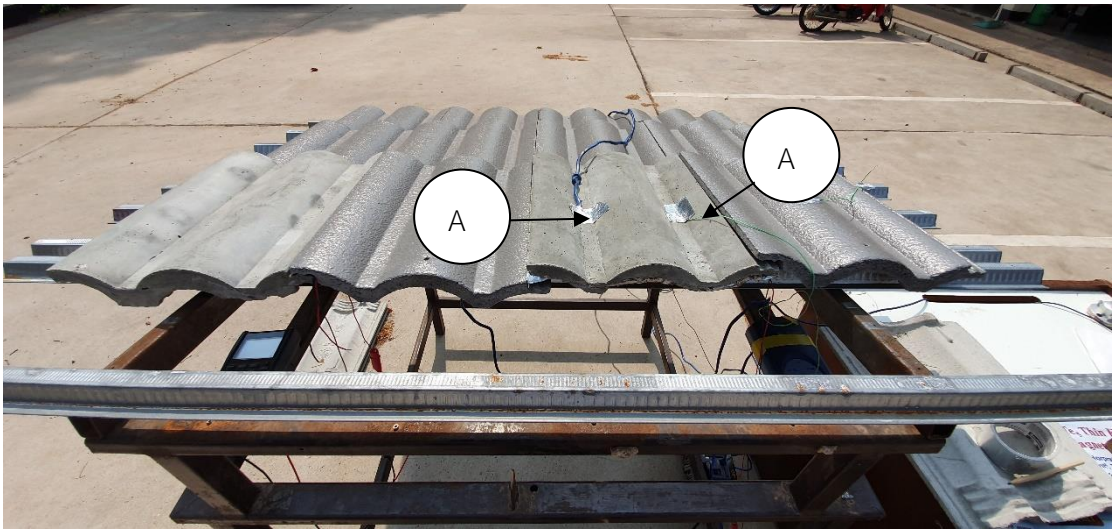


ภาพประกอบ 3.29 ด้านหน้าการทดลองภาคสนามของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

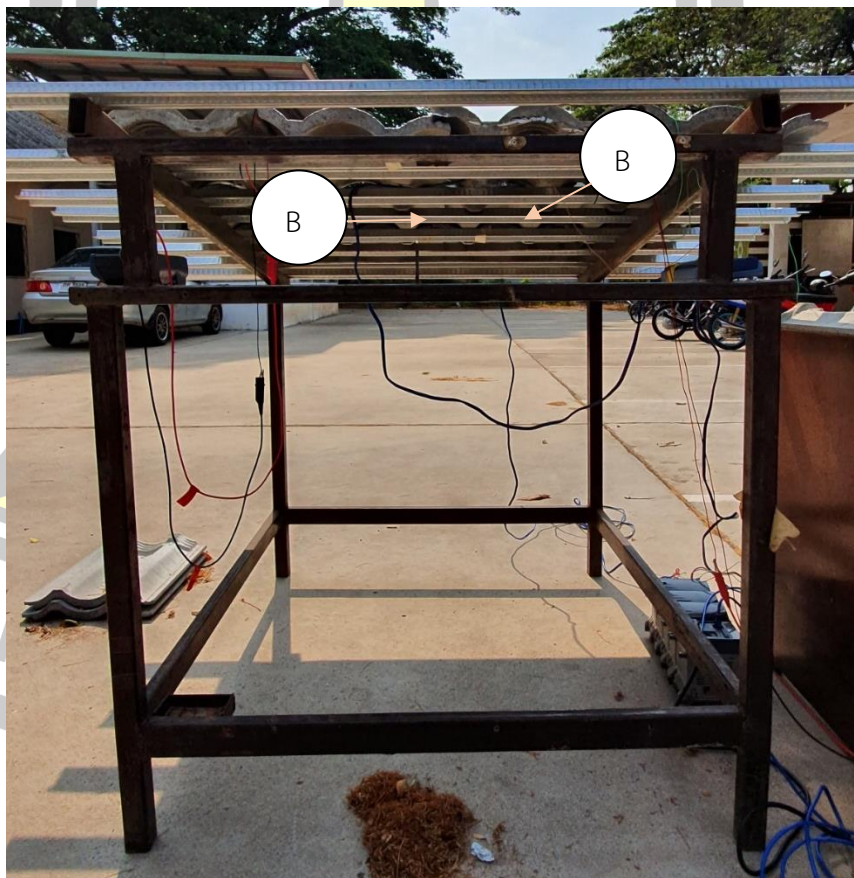


ภาพประกอบ 3.30 ด้านหลังการทดลองภาคสนามของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก





ภาพประกอบ 3.31 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิผิวของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกด้านบน



ภาพประกอบ 3.32 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิผิวของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกด้านล่าง

### 3.1.11 การเก็บและบันทึกผลการทดสอบ

การบันทึกผลใช้การแสดงผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป แล้วนำมาแสดงกราฟด้วยโปรแกรม Origin Pro 2016 นอกจากนี้ยังใช้การจดบันทึกขณะที่ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และถ่ายภาพประกอบขณะตรวจวัดการทดลอง การตรวจวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าและมีการวัดผลแยก รายละเอียดดังนี้

- 1) วัดอุณหภูมิด้านบนหลังคา เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศใต้หลังคา ทุก ๆ 1 นาที ระหว่างวันที่ 18 มีนาคม ถึง 11 มิถุนายน 2562
- 2) ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พิจารณา ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. ระหว่างวันที่ 18 มีนาคม ถึง 11 มิถุนายน 2562 ในการการสุ่มตรวจวัดในช่วงเวลาที่แสงแดดจ้าซึ่งในบางครั้งสภาพอากาศก็ไม่เอื้อต่อการวัดผลอาจมีเมฆ บดบังแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังตรวจเช็คสภาพอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาก่อนล่วงหน้า และขณะวันทดลอง เนื่องจากช่วงวัน เวลาที่ทดสอบเป็นช่วงฤดูฝน ซึ่งมีผลต่อการทดสอบด้านรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิ

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การหาค่าแรงดันไฟฟ้าของ Thermoelectric Generator หาได้จากสมการ

$$E = (S_p - S_n) (T_h - T_c) \quad (3.1)$$

การหาค่ากระแสไฟฟ้าของ Thermoelectric Generator หาได้จากสมการ

$$I = (S_p - S_n)(T_h - T_c) / R_p + R_n + R_L \quad (3.2)$$

การหาค่าพลังงานไฟฟ้า หาได้จากสมการ

$$P = I^2 R_L = ((S_p - S_n)(T_h - T_c) / R_p + R_n + R_L)^2 R_L \quad (3.3)$$

การหาค่า Seebeck Coefficient หาได้จากสมการ

$$S = V_{out} / (T_h - T_c) \quad (3.4)$$

เมื่อ  $V_{out}$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีผลต่างอุณหภูมิ

$\Delta T$  คือ ผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ หรือมอดูล

การทำนายสมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ หรือมอดูล ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมการหลักในการอธิบายเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นจะประกอบไปด้วยการไหลของความร้อนและความต่อเนื่องของประจุไฟฟ้า ซึ่งแสดงในสมการ (3.5) และ (3.6)

$$\rho_a C \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} = \dot{q} \quad (3.5)$$

โดย  $\rho_d$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $\vec{q}$  คือ ค่าเวกเตอร์ของฟลักซ์ความร้อน ( $\text{W m}^{-2}$ ) และ  $\dot{q}$  คือ อัตราการเกิดความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ( $\text{W m}^{-3}$ )

$$\vec{\nabla} \cdot \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.6)$$

โดย  $\vec{D}$  คือ เวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า ( $\text{C m}^{-2}$ ) และ  $\vec{J}$  คือ เวกเตอร์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{A m}^{-2}$ ) สมการเชิงอนุพันธ์ของเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงในสมการ (3.7)

$$\vec{q} = [\Pi] \cdot \vec{J} - [\lambda] \cdot \vec{\nabla} T \quad (3.7)$$

โดย  $\Pi$  คือ เมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ ( $\text{V}$ ) และ  $\lambda$  คือ เมทริกซ์การนำความร้อน ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเกิดจากปรากฏการณ์ซีเบกและปรากฏการณ์ของจูล ดังแสดงในสมการ 3.8)

$$\vec{J} = [\sigma] \cdot \vec{E} - [\sigma] \cdot [\alpha] \cdot \vec{\nabla} T \quad (3.8)$$

โดย  $\sigma$  คือ เมทริกซ์การนำไฟฟ้า ( $\text{S m}^{-1}$ ) และ  $\alpha$  สัมประสิทธิ์ซีเบก ( $\text{V K}^{-1}$ ) สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับค่า dielectric medium คือ  $\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$  โดย  $\epsilon$  คือ เมทริกซ์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก การลดสนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลา สนามไฟฟ้าจะแสดงได้ดังสมการ  $\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi$  โดย  $\phi$  คือ สเกลาร์ศักย์ไฟฟ้า สมการเชิงอนุพันธ์ของเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกแทนที่ด้วยสมการ [3.9] และ [3.10]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot ([\Pi] \cdot \vec{J}) - \vec{\nabla} \cdot ([\lambda] \cdot \vec{\nabla} T) = \dot{q} \quad (3.9)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left( [\epsilon] \cdot \vec{\nabla} \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \vec{\nabla} \cdot ([\sigma] \cdot [\alpha] \cdot \vec{\nabla} T) + \vec{\nabla} \cdot ([\sigma] \cdot \vec{\nabla} \phi) = 0 \quad (3.10)$$

ในส่วนขั้นตอนของ วิธีการเกอริง (Galerkin method) ได้เปลี่ยนสมการเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นระบบของสมการเทอร์โมอิเล็กทริกองค์ประกอบ [31,32] อุณหภูมิ และสเกลาร์ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเกินค่าประมาณของไฟไนต์ลิเมนต์  $T = \vec{N} \cdot \vec{T}_e$  และ  $\phi = \vec{N} \cdot \vec{\phi}_e$  โดย  $\vec{T}_e$  คือ เวกเตอร์ที่อุณหภูมิจุด

ต่อ  $\vec{\varphi}_e$  คือ เวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่อ และ  $\vec{N}$  คือ เวกเตอร์ฟังก์ชันรูปร่างของไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลลัพธ์ของระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถเขียนในรูปสมการที่ (3.11)

$$\begin{bmatrix} C^{TT} & 0 \\ 0 & C^{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{T}_e \\ \vec{\varphi}_e \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K^{TT} & 0 \\ K^{\varphi T} & K^{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{T}_e \\ \vec{\varphi}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{Q} + \vec{Q}^P + \vec{Q}^e \\ I \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

ตาราง 2.1 ตัวแปรพื้นฐานในการทำนายของระบบเทอร์โมอิเล็กทริก

Parameters	temperature (K)	P-type Bi <sub>0.58</sub> Te <sub>1.42</sub>	N-type Sb <sub>0.405</sub> Te <sub>0.595</sub>	Connector	CaCO <sub>3</sub>	Solder
Resistivity ( $\Omega$ m)	-	-	-	1.7x10 <sup>-6</sup>	-	1.23x10 <sup>-10</sup>
Thermal conductivity (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	325	0.9	0.98	40	2.25	55
	375	0.83	0.93			
	425	0.85	0.93			
	475	1.15	1.08			
Semiconductor leg length/width/height (mm)	-	4/4/6	4/4/6	-	-	-
Plate thickness (mm)	-	-	-	0.2	1	-

พหุ ประถมศึกษา

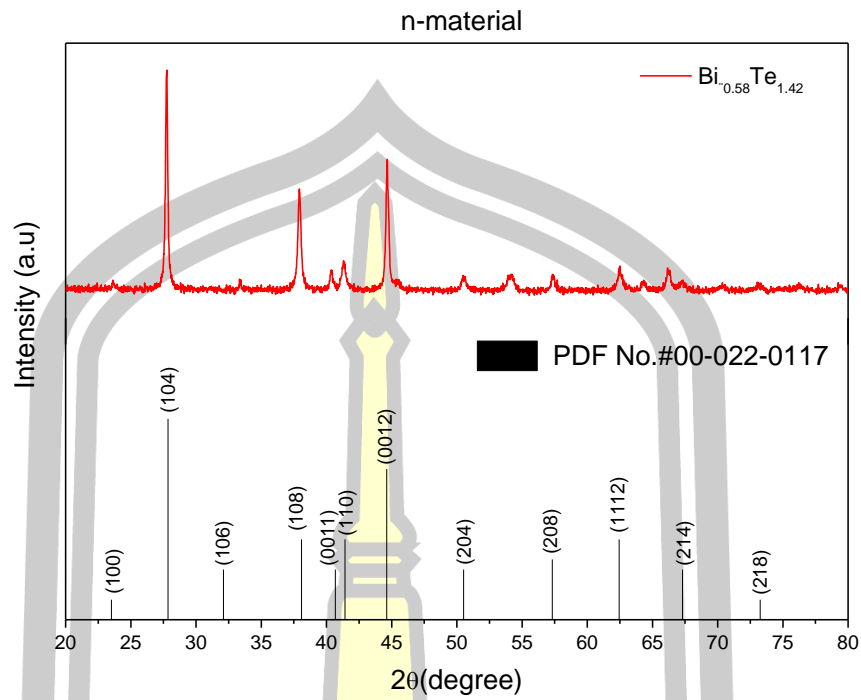
### ผลการวิจัยและการอภิปราย

งานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาและทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

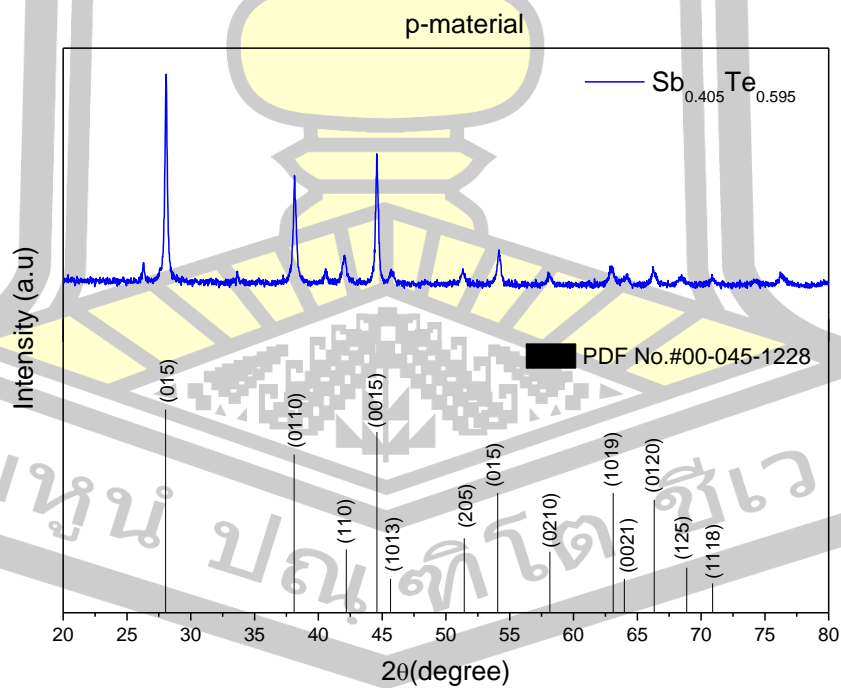
- 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 4.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก
- 4.3 การทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก
- 4.4 การทดลองประสิทธิภาพของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

#### 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อที่จะนำมาประดิษฐ์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) จากภาพประกอบ 4.1 พบว่า เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้เป็นเฟสของสารประกอบ  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  โดยไม่แสดงให้เห็นถึงเฟสเจือปนซึ่งมีโครงสร้างตรงกับ PDF อ้างอิงหมายเลข 00-022-0117 และจากภาพประกอบ 4.2 พบว่า เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ได้เป็นเฟสของสารประกอบ  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  โดยไม่แสดงให้เห็นถึงเฟสเจือปนซึ่งมีโครงสร้างตรงกับ PDF อ้างอิงหมายเลข 00-045-1228 ก็หมายความว่าสารที่เตรียมได้มีความเป็นเฟสเดี่ยวสูงมากจึงสามารถนำสารที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเพื่อศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกวัสดุ



ภาพประกอบ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุ  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  โดยเทียบกับ PDF อ้างอิง หมายเลข 00-022-0117



ภาพประกอบ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุ  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  โดยเทียบกับ PDF อ้างอิงหมายเลข 00-045-1228

ตาราง 4.1 ค่าการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดย Seebeck Coefficient/ Electrical Resistance Measurement System, ZEM-3 series

Sample	อุณหภูมิ	ค่าสภาพนำไฟฟ้า	ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก	ค่าตัวประกอบกำลัง
	K	( $\times 10^{-5} \Omega \text{ m}$ )	( $\times 10^{-4} \text{ V K}^{-1}$ )	( $\times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ )
$\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$	313.16	1.29	-2.5	4.83
	333.3	1.39	-2.44	4.3
	378	1.58	-2.38	3.56
$\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$	313.16	1.67	2.55	3.88
	333.3	1.86	2.49	3.35
	378	2.3	2.36	2.41

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกโดย Seebeck Coefficient/ Electrical Resistance Measurement System, ZEM-3 series ถูกวัดตั้งแต่ อุณหภูมิ 313.16 K ถึง 378 K จากตาราง 4.1 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการนำไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะดีขึ้น อาจเนื่องจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแสดงพฤติกรรมเป็นจากกึ่งตัวนำเป็นกึ่งโลหะ ส่งผลให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น [37] จากตารางที่ 4.1 จะพบว่า  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  อบที่ 378 K มีค่าสภาพนำไฟฟ้าดีที่สุด เท่ากับ  $2.30 \times 10^{-5} \Omega \text{ m}$  วัดที่อุณหภูมิห้อง

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกทำการวัดตั้งแต่อุณหภูมิ 313.16 K ถึง 378 K พบว่า  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  ทุกช่วงอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกแสดงค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงพฤติกรรมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี [38] และ  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  ทุกช่วงอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกแสดงค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงพฤติกรรมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น [38] โดยมีพาหะอิสระส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกจะแปรผกผันกับปริมาณความหนาแน่นของพาหะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะที่มากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกลดลง ในงานวิจัยนี้ พบว่า ที่อุณหภูมิ 313.16 K N-type  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกสูงสุด คือ  $-2.55 \times 10^{-4} \text{ V K}^{-1}$

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ของสารกึ่งตัวนำอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยค่าตัวประกอบกำลังนี้คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก (S) และค่าสภาพการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) พบว่า N-type  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  ที่อุณหภูมิ 313.16 K จะมีตัวประกอบกำลังสูงสุด คือ  $4.83 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกับ [38] ซึ่งจากงานวิจัยที่ศึกษาได้ค่าสูงกว่า โดยค่าตัวประกอบกำลัง (PF) เท่ากับ  $4.1 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$

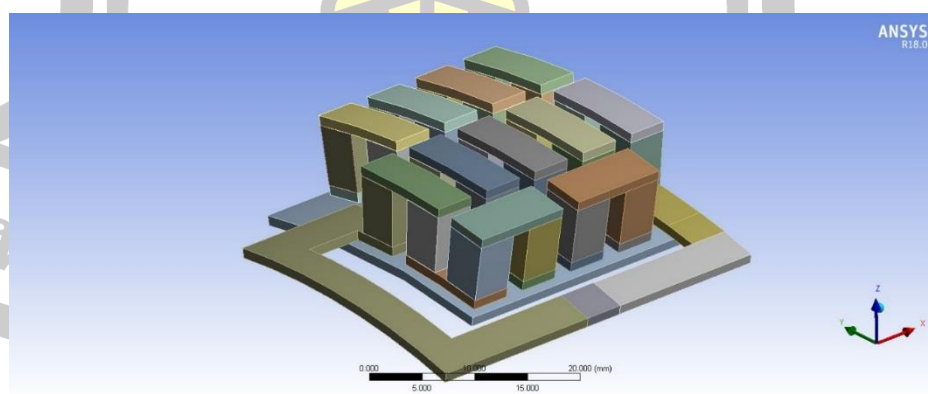
## 4.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

ผลการศึกษาการจำลองเพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Solidwork 2019 และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 18.0 โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ผลจำลองที่สร้างขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 4.3-4.17 โดยกำหนดสารทำงานเป็นอากาศ ที่มีความหนาแน่นคงที่ และการไหลเป็นแบบสภาวะคงตัว (Steady State) เงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณ คือ แบ่งเอลิเมนต์เป็นแบบพีรามิต (tetrahedral) ซึ่งในกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกจะประกอบไปด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบ ดังแสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A โดยกำหนดให้เอลิเมนต์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย 413,214 จุดต่อ 81,591 เอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.3

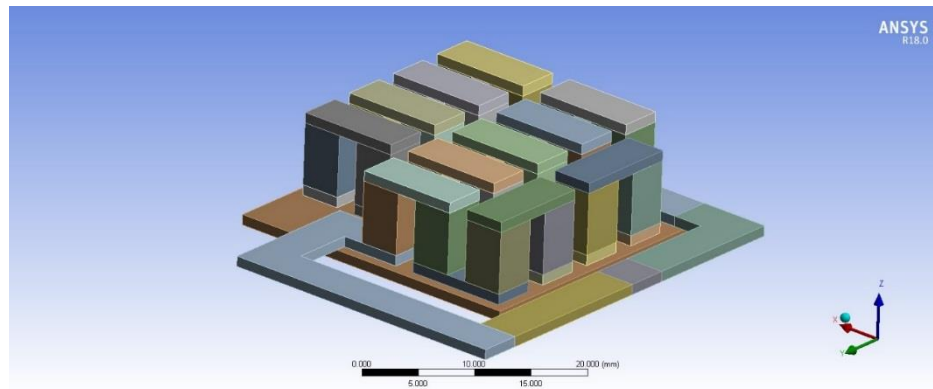
4.2.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B โดยกำหนดให้เอลิเมนต์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย 370,752 จุดต่อ 72,555 เอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.4

4.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C โดยกำหนดให้เอลิเมนต์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย 1,022,629 จุดต่อ 202,269 เอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.5

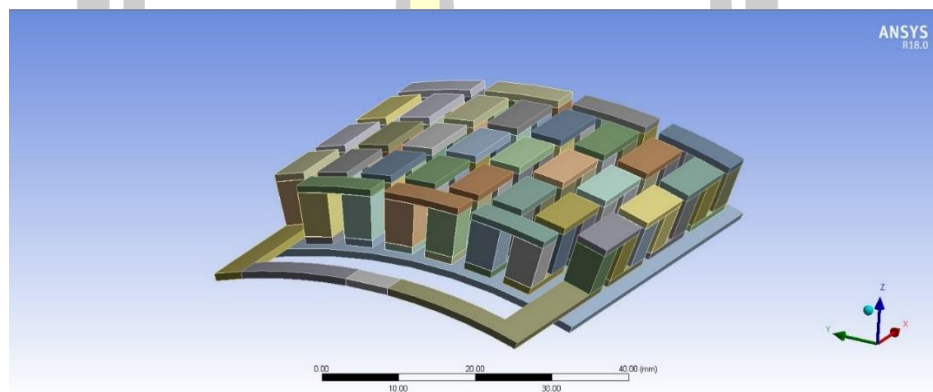


ภาพประกอบ 4.3 แบบสามมิติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A



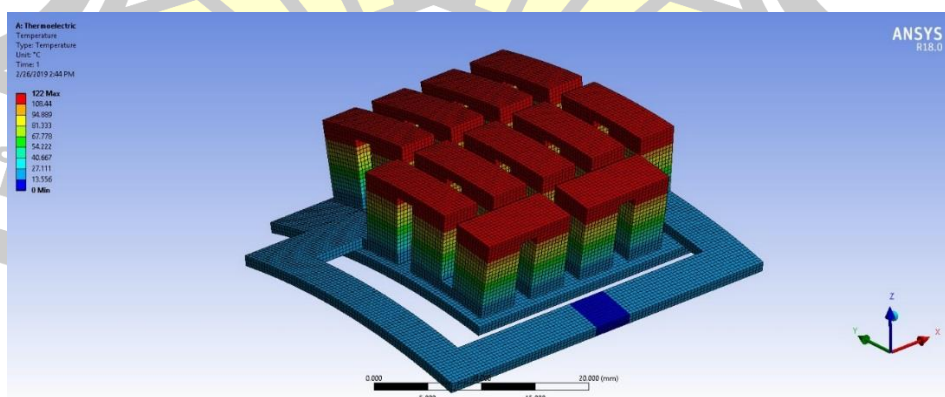


ภาพประกอบ 4.4 แบบสามมิติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B

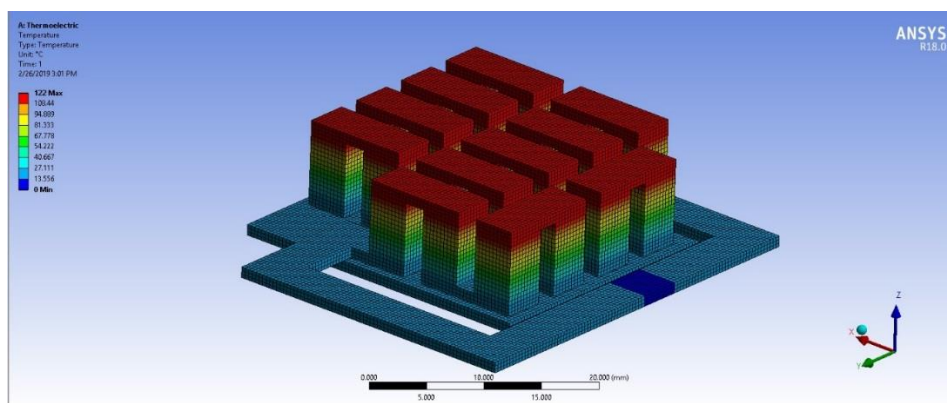


ภาพประกอบ 4.5 แบบสามมิติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C

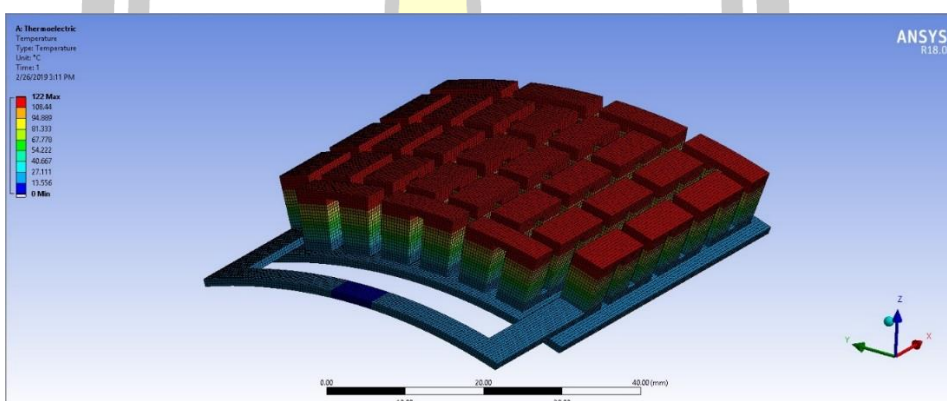
จากภาพประกอบ 4.6-4.8 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ บริเวณด้านบนจะมีอุณหภูมิสูงสุด คือ  $122^{\circ}\text{C}$  และส่วนด้านล่างอุณหภูมิจะต่ำเนื่องจากกำหนดให้เป็นด้านเย็นเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $22^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 4.6 การกระจายของอุณหภูมิพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A



ภาพประกอบ 4.7 การกระจายของอุณหภูมิพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B



ภาพประกอบ 4.8 การกระจายของอุณหภูมิพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C

จากภาพประกอบ 4.9 ลักษณะการกระจายของความต่างศักย์ไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A ซึ่งบริเวณปลายทางออกของแรงดันจะมีค่าสูงที่สุด คือ 431.21 mV และส่วนเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าจะต่ำสุด คือ -0.642 mV

จากภาพประกอบ 4.10 ลักษณะการกระจายของความต่างศักย์ไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B ซึ่งบริเวณปลายทางออกของแรงดันจะมีค่าสูงที่สุด คือ 428.29 mV และส่วนเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าจะต่ำสุด คือ -1.80 mV

จากภาพประกอบ 4.11 ลักษณะการกระจายของความต่างศักย์ไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C ซึ่งบริเวณปลายทางออกของแรงดันจะมีค่าสูงที่สุด คือ 1172.9 mV และส่วนเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าจะต่ำสุด คือ -1.90 mV

ทั้ง 3 แบบ ได้ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างจากงานของ Ugur Erturun [39] ซึ่งมีค่ามากกว่า เนื่องจากจำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น และชนิดพี มีจำนวนมากกว่า อีกทั้งการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าของ Ugur Erturun [39]

จากภาพประกอบ 4.12 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A บริเวณที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่จุดต่อของขั้วด้านล่างและด้านบนเท่ากับ  $0.103 \text{ W mm}^{-2}$  และส่วนที่มีค่าต่ำสุดจะอยู่ช่องว่างที่ไม่เกิดการซ้อนทับเท่ากับ  $2.87 \text{ pW mm}^{-2}$

จากภาพประกอบ 4.13 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B บริเวณที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่จุดต่อของขั้วด้านล่างและด้านบนเท่ากับ  $0.098 \text{ W mm}^{-2}$  และส่วนที่มีค่าต่ำสุดจะอยู่ช่องว่างที่ไม่เกิดการซ้อนทับเท่ากับ  $6.45 \text{ pW mm}^{-2}$

จากภาพประกอบ 4.14 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C บริเวณที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่จุดต่อของขั้วด้านล่างและด้านบนเท่ากับ  $0.093 \text{ W mm}^{-2}$  และส่วนที่มีค่าต่ำสุดจะอยู่ช่องว่างที่ไม่เกิดการซ้อนทับเท่ากับ  $1.03 \text{ nW mm}^{-2}$

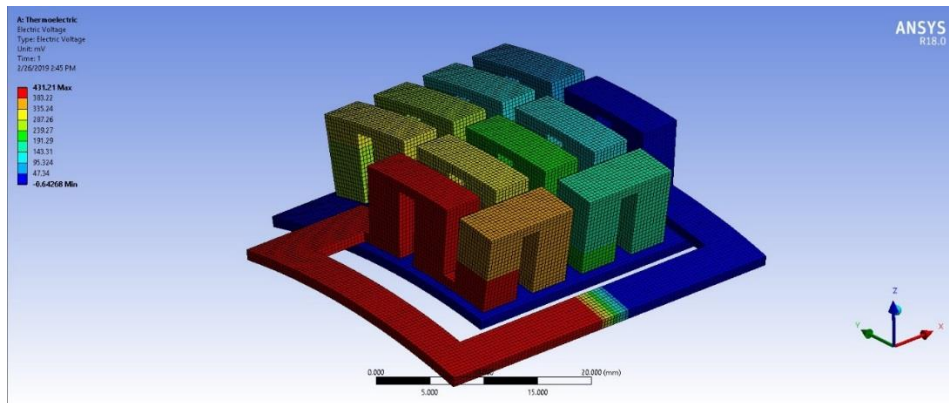
ทั้ง 3 แบบ ได้ปริมาณฟลักซ์ความร้อนแตกต่างจากงานของ Ugur Erturun [39] ซึ่งมาค่ามากกว่า เนื่องจากจำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น และชนิดพี มีจำนวนมากกว่า อีกทั้งการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าของ Ugur Erturun [39]

จากภาพประกอบ 4.15 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A บริเวณที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่จุดต่อของขั้วด้านล่างเท่ากับ  $0.042 \text{ W mm}^{-2}$  และส่วนที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $-0.042 \text{ W mm}^{-2}$

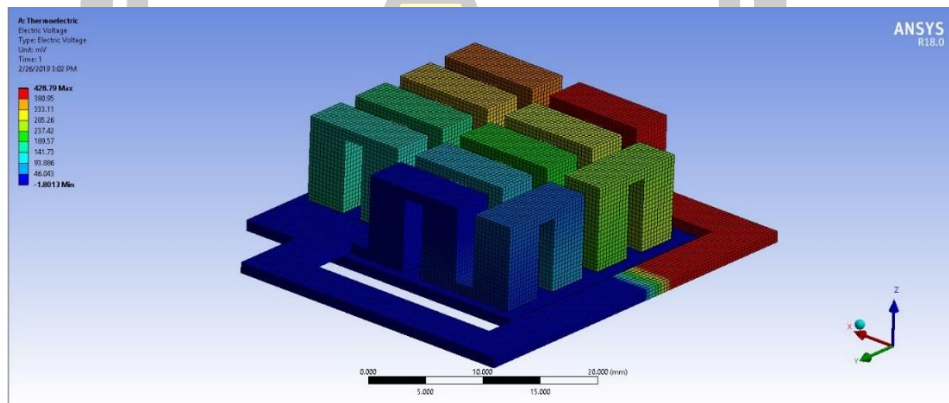
จากภาพประกอบ 4.16 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B บริเวณที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่จุดต่อของขั้วด้านล่างเท่ากับ  $0.037 \text{ W mm}^{-2}$  และส่วนที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $-0.037 \text{ W mm}^{-2}$

จากภาพประกอบ 4.17 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C บริเวณที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่จุดต่อของขั้วด้านล่างเท่ากับ  $0.033 \text{ W mm}^{-2}$  และส่วนที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $-0.035 \text{ W mm}^{-2}$

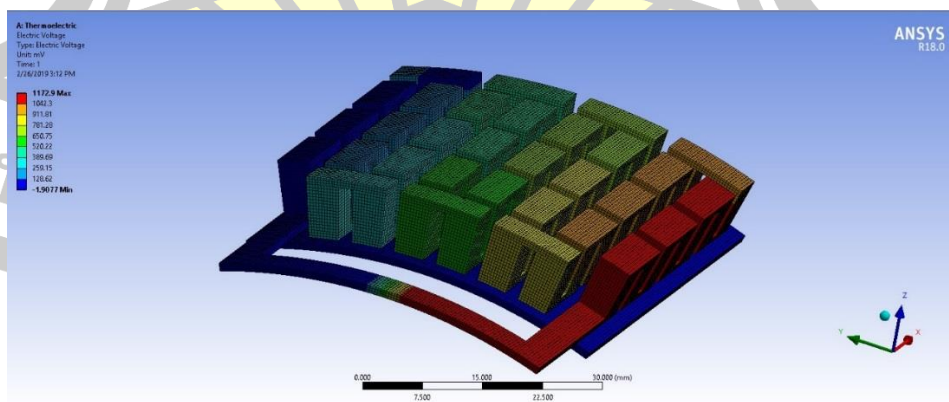
ทั้ง 3 แบบ ได้การกระจายฟลักซ์ความร้อนแตกต่างจากงานของ Ugur Erturun [39] ซึ่งมีค่ามากกว่า เนื่องจากมีพื้นผิวด้านร้อนและด้านเย็น มีจำนวนมากกว่า



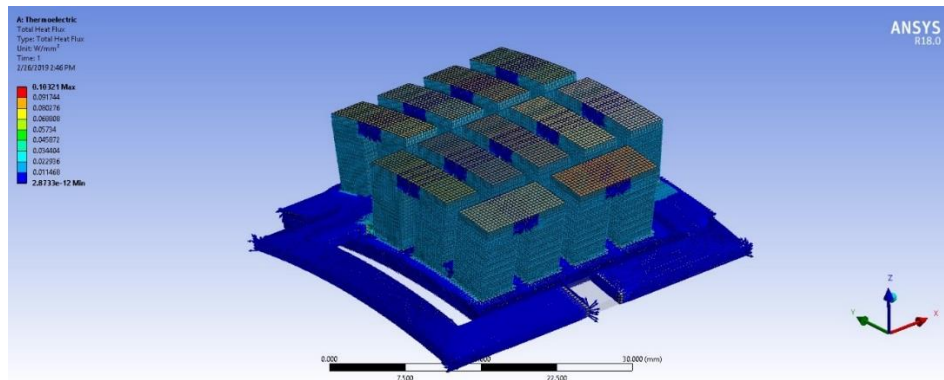
ภาพประกอบ 4.9 การไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A



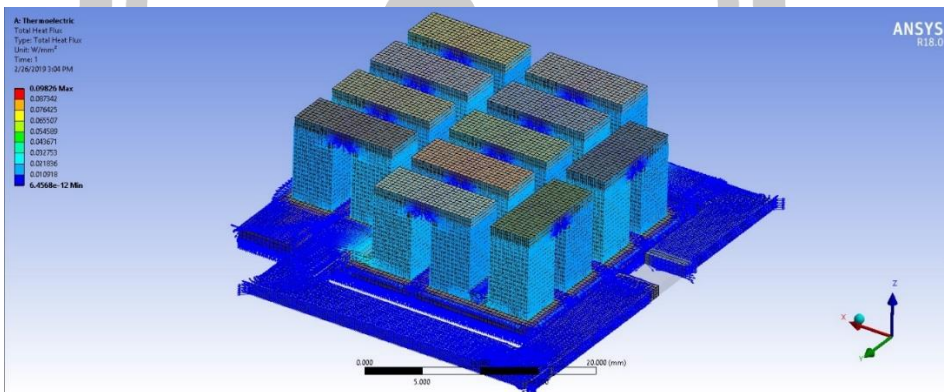
ภาพประกอบ 4.10 การไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B



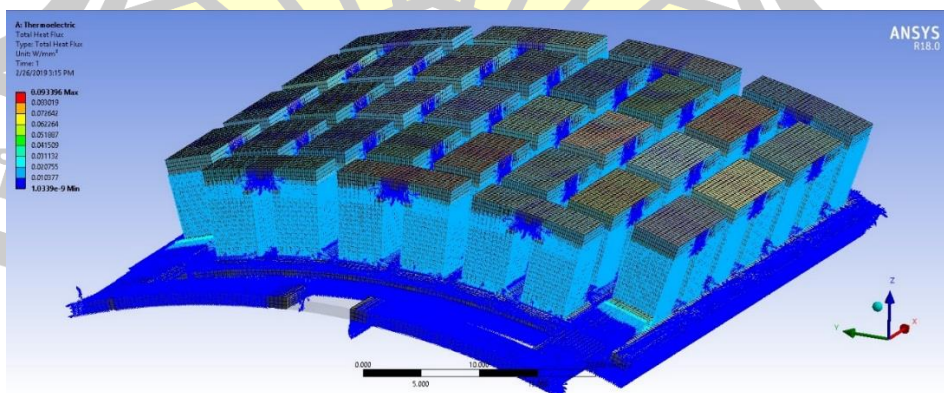
ภาพประกอบ 4.11 การไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C



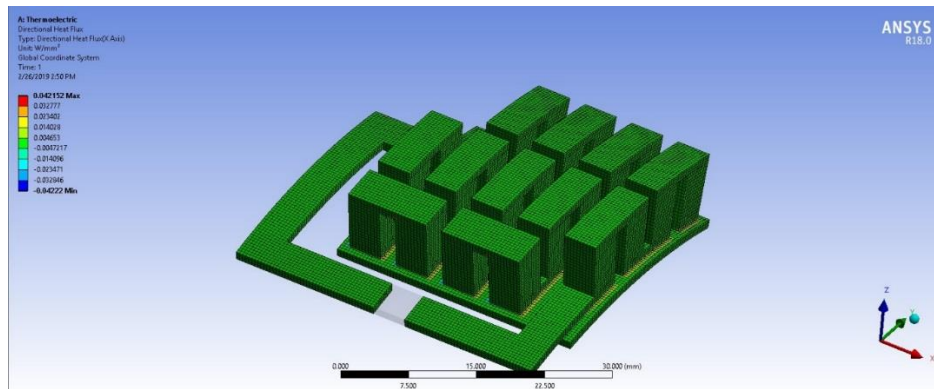
ภาพประกอบ 4.12 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A



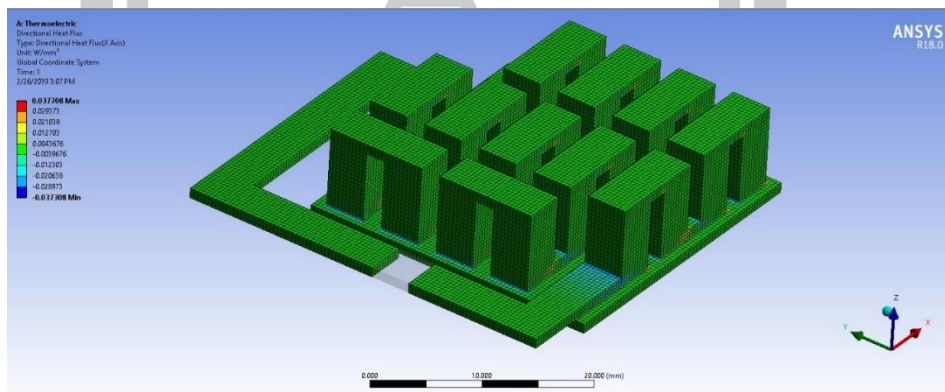
ภาพประกอบ 4.13 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B



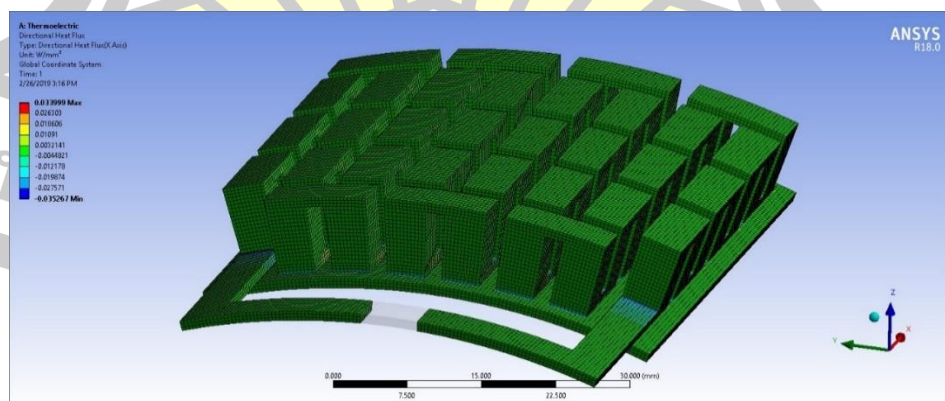
ภาพประกอบ 4.14 การกระจายฟลักซ์ความร้อนรวมพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C



ภาพประกอบ 4.15 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A



ภาพประกอบ 4.16 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B



ภาพประกอบ 4.17 การกระจายฟลักซ์ความร้อนตรงพื้นผิวด้านร้อน และด้านเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C

### 4.3 การทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

#### 4.3.1 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบ

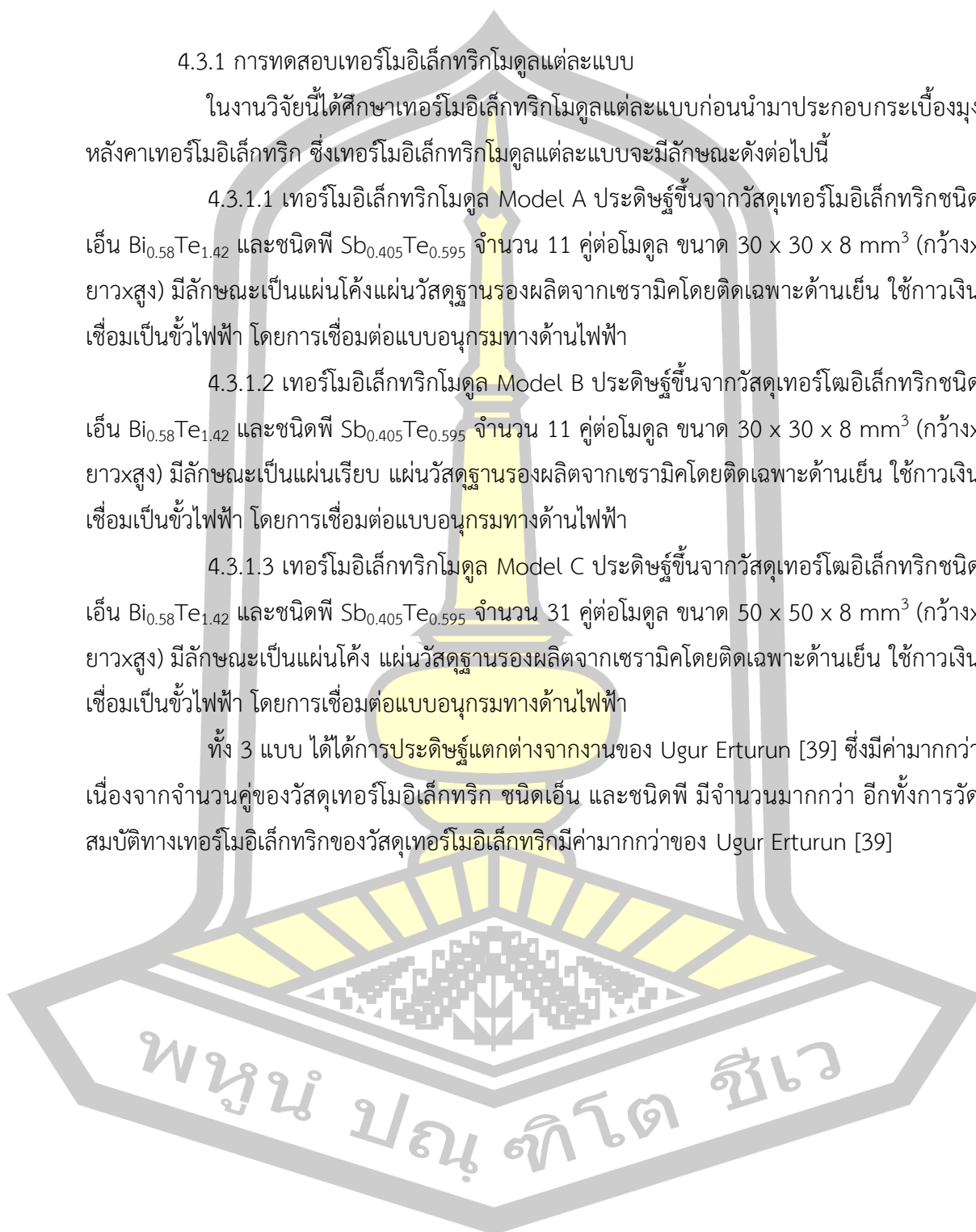
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบก่อนนำมาประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

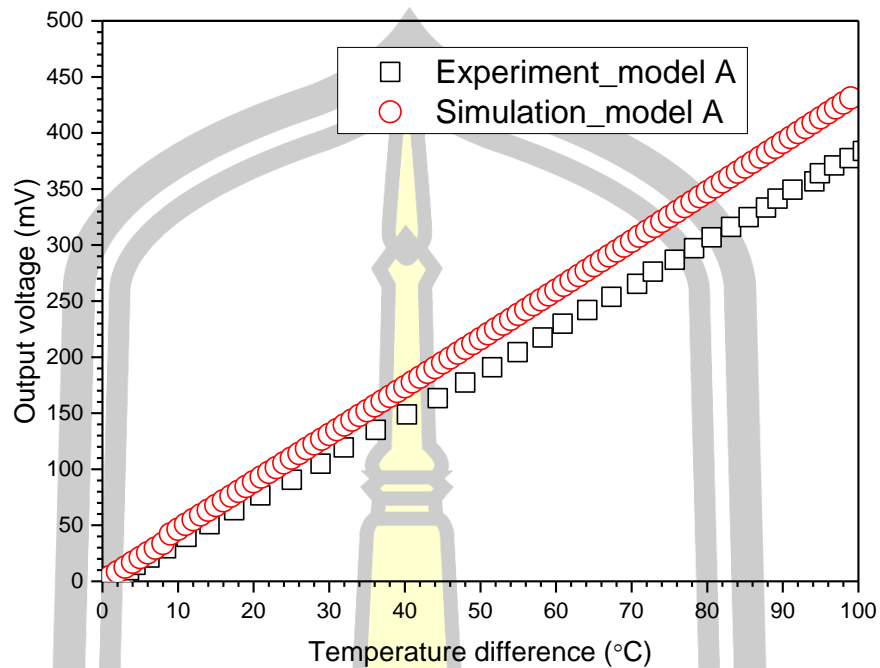
4.3.1.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model A ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  จำนวน 11 คู่ต่อโมดูล ขนาด  $30 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$  (กว้าง x ยาว x สูง) มีลักษณะเป็นแผ่นโค้ง แผ่นวัสดุฐานรองผลิตจากเซรามิกโดยติดเฉพาะด้านเอ็น ใช้กาวเงินเชื่อมเป็นขั้วไฟฟ้า โดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรมทางด้านไฟฟ้า

4.3.1.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  จำนวน 11 คู่ต่อโมดูล ขนาด  $30 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$  (กว้าง x ยาว x สูง) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ แผ่นวัสดุฐานรองผลิตจากเซรามิกโดยติดเฉพาะด้านเอ็น ใช้กาวเงินเชื่อมเป็นขั้วไฟฟ้า โดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรมทางด้านไฟฟ้า

4.3.1.3 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model C ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  จำนวน 31 คู่ต่อโมดูล ขนาด  $50 \times 50 \times 8 \text{ mm}^3$  (กว้าง x ยาว x สูง) มีลักษณะเป็นแผ่นโค้ง แผ่นวัสดุฐานรองผลิตจากเซรามิกโดยติดเฉพาะด้านเอ็น ใช้กาวเงินเชื่อมเป็นขั้วไฟฟ้า โดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรมทางด้านไฟฟ้า

ทั้ง 3 แบบ ได้ได้การประดิษฐ์แตกต่างจากงานของ Ugur Erturun [39] ซึ่งมีค่ามากกว่า เนื่องจากจำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น และชนิดพี มีจำนวนมากกว่า อีกทั้งการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าของ Ugur Erturun [39]



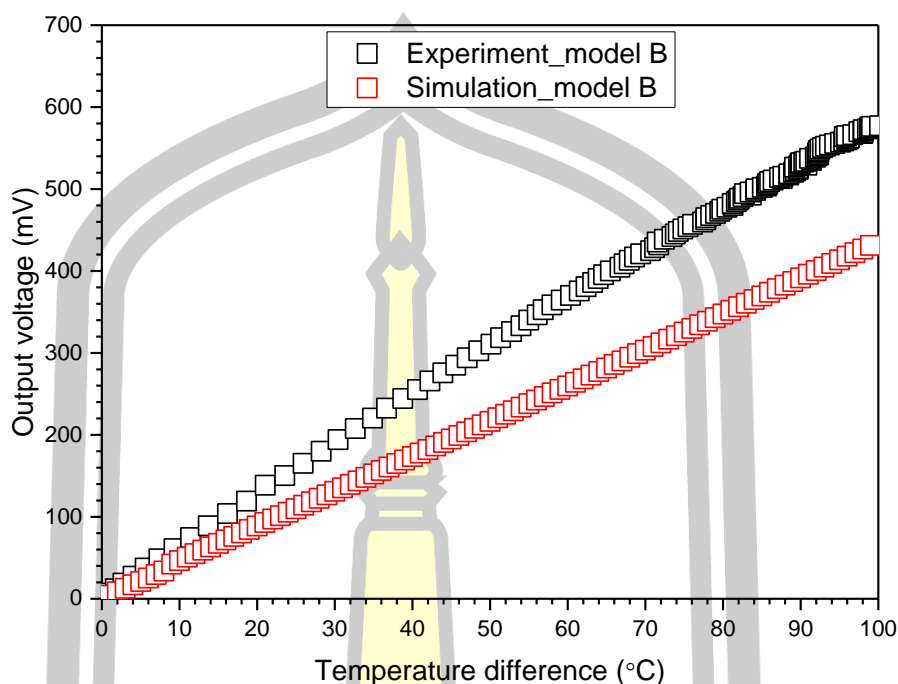


ภาพประกอบ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A

จากภาพประกอบ 4.18 เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A พบว่า เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยค่าผลต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของการทดลองจะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 384.90 mV และการจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 431.20 mV

พูน ปณ ทิโต ชีเว





ภาพประกอบ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B

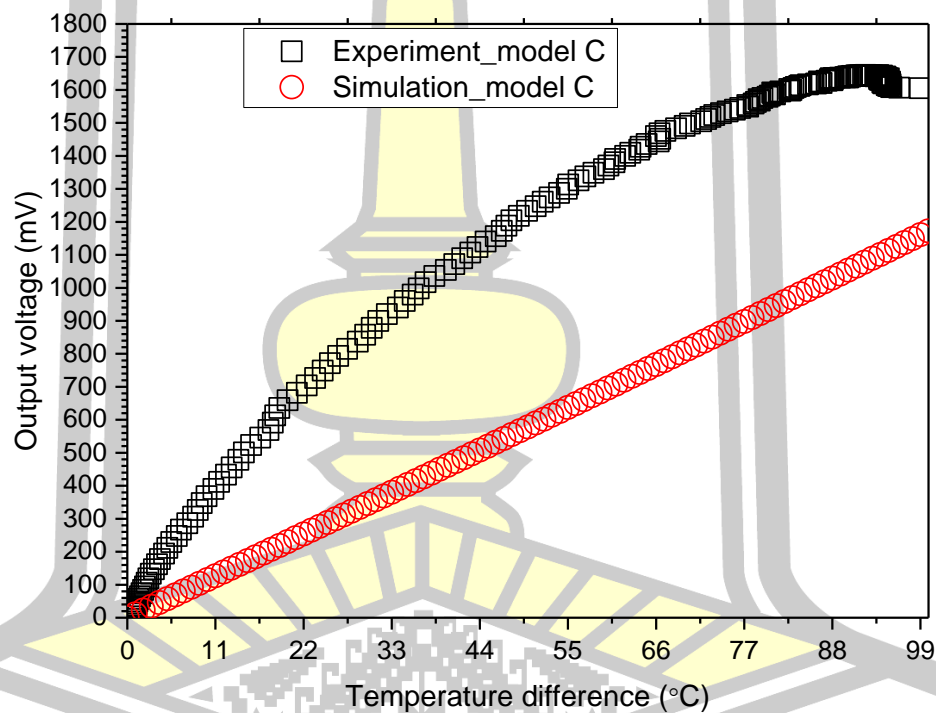
จากภาพประกอบ 4.19 เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B พบว่า เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยค่าผลต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของการทดลองจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 577.22 mV และการจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 428.79 mV

จากภาพประกอบ 4.20 เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C พบว่า เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยค่าผลต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของการทดลองจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1603.68 mV และการจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 1172.87 mV

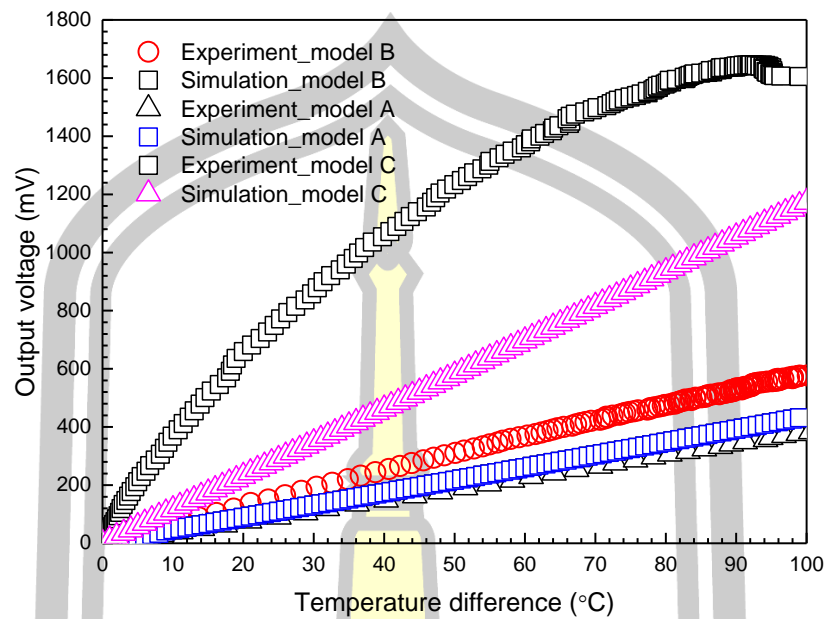
จากภาพประกอบ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model แต่ละแบบ พบว่า เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลอง

และการจำลองทางคณิตศาสตร์ก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยค่าผลต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของการทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1603.68 mV และการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C เท่ากับ 1172.87 mV เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C มีปริมาณวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  ที่มากกว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A และ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B ทำให้ได้ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้ามากกว่า

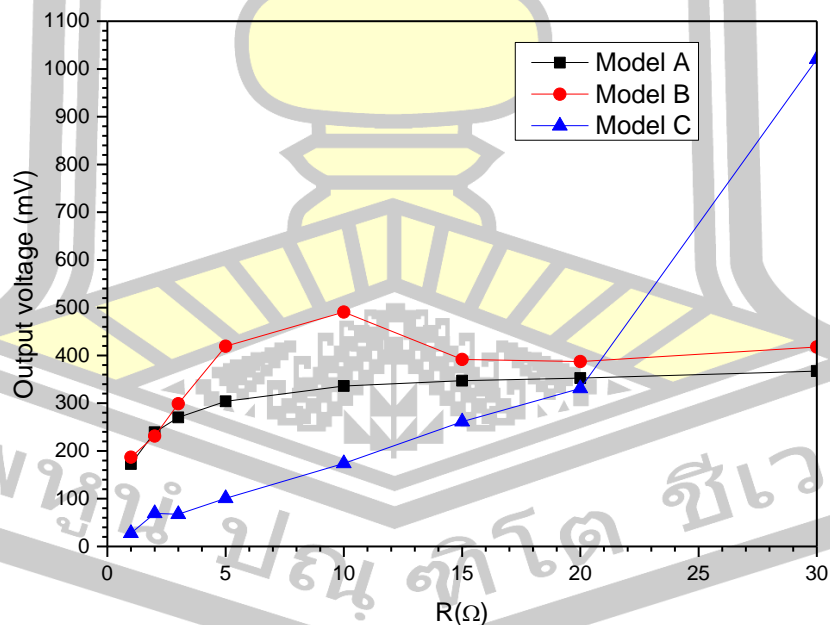
ทั้ง 3 แบบ ได้ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างจากงานของ Ugur Erturun [39] ซึ่งมีค่ามากกว่า เนื่องจากจำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น และชนิดพี มีจำนวนมากกว่า อีกทั้งการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าของ Ugur Erturun [39]



ภาพประกอบ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C



ภาพประกอบ 4.21 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของแต่ละเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

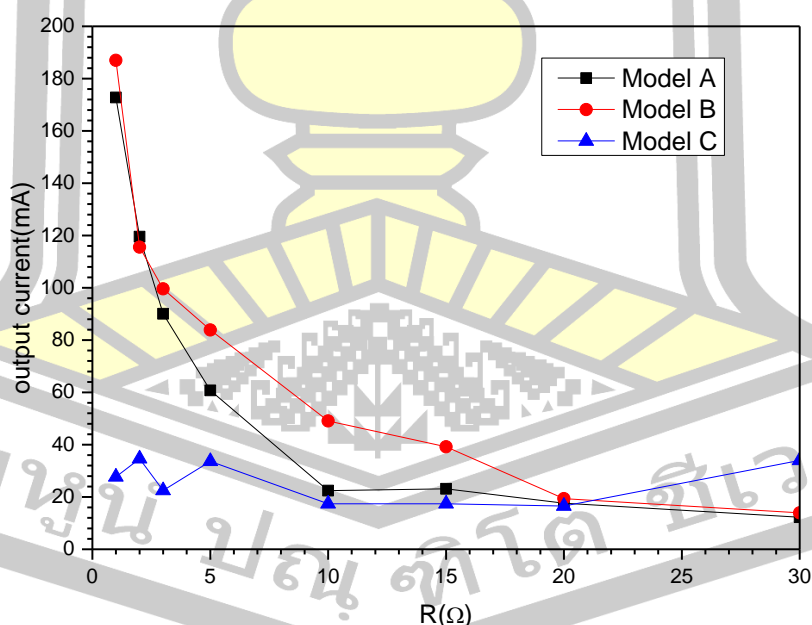


ภาพประกอบ 4.22 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 100 °C ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบ

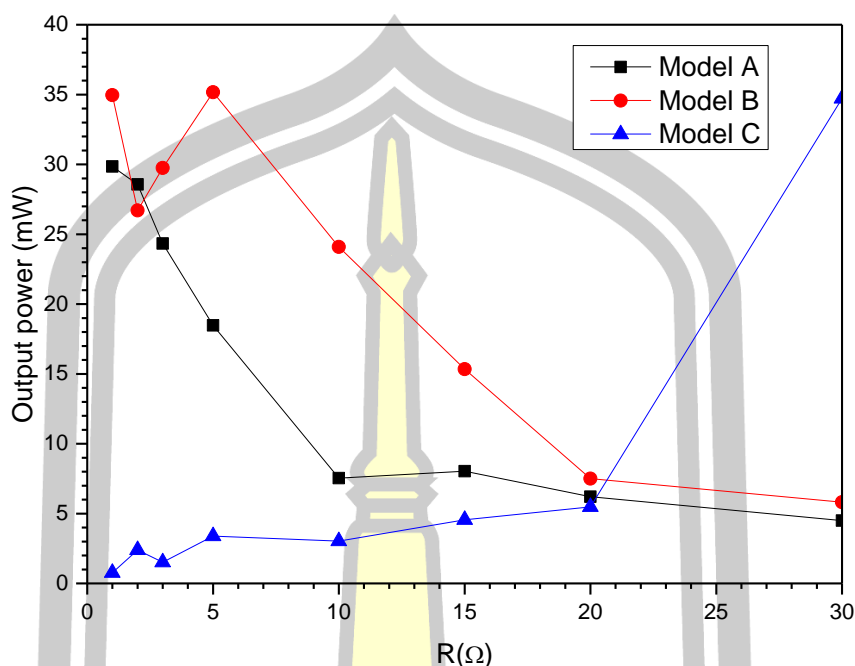
จากภาพประกอบ 4.22 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลอง กับผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบ จากการทดลองพบว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A ที่ค่าความต้านทาน 30 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $367.10\text{ mV}$  ส่วนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B ที่ค่าความต้านทาน 10 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $490.85\text{ mV}$  และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C ที่ค่าความต้านทาน 30 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $1020.50\text{ mV}$

จากภาพประกอบ 4.23 เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลอง กับผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบ จากการทดลองพบว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $172.77\text{ mA}$  ส่วนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $186.97\text{ mA}$  และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C ที่ค่าความต้านทาน 2 โอห์ม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $34.60\text{ mA}$

ทั้ง 3 แบบ ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าแตกต่างจากงานของ Ugur Erturun [39] ซึ่งมีค่ามากกว่า เนื่องจากจำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น และชนิดพี มีจำนวนมากกว่า อีกทั้งการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าของ Ugur Erturun [39]



ภาพประกอบ 4.23 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของแต่ละเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



ภาพประกอบ 4.24 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของแต่ละเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

จากภาพประกอบ 4.24 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลอง กับผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบ จากการทดลองพบว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 29.84 mW ส่วนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B ที่ค่าความต้านทาน 5 โอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 35.16 mW และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C ที่ค่าความต้านทาน 30 โอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 34.71 mW

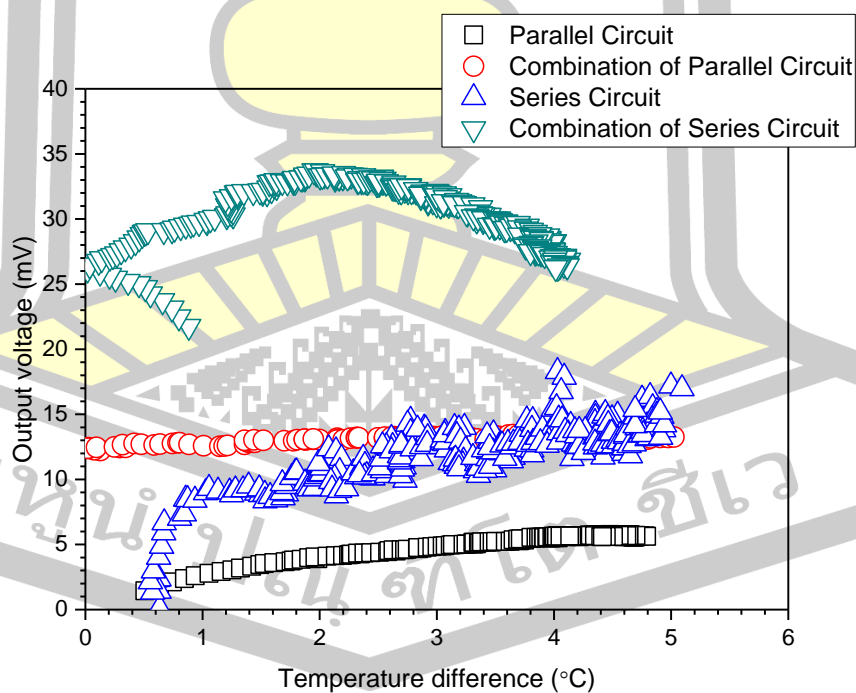
ทั้ง 3 แบบ ได้ปริมาณกำลังไฟฟ้าแตกต่างจากงานของ Ugur Erturun [39] ซึ่งมีค่ามากกว่า เนื่องจากจำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น และชนิดพี มีจำนวนมากกว่า อีกทั้งการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าของ Ugur Erturun [39]

#### 4.3.2 การทดสอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

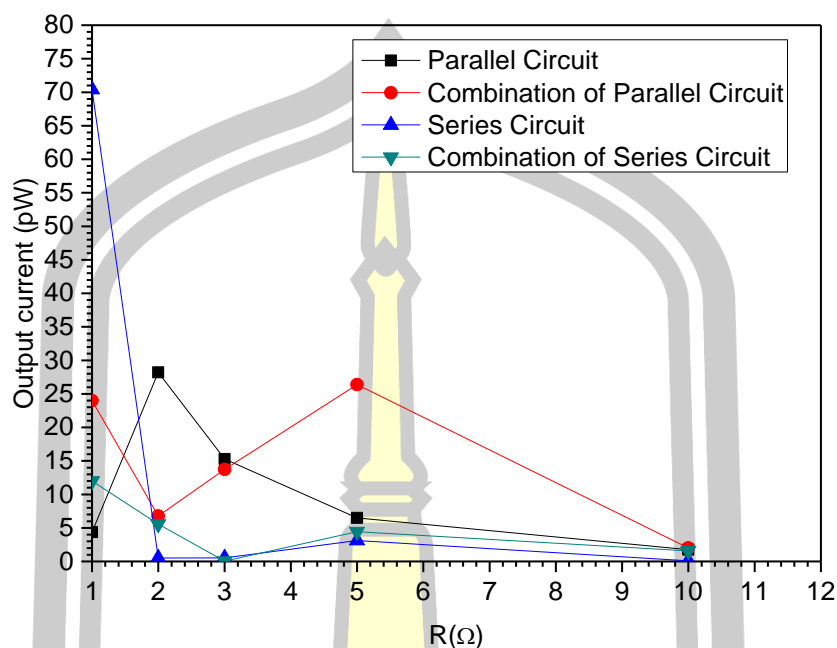
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละแบบก่อนมาประกอบกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model A ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  จำนวน 11 คู่

ต่อโมดูล ขนาด  $30 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$  (กว้างxยาวxสูง) มีลักษณะเป็นแผ่นโค้ง จำนวน 14 โมดูล เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  จำนวน 11 คู่ต่อโมดูล ขนาด  $30 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$  (กว้างxยาวxสูง) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ จำนวน 14 โมดูล และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model C ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  จำนวน 31 คู่ต่อโมดูล ขนาด  $50 \times 50 \times 8 \text{ mm}^3$  (กว้างxยาวxสูง) มีลักษณะเป็นแผ่นโค้ง จำนวน 10 โมดูล รวมทั้งหมด 38 โมดูล โดยการเชื่อมต่อแบบต่าง ๆ ทางด้านไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 4.31

จากภาพประกอบ 4.25 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับผลต่างอุณหภูมิของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบขนาน (Parallel Circuit) ที่ผลต่างอุณหภูมิ  $4.47 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $5.74 \text{ mV}$  ส่วนวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Circuit) ที่ผลต่างอุณหภูมิ  $4.99 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $17.17 \text{ mV}$  เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยอนุกรมภายในขนานระหว่างแถว (Combination of Series Circuit) ผลต่างอุณหภูมิ  $1.97 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $33.70 \text{ mV}$  และต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยขนานภายในอนุกรมระหว่างแถว (Combination of Parallel Circuit) ผลต่างอุณหภูมิ  $4.48 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $13.34 \text{ mV}$

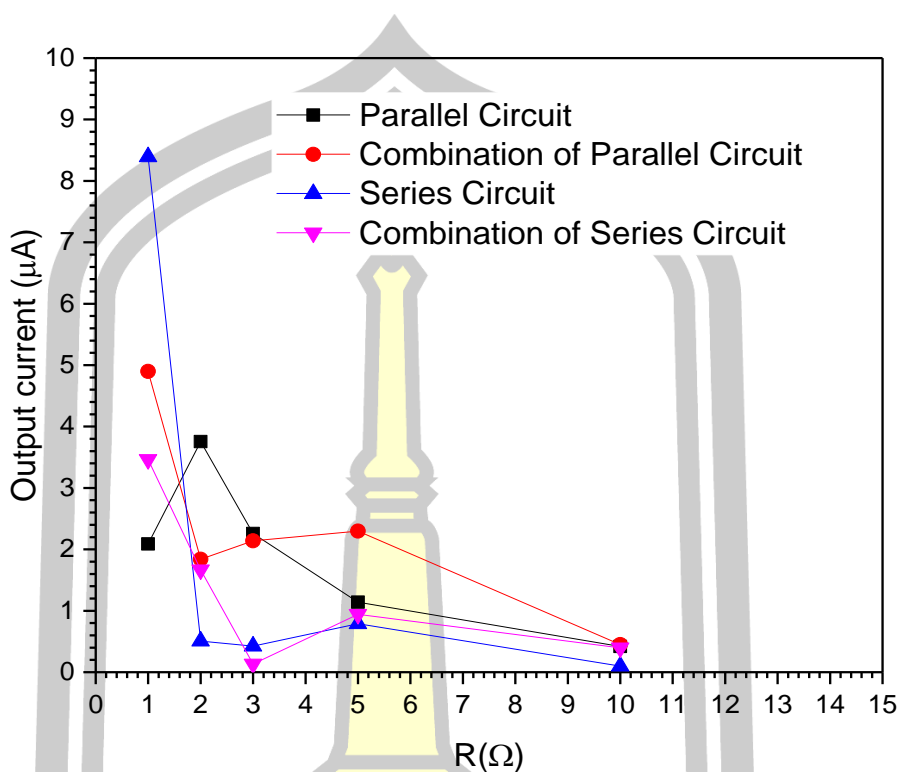


ภาพประกอบ 4.25 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับผลต่างอุณหภูมิของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 4.26 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 5 °C ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

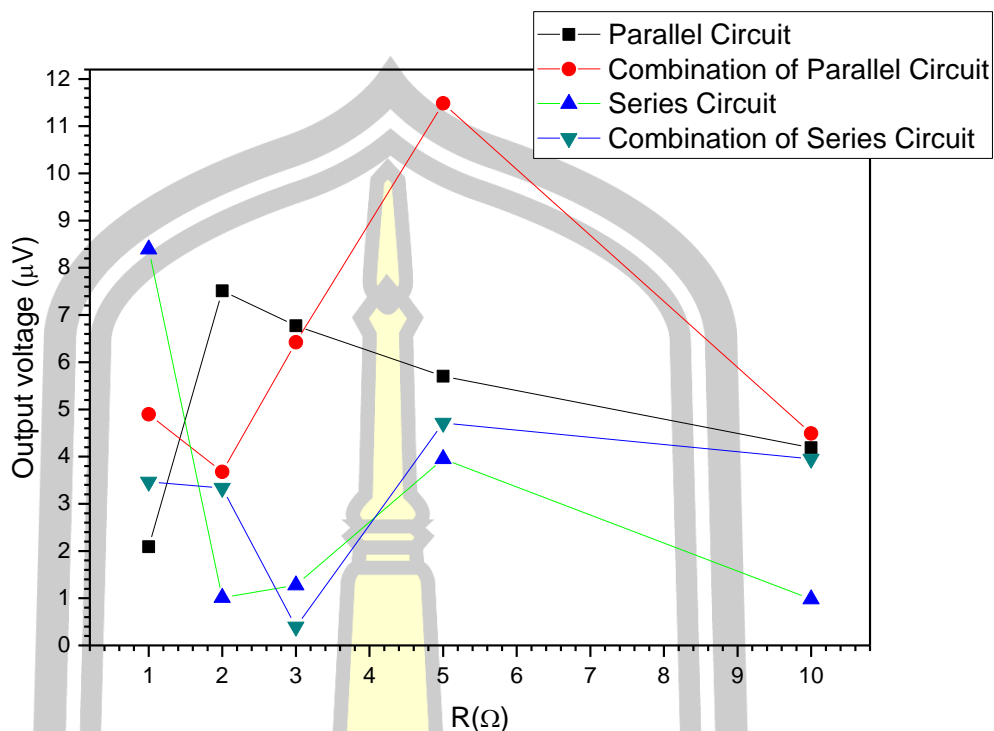
จากภาพประกอบ 4.26 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 5 °C ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบขนาน (Parallel Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 2 โอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 28.20 pW ที่ ส่วนวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Circuit) ที่ความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 70.41 pW เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยอนุกรมภายในขนานระหว่างแถว (Combination of Series Circuit) ที่ความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 12 pW และต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยขนานภายในอนุกรมระหว่างแถว (Combination of Parallel Circuit) ที่ความต้านทาน 5 โอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 26.38 pW



ภาพประกอบ 4.27 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ตัวของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

จากภาพประกอบ 4.27 เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบขนาน (Parallel Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 2 โอห์ม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $3.75\ \mu\text{A}$  ที่ ส่วนวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $8.39\ \mu\text{A}$  เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยอนุกรมภายในขนานระหว่างแถว (Combination of Series Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $3.46\ \mu\text{A}$  และต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยขนานภายในอนุกรมระหว่างแถว (Combination of Parallel Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $4.89\ \mu\text{A}$





ภาพประกอบ 4.28 การเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

จากภาพประกอบ 4.28 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบขนาน (Parallel Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 2 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $7.51\ \mu\text{V}$  ที่ ส่วนวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $8.39\ \mu\text{V}$  เมื่อต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยอนุกรมภายในขนานระหว่างแถว (Combination of Series Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 5 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $4.71\ \mu\text{V}$  และต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยขนานภายในอนุกรมระหว่างแถว (Combination of Parallel Circuit) ที่ค่าความต้านทาน 5 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่

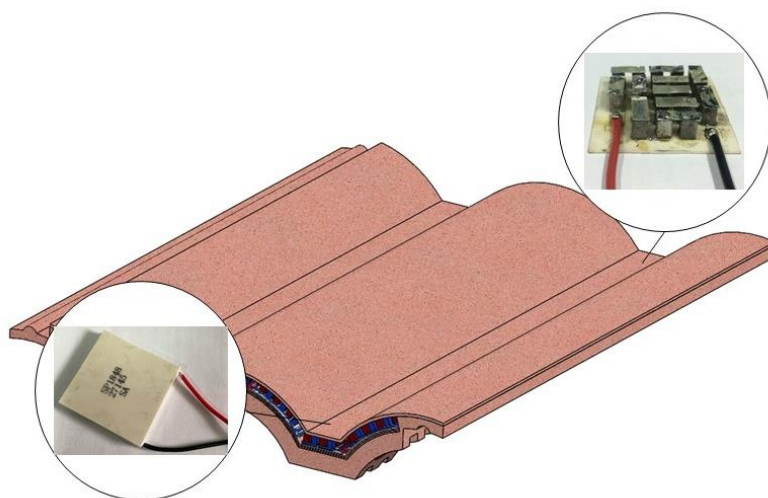
$11.48\ \mu\text{V}$

การทดสอบกระเบื้องมุงหลังคาได้ปริมาณไฟฟ้าแตกต่างจากงานของ งานวิจัยของ Mingjian Liao [40] น้อยกว่าเนื่องจาก จำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น และชนิดพี

มีจำนวนน้อยกว่า อีกทั้งการวัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าน้อยกว่าของ Mingjian Liao [40] อีกทั้งผลต่างของอุณหภูมิมากกว่าของการทดสอบกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

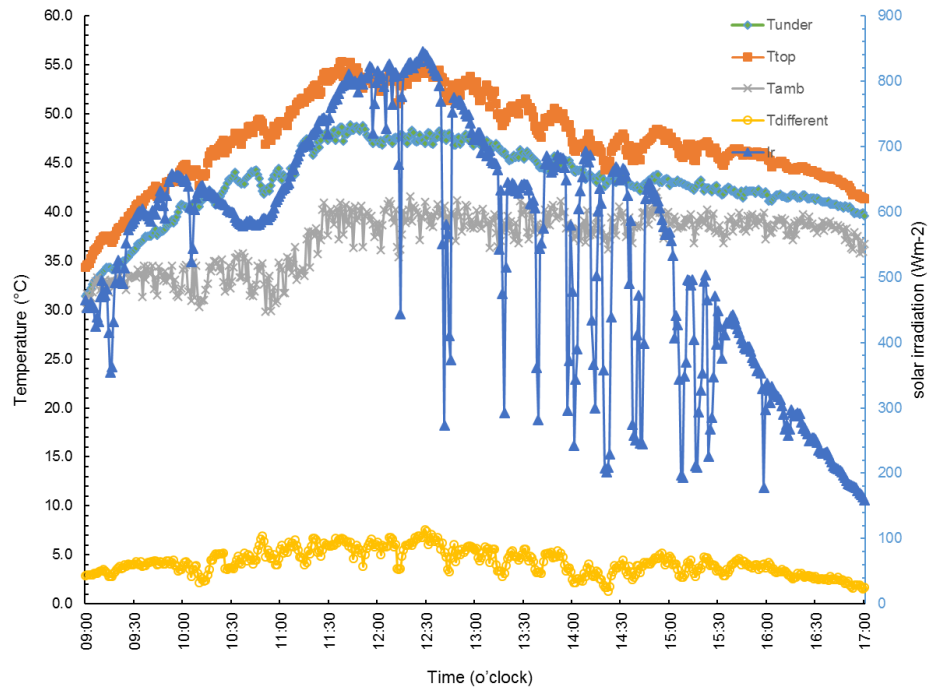
#### 4.4 การทดลองประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดอื่น  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  จำนวน 11 คู่ต่อโมดูล ขนาด  $30 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$  (กว้าง x ยาว x สูง) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ แผ่นวัสดุฐานรองผลิตจากเซรามิกโดยติดเฉพาะด้านเย็น ใช้กาวเงินเชื่อมเป็นขั้วไฟฟ้า โดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรมทางด้านไฟฟ้าจำนวน 1 โมดูล และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) ผลิตจากวัสดุกึ่งตัวนำ  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  จำนวน 127 คู่ต่อโมดูล ขนาด  $40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$  (กว้าง x ยาว x สูง) ดังแสดงในภาพประกอบ 4.29

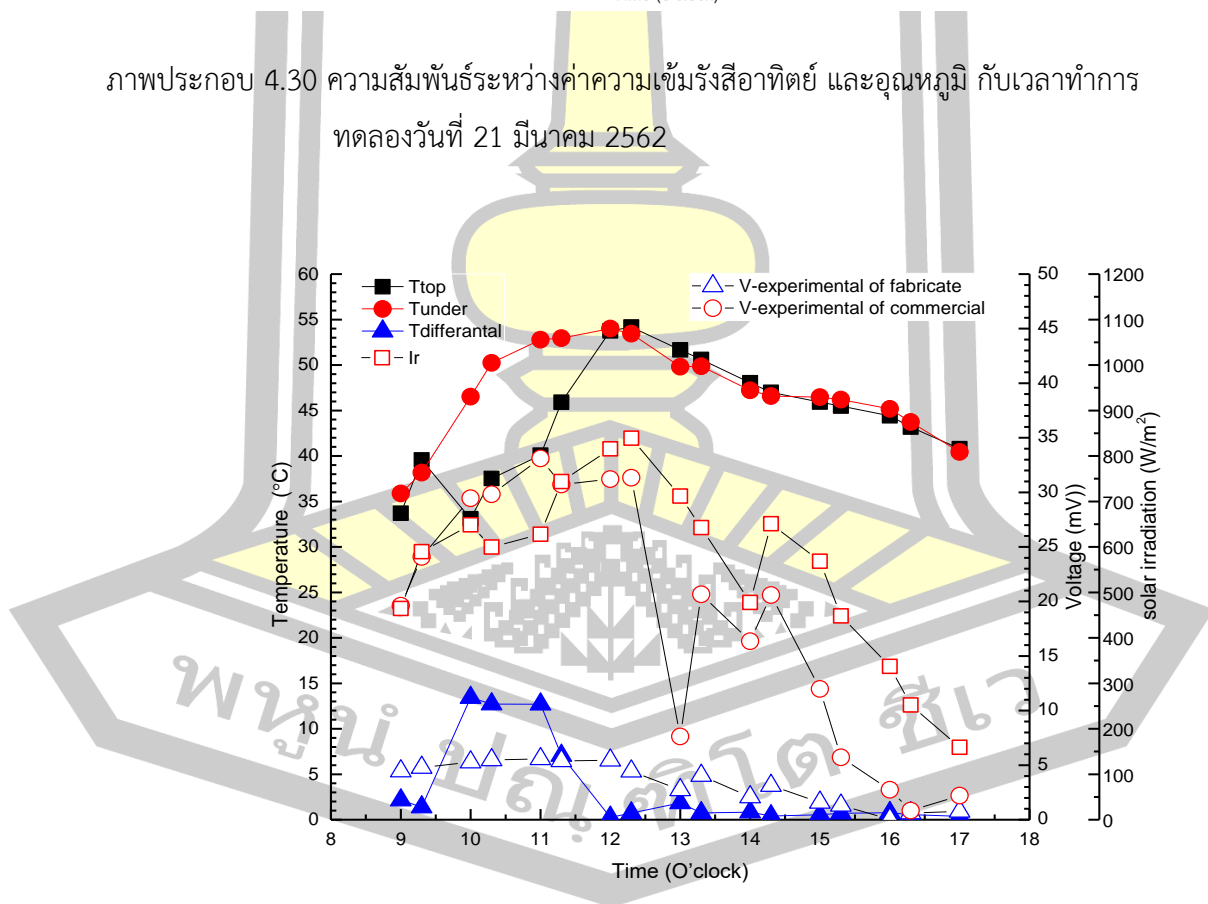


ภาพประกอบ 4.29 การทดสอบประสิทธิภาพของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial)

จากการทดลองการผลิตไฟฟ้าโดยกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) ซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลในเดือนมีนาคม ถึงเมษายน พ.ศ. 2562 ในช่วงเวลาการทดลอง คือ 09:00 น. ถึง 17:00 น.



ภาพประกอบ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ  
ทดลองวันที่ 21 มีนาคม 2562

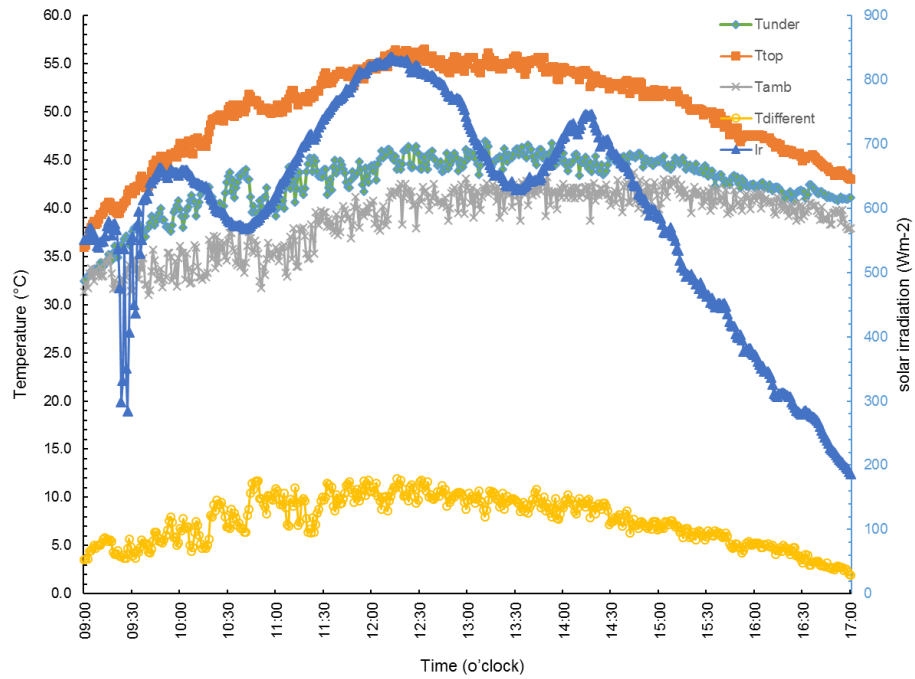


ภาพประกอบ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า  
ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 21 มีนาคม 2562

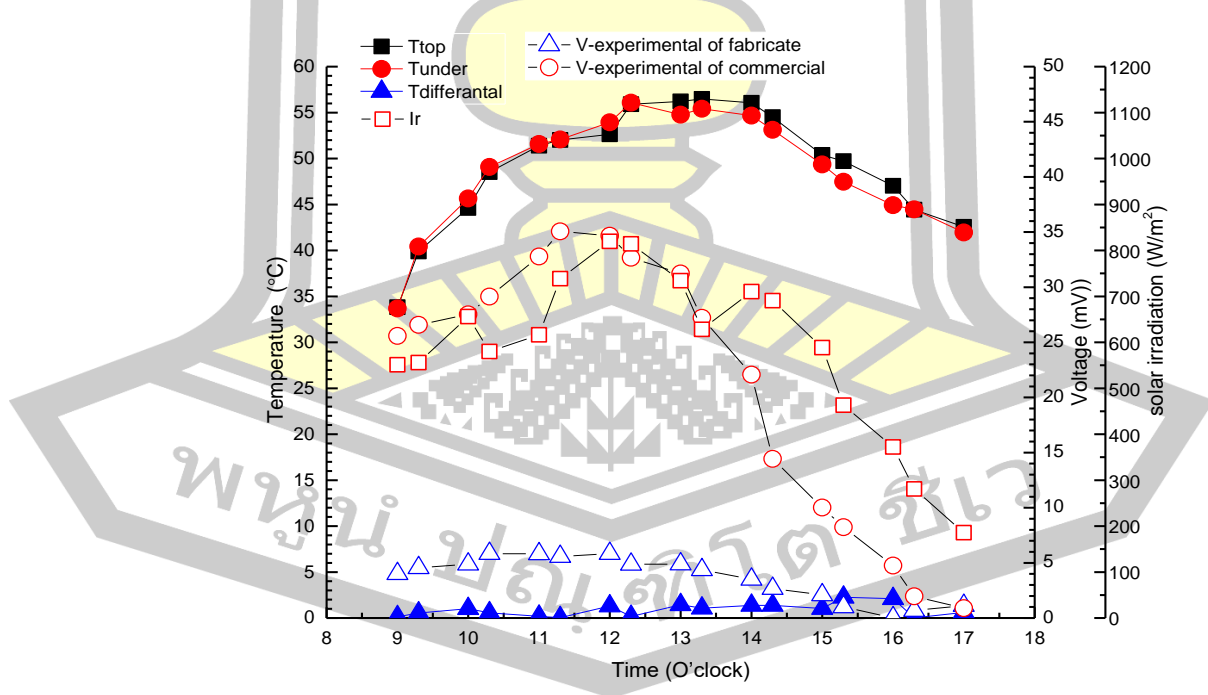
การวัดอุณหภูมิที่ตั้งแสดงในภาพประกอบ 4.30 วันที่ 21 มีนาคม 2562 เวลา 9.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 12.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 12.00 น. และลดต่ำสุดในเวลา 17.00 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุดของการทดลอง เวลา 12.00 น. และ 12.00 น. และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดในช่วงเวลา 12.00 น.

จากภาพประกอบ 4.31 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 12.00 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 9.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตกดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th) 54.17 อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (Tunder, Tc) 53.45 °C และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย 1.7°C ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด 5.58 mV และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด 33.11 mV มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ 815.5 W/m<sup>2</sup>



ภาพประกอบ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ  
ทดลองวันที่ 22 มีนาคม 2562

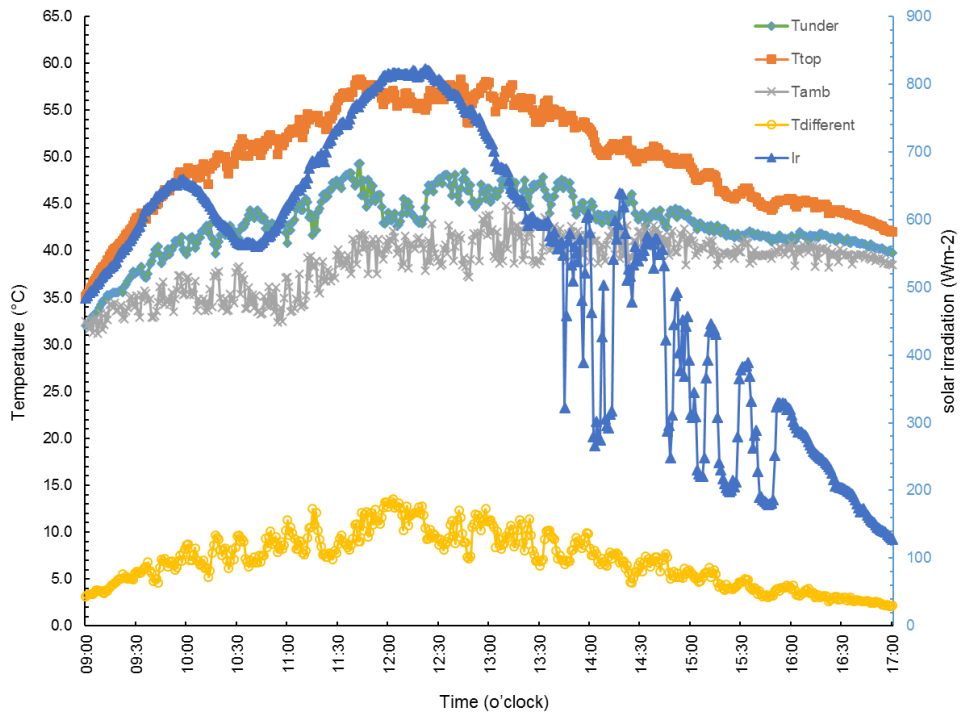


ภาพประกอบ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า  
ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 22 มีนาคม 2562

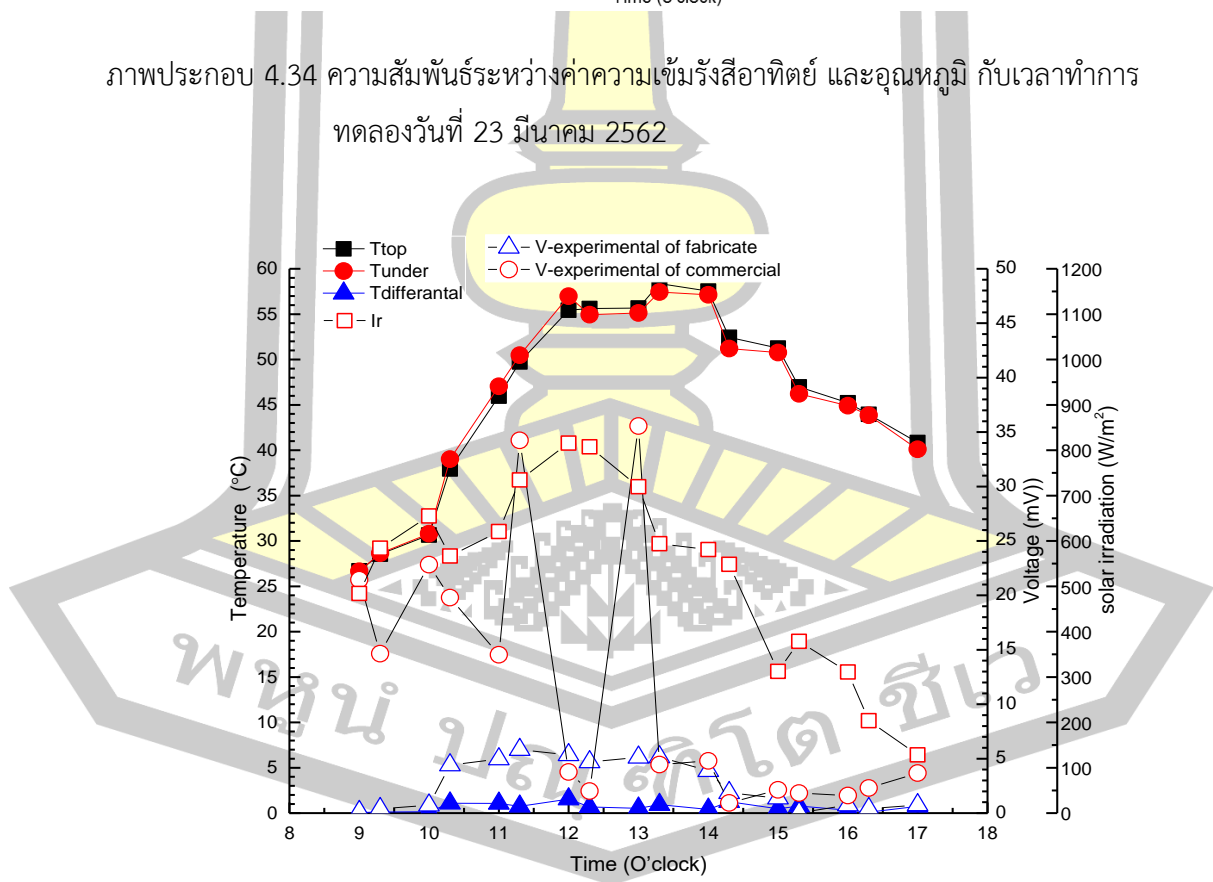
การวัดอุณหภูมิที่ตั้งแสดงในภาพประกอบ 4.32 วันที่ 22 มีนาคม 2562 เวลา 9.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 13.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 13.30 น. และลดต่ำสุดในเวลา 17.00 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุดของการทดลอง เวลา 12.00 น. และ 13.30 น. และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดในช่วงเวลา 12.00 น.

จากภาพประกอบ 4.33 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 13.30 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 9.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตกดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th) 56.48 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) 55.41 °C และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย 1°C ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด 5.84 mV และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด 34.67 mV มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ  $819.7 \text{ W m}^{-2}$



ภาพประกอบ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ  
ทดลองวันที่ 23 มีนาคม 2562



ภาพประกอบ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า  
ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 23 มีนาคม 2562

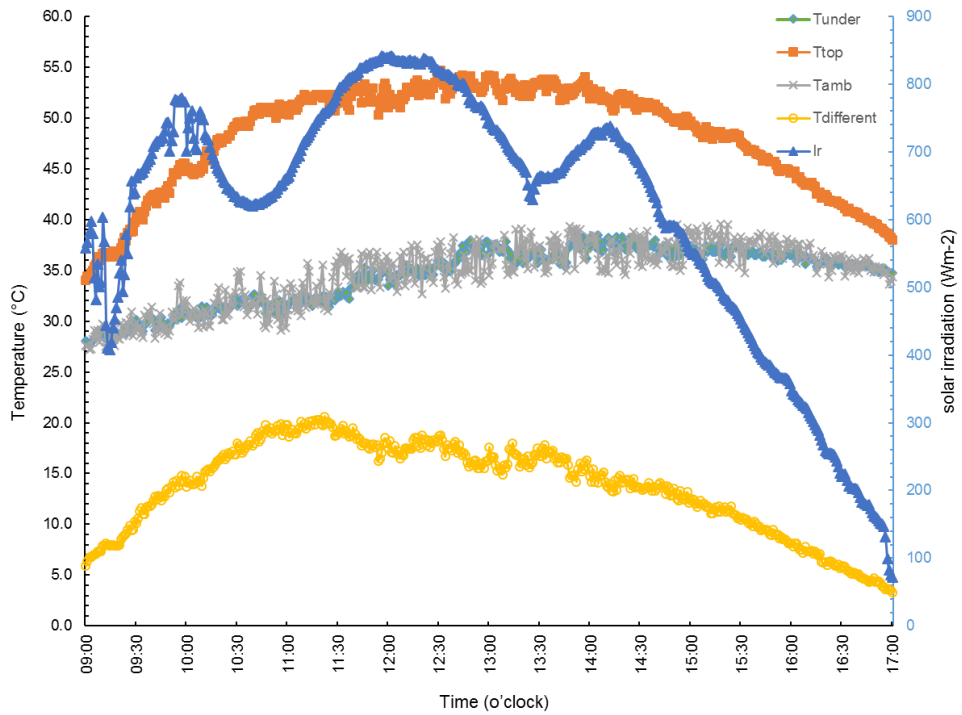
การวัดอุณหภูมิที่ตั้งแสดงในภาพประกอบ 4.34 วันที่ 23 มีนาคม 2562 เวลา 9.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากมีการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 13.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 13.30 น. และลดต่ำสุดในเวลา 17.00 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุดของการทดลอง เวลา 11.30 น. และ 13.30 น. และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดในช่วงเวลา 12.00 น.

จากภาพประกอบ 4.35 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 13.00 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 9.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

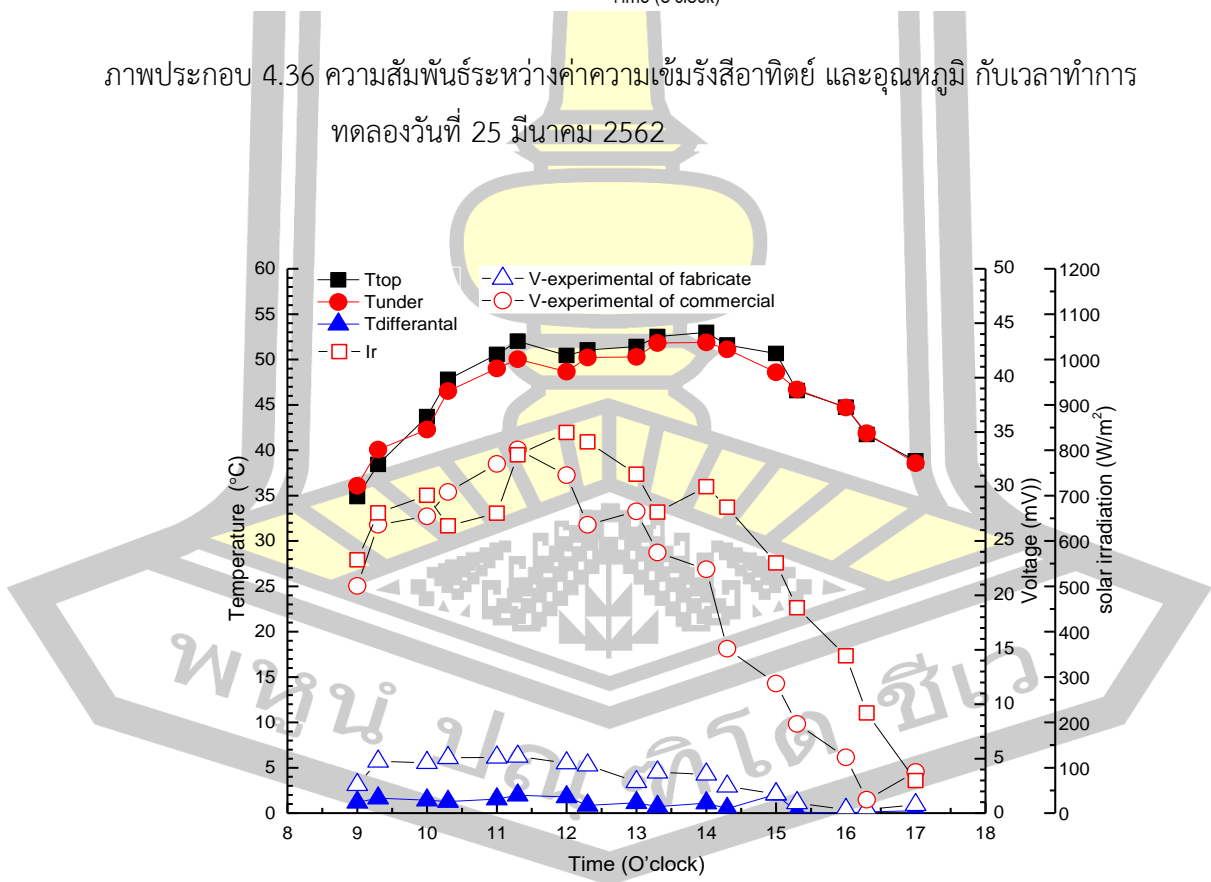
การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตก

ดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th)  $58.37^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (Tunder, Tc)  $57.44^{\circ}\text{C}$  และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย  $1^{\circ}\text{C}$  ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $5.82\text{ mV}$  และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $35.56\text{ mV}$  มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ  $815.5\text{ W m}^{-2}$





ภาพประกอบ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ  
ทดลองวันที่ 25 มีนาคม 2562



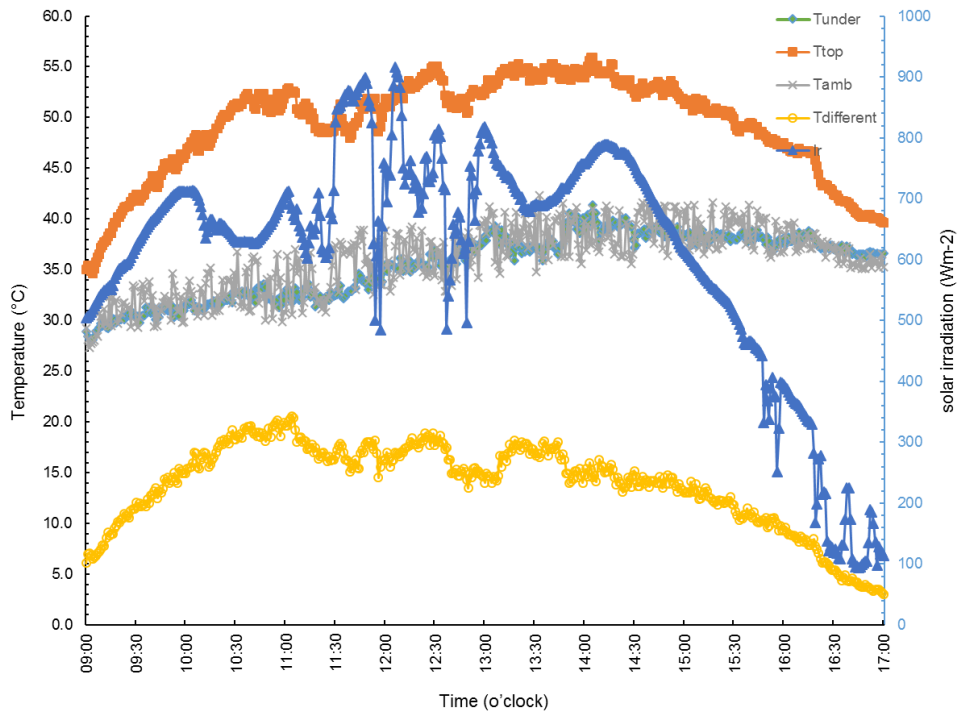
ภาพประกอบ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า  
ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 25 มีนาคม 2562

การวัดอุณหภูมิที่ตั้งแสดงในภาพประกอบ 4.36 วันที่ 25 มีนาคม 2562 เวลา 9.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 12.00 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 11.30 น. และลดต่ำสุดในเวลา 17.00 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุดของการทดลอง เวลา 11.30 น. และ 12.00 น. และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุด ในช่วงเวลา 12.00 น.

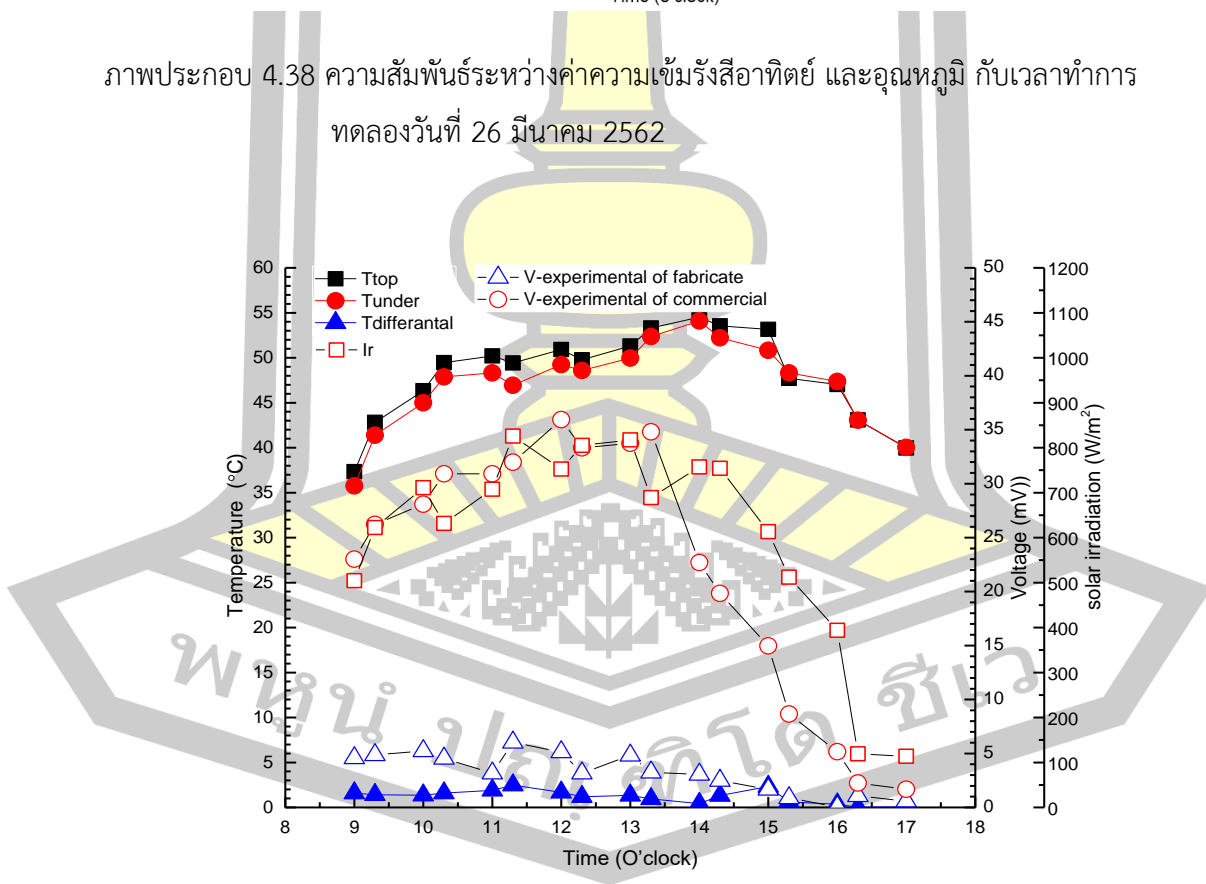
จากภาพประกอบ 4.37 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 12.00 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 9.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตก

ดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th)  $52.9^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc)  $51.8^{\circ}\text{C}$  และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย  $1^{\circ}\text{C}$  ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $5.20\text{ mV}$  และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $32.08\text{ mV}$  มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ  $838.9\text{ W m}^{-2}$



ภาพประกอบ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ  
ทดลองวันที่ 26 มีนาคม 2562



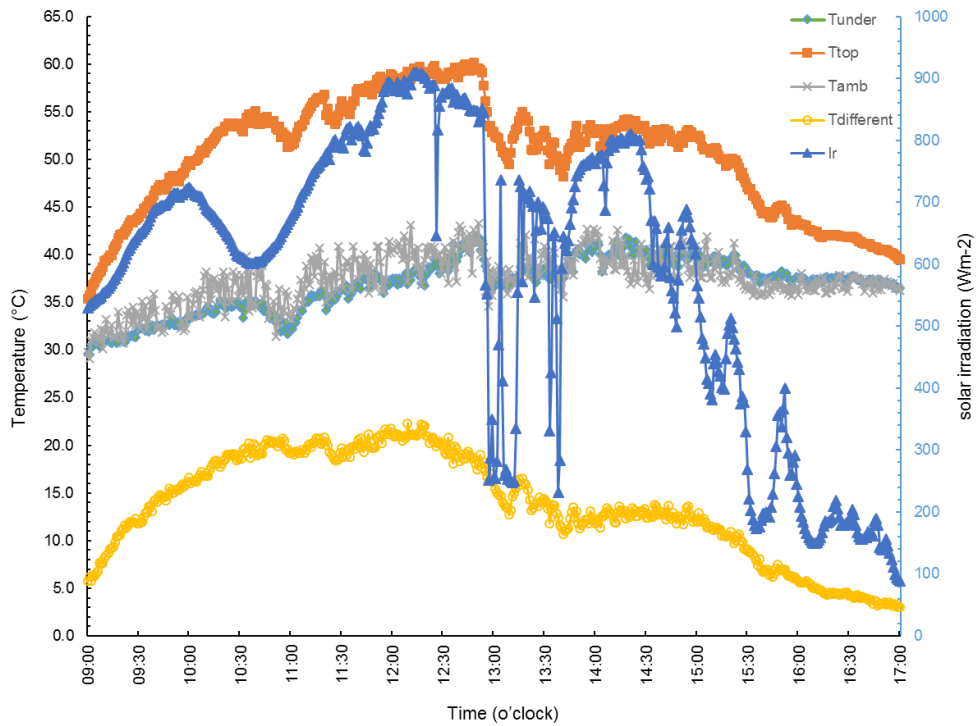
ภาพประกอบ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า  
ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 26 มีนาคม 2562

การวัดอุณหภูมิที่ตั้งแสดงในภาพประกอบ 4.38 วันที่ 26 มีนาคม 2562 เวลา 9.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากมีการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 12.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 11.30 น. และลดต่ำสุดในเวลา 09.00 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุดของการทดลอง เวลา 11.30 น. และ 13.00 น. และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุด ในช่วงเวลา 12.00 น.

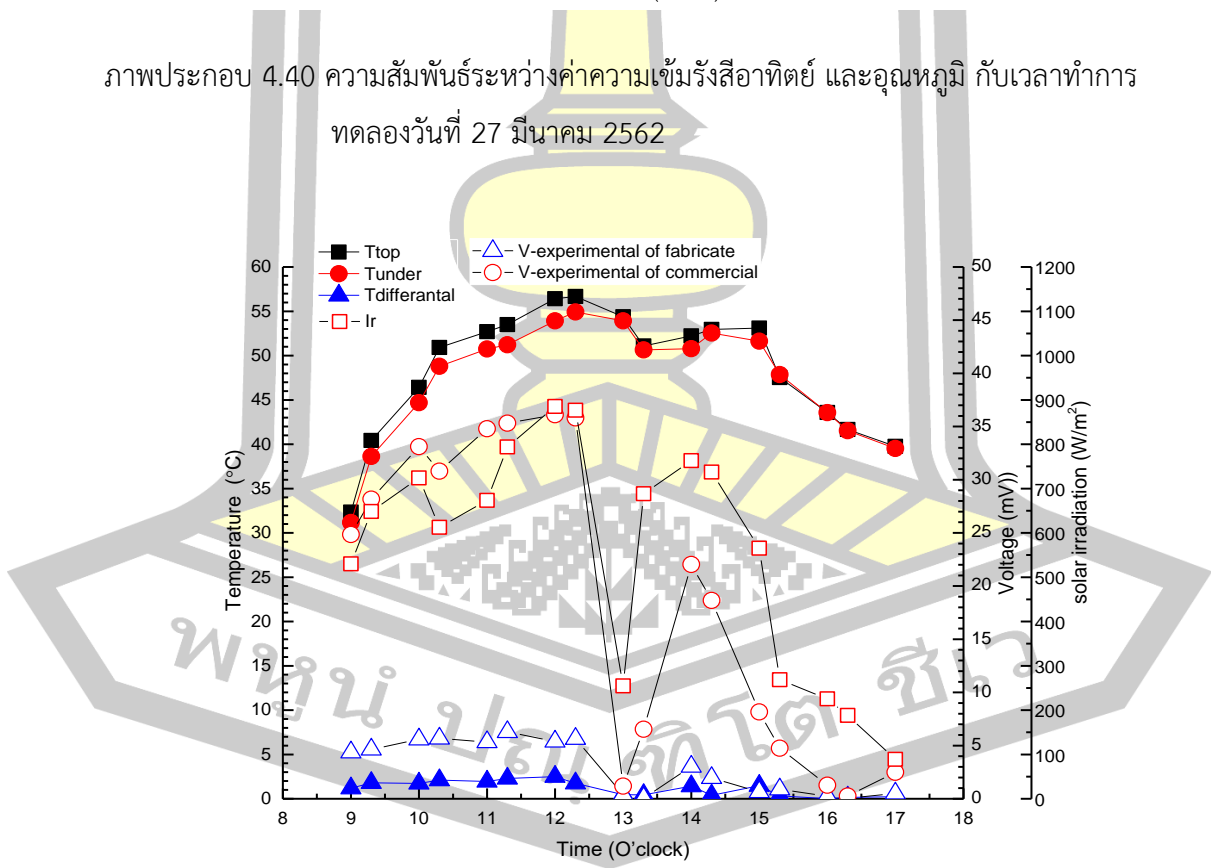
จากภาพประกอบ 4.39 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 14.00 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 9.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตก

ดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับ และสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (Tupper, Th)  $54.5^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc)  $54.09^{\circ}\text{C}$  และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย  $0.5^{\circ}\text{C}$  ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $6.02\text{ mV}$  และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $35.94\text{ mV}$  มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ  $825.9\text{ W m}^{-2}$



ภาพประกอบ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ  
ทดลองวันที่ 27 มีนาคม 2562



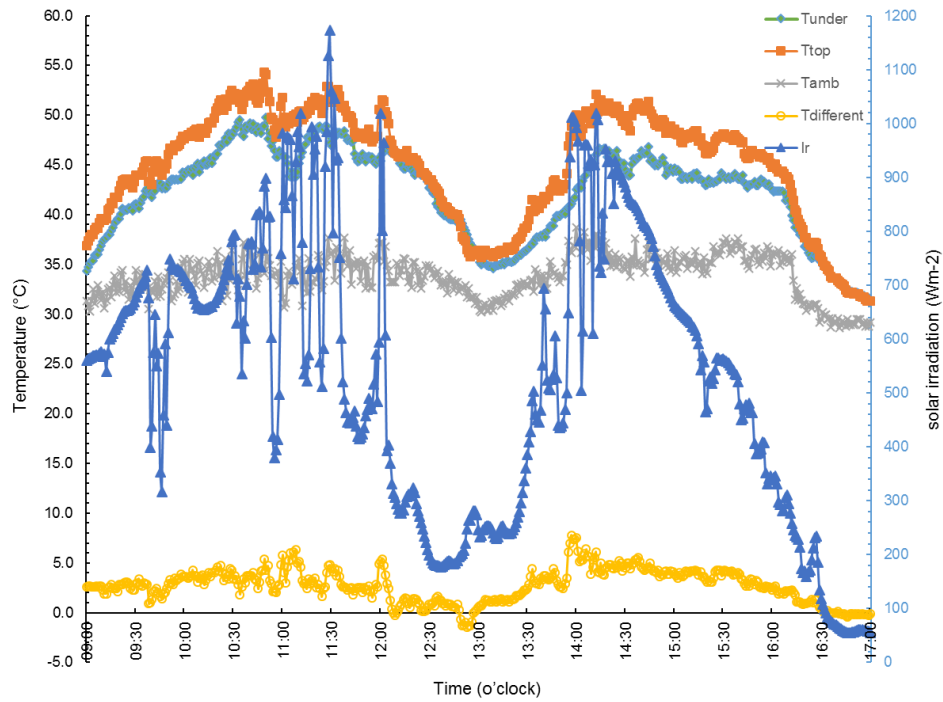
ภาพประกอบ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า  
ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลองวันที่ 27 มีนาคม 2562

การวัดอุณหภูมิที่ตั้งแสดงในภาพประกอบ 4.40 วันที่ 27 มีนาคม 2562 เวลา 9.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 12.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 12.30 น. และลดต่ำสุดในเวลา 09.00 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุดของการทดลอง เวลา 12.00 น. และ 12.30 น. และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุด ในช่วงเวลา 12.00 น.

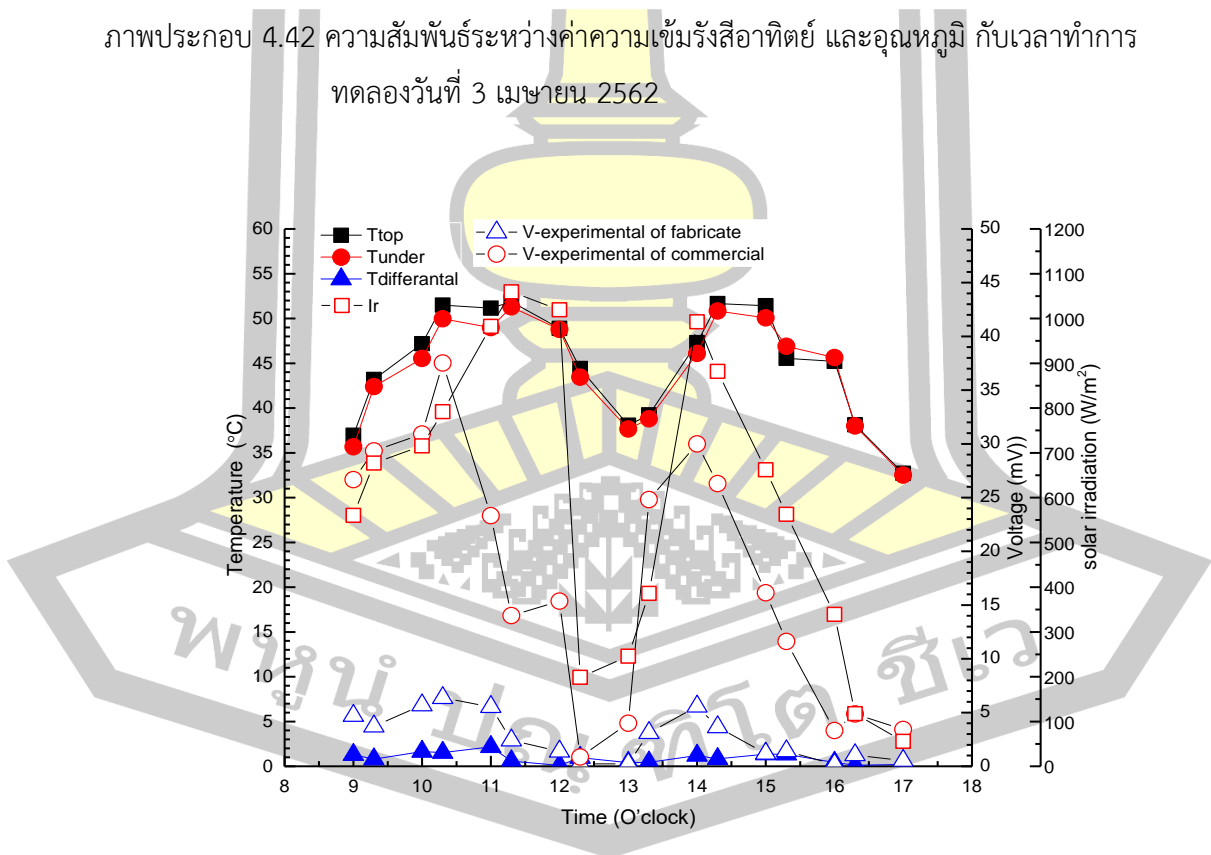
จากภาพประกอบ 4.41 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 12.30 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 9.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตก

ดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th)  $56.67^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc)  $54.92^{\circ}\text{C}$  และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย  $2^{\circ}\text{C}$  ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $6.28\text{ mV}$  และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $36.1\text{ mV}$  มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ  $885.3\text{ W m}^{-2}$



ภาพประกอบ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ ทดลองวันที่ 3 เมษายน 2562



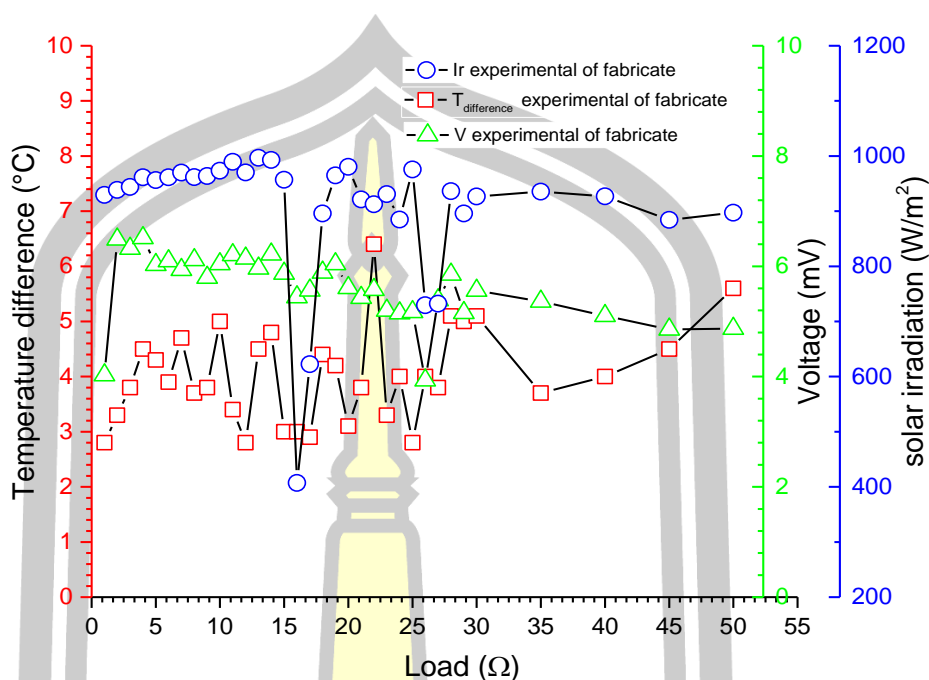
ภาพประกอบ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ผลิตได้ของการทดลองกับเวลาทำการทดลอง วันที่ 3 เมษายน 2562

การวัดอุณหภูมิที่ตั้งแสดงในภาพประกอบ 4.42 วันที่ 3 เมษายน 2562 เวลา 9.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 11.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 10.30 น. และลดต่ำสุดในเวลา 17.00 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุดของการทดลอง เวลา 10.40 น. และ 11.30 น. ซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุด

จากภาพประกอบ 4.43 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 11.30 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 9.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตกตั้งนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th)  $51.86^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc)  $51.28^{\circ}\text{C}$  และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย  $0.7^{\circ}\text{C}$  ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $6.36\text{ mV}$  และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $37.32\text{ mV}$  มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ  $1059.4\text{ W m}^{-2}$



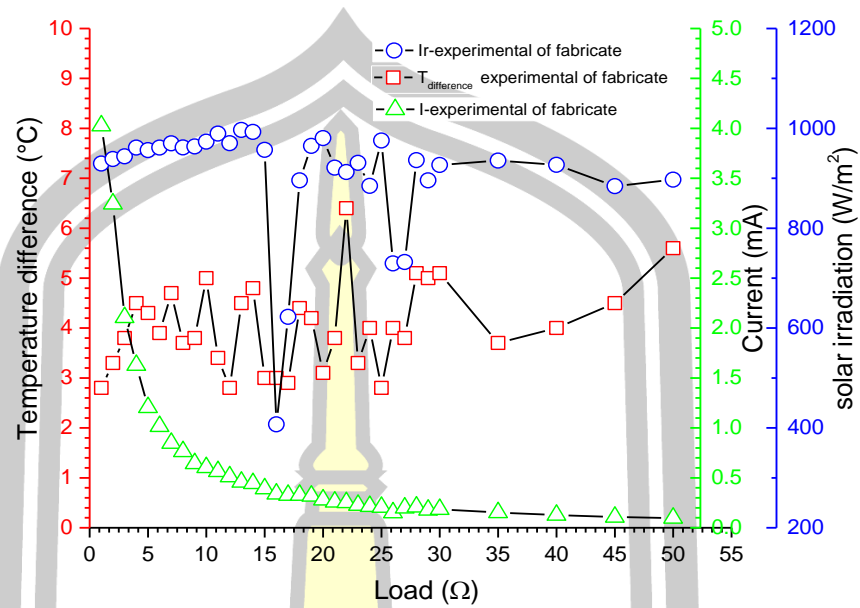


ภาพประกอบ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทานที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 6 เมษายน 2562

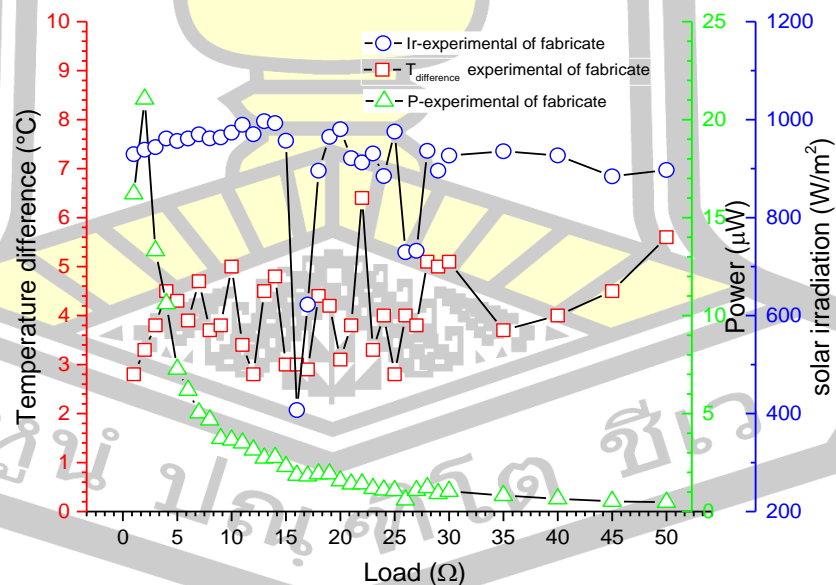
จากภาพประกอบ 4.44 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) ที่ค่าความต้านทาน 4 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 7 mV

จากภาพประกอบ 4.45 เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 4 mA

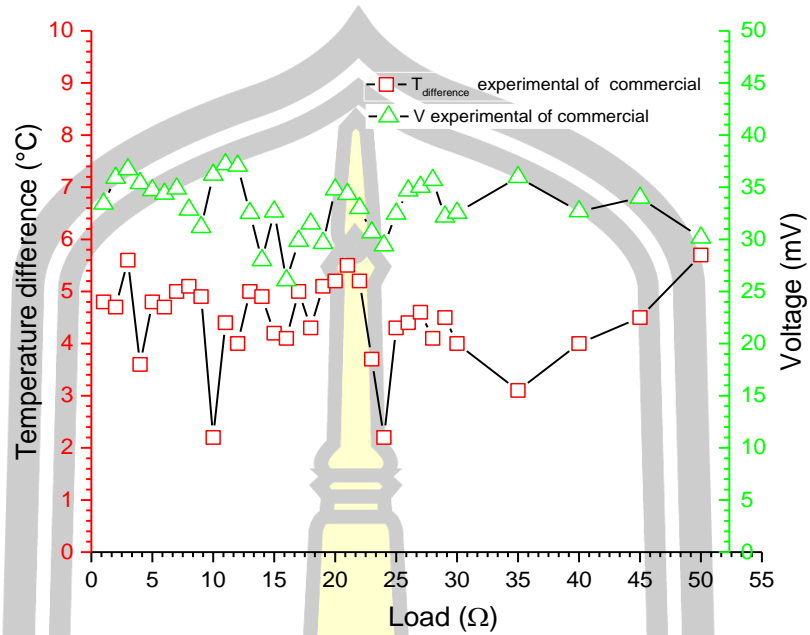
จากภาพประกอบ 4.46 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) ที่ค่าความต้านทาน 2 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $22 \mu\text{W}$



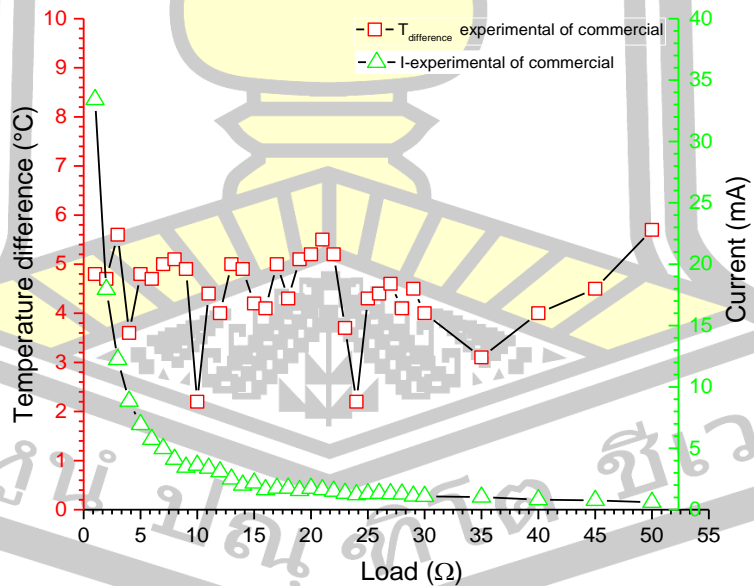
ภาพประกอบ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทานที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 6 เมษายน 2562



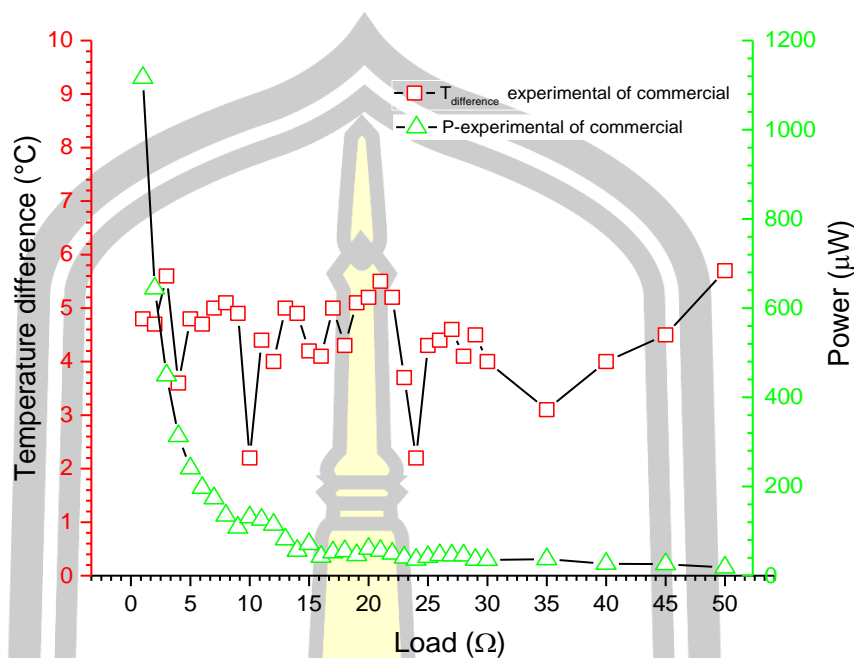
ภาพประกอบ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทานที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 6 เมษายน 2562



ภาพประกอบ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทานที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 7 เมษายน 2562



ภาพประกอบ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทานที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 7 เมษายน 2562

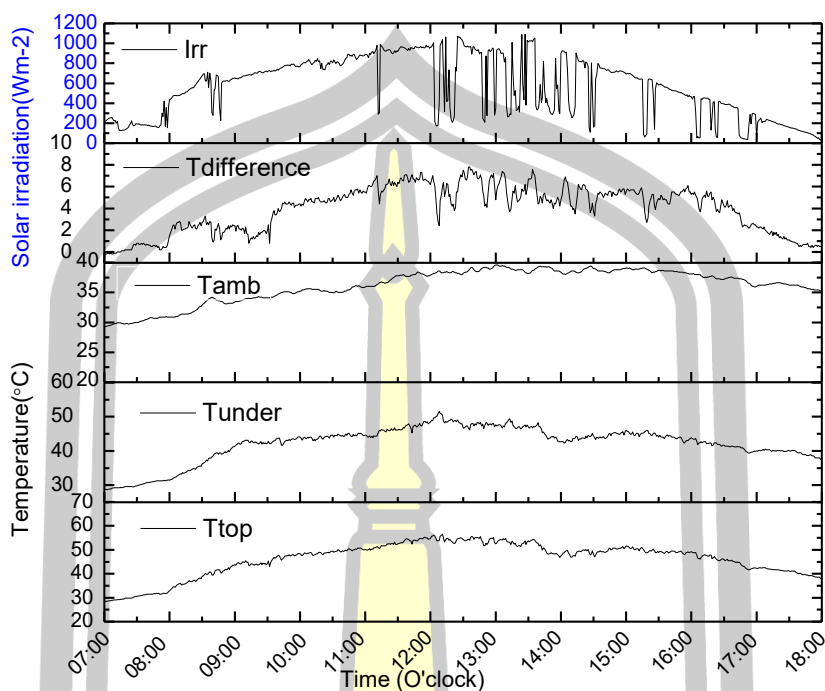


ภาพประกอบ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทานที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 7 เมษายน 2562

จากภาพประกอบ 4.47 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) ที่ค่าความต้านทาน 10 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 39 mV

จากภาพประกอบ 4.48 เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 34 mA

จากภาพประกอบ 4.49 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก กระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) ที่ค่าความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 1150  $\mu\text{W}$



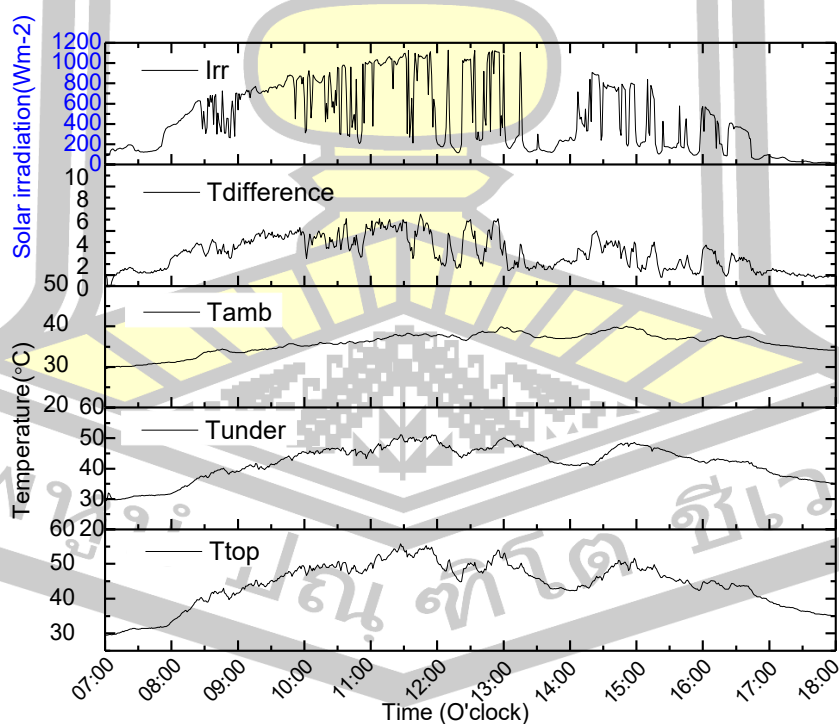
ภาพประกอบ 4.50 การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการ ทดลอง วันที่ 10 มิถุนายน 2562

การวัดอุณหภูมิดังแสดงในภาพประกอบ 4.50 วันที่ 10 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา ( $T_{upper}$ ,  $T_h$ ) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา ( $T_{under}$ ,  $T_c$ ) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $T_{different}$ ) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา ( $T_{upper}$ ,  $T_h$ ) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $T_{different}$ ) สูงสุดในเวลา 12.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา ( $T_{under}$ ,  $T_c$ ) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 12.10 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดของการทดลอง เวลา 12.30 น. และ 13.00 น. ซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด

จากภาพประกอบ 4.52 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา ( $T_{upper}$ ,  $T_h$ ) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา ( $T_{under}$ ,  $T_c$ ) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $T_{different}$ ) อุณหภูมิ ในช่วง 12.30 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิว

ด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 7.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมี ความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตกดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) 55.3 °C อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) 48.6 °C และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย 6.7°C ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด 6.7 mV และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ สูงสุด 39.4 mV ที่ความเร็วของอากาศแวดล้อม 0.7 ms<sup>-1</sup> และมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 1068.7 W m<sup>-2</sup>



ภาพประกอบ 4.51 การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิ กับเวลาทำการทดลอง วันที่ 11 มิถุนายน 2562

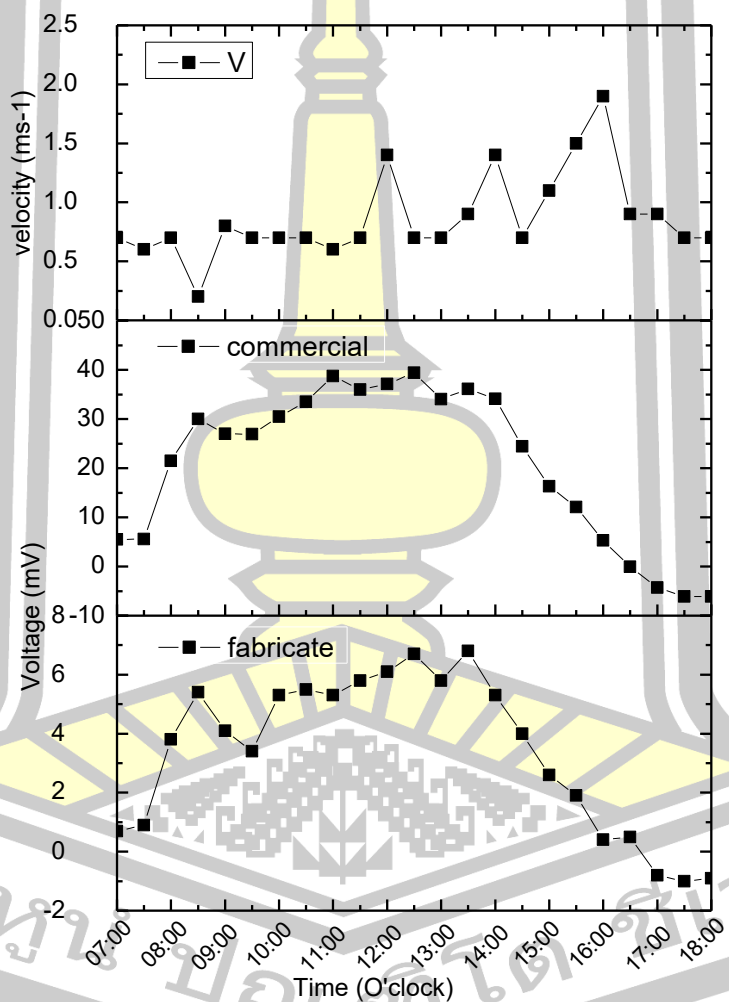
การวัดอุณหภูมิแสดงในภาพประกอบ 4.51 วันที่ 11 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T amb) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุด อาจจะเป็นเพราะในช่วงเช้าอุณหภูมิภายในใต้หลังคายังเย็นอยู่เนื่องจากมีการสะสมความเย็นในช่วงกลางคืน เมื่อเริ่มมีความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น ในตอนเที่ยงและมากที่สุดช่วงบ่าย จึงเป็นผลให้ ผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) สูงสุดในเวลา 11.30 น. ส่วนอุณหภูมิ อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) เริ่มมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 11.30 น. ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดของการทดลอง เวลา 11.30 น. และ 12.30 น. ซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด

จากภาพประกอบ 4.53 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) อุณหภูมิ ในช่วง 11.30 น. มีค่าสูงสุดทุกตำแหน่ง แสดงว่ามีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงในช่วงเวลาดังกล่าวและจะลดลงตามลำดับในช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก ส่วนค่าอุณหภูมิต่ำสุดกับผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th) ในช่วงเวลา 7.00 น. ก็เกิดจากการที่ภายในหลังคายังมีความเย็นสะสมอยู่ในเวลากลางคืน และผิวทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน

การทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดกับชุดทดลองยังคงเป็นไปตามสมมุติฐานในด้านการถ่ายเทความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกในบางช่วงเวลาของผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางและปลายเดือน ทำให้มีเมฆปกคลุม และมีฝนตกดังนั้นสภาพภูมิอากาศแวดล้อมเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การแสดงค่าการรับความร้อนของกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบยังคงแสดงศักยภาพการรับและสะสมความร้อนได้ดี โดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา (T upper, Th)  $54.0^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิผิวใต้หลังคา (T under, Tc)  $49.2^{\circ}\text{C}$  และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (T different) เฉลี่ย  $4.8^{\circ}\text{C}$  ซึ่งกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B (fabricate) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $6\text{ mV}$  และกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเชิงพาณิชย์ (Commercial) สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $37.7\text{ mV}$  ที่ความเร็วของอากาศแวดล้อม  $1.1\text{ ms}^{-1}$  และมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ  $1091.845\text{ W m}^{-2}$

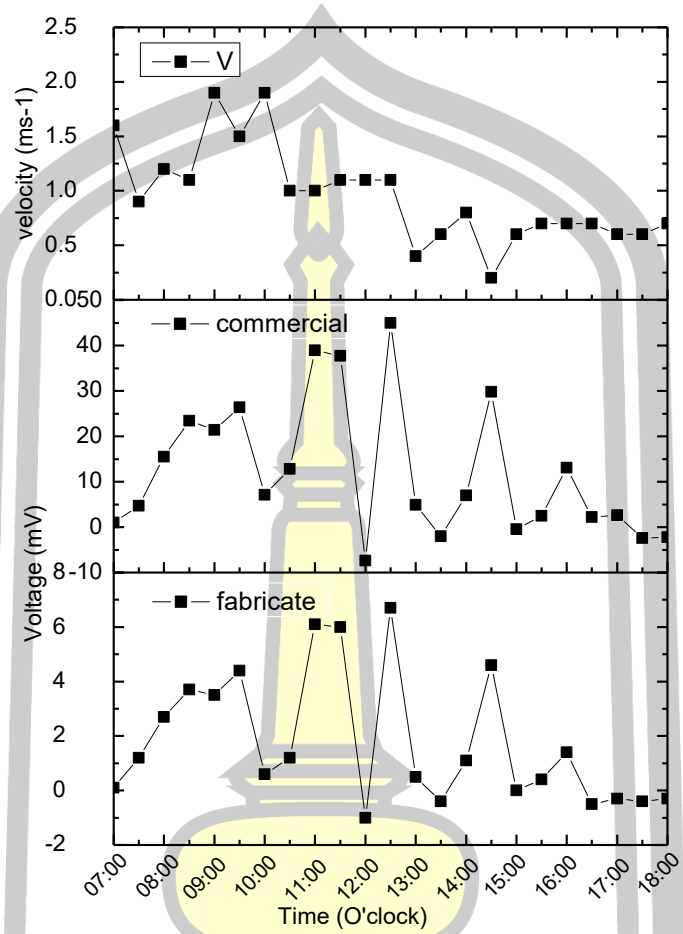
การประยุกต์กระเบื้องมุงหลังคาได้ปริมาณไฟฟ้าแตกต่างจากงานของ งานวิจัยของ พรหมพิทักษ์ อัสรางชัย (2557) [27] ธนากร (2553) [24] สมมาตร ละบายูโซ๊ะ (2556) [25] น้อยกว่า เนื่องจาก งานวิจัยของ สมมาตร ละบายูโซ๊ะ (2556) 1. มีระบบระบายความร้อน 2. มีการทาสีหลังคา

โลหะเพื่อดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ทำให้ด้านร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น 3. มีจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ประกอบกันจำนวน 4 ตัว 4. วัสดุมีการนำความร้อนได้ดี และงานวิจัยของพรหมพิทักษ์ อัสรางชัย (2557) 1. มีระบบระบายความร้อน 2. มีการทาสีทึบบนกระจกเพื่อดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ให้ด้าน ร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น 3. มีจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประกอบกันจำนวน 4 ตัว อีกทั้งประสิทธิภาพ ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก นั้นจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อวัสดุที่ติดตั้งมีความความ ร้อน(k) และมีค่าการเป็นฉนวนความร้อนที่ต่ำแต่วัสดุที่เรานำมาประดิษฐ์กระเบื้องมุงหลังคาที่มีความ ความร้อน(k) และมีค่าการเป็นฉนวนความร้อนที่สูง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต



ภาพประกอบ 4.52 การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเร็วลม และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ กับเวลาทำการทดลอง วันที่ 10 มิถุนายน 2562





ภาพประกอบ 4.53 การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเร็วลม และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้  
กับเวลาทำการทดลอง วันที่ 11 มิถุนายน 2562

พหุ ประถม ๓๒๓ ชีวะ

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะการพัฒนาและทดสอบกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อที่จะนำมาประดิษฐ์เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อพิจารณาารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ได้เป็นเฟสของสารประกอบ ชนิดเอ็น คือ  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  และชนิดพี คือ  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  หมายความว่าสารที่เตรียมได้มีความเป็นเฟสเดียวสูงมากจึงสามารถนำสารที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก โดย ZEM-3 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  ทุกช่วงอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก แสดงค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงพฤติกรรมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดพี และ เทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{Bi}_{0.58}\text{Te}_{1.42}$  ทุกช่วงอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์ ซีเบกแสดงค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยมีพาหะอิสระส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน ส่วนค่าสภาพนำไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้นการนำไฟฟ้าจะดีขึ้น พบว่า  $\text{Sb}_{0.405}\text{Te}_{0.595}$  อบที่ 378 K มี ค่าสภาพนำ ไฟฟ้าดีที่สุดเท่ากับ  $2.30 \times 10^{-5} \Omega \text{ m}$  วัดที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าตัวประกอบกำลังสูงสุดคือ  $4.83 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$  ที่อุณหภูมิ 313.16 K

5.1.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 18.0 โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ผลจำลองที่สร้างขึ้น พบว่า ที่ผลต่างของอุณหภูมิ 100 °C การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1172.87 mV

5.1.3 การทดสอบสมรรถนะของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A, B และC พบว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดของการทดลอง และการจำลองทางคณิตศาสตร์ก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยค่าผลต่างของอุณหภูมิ 100 °C ของการทดลองจะมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1603.68 mV และการจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 1172.87 mV และเมื่อ

ทำการศึกษาการต่อวงจรไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กับค่าความต้านทานที่เหมาะสม ที่ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  ของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า วงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความต้านทาน  $1\ \Omega$  มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่  $70.41\ \mu\text{W}$

5.1.4 การทดลองประสิทธิภาพของกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกโดยการประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B จากการทดลองการผลิตไฟฟ้าโดยกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลซื้อมา ซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลในเดือนมีนาคม ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2562 ในช่วงเวลาการทดลอง คือ 07:00 น. ถึง 18:00 น. พบว่า ในวันที่ 10 มิถุนายน 2562 เวลา 11.30 น. ที่อุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา  $55.3^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิ ใต้หลังคา  $48.6^{\circ}\text{C}$  และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ เฉลี่ย  $6.7^{\circ}\text{C}$  กระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล Model B สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $6.7\ \text{mV}$  และกระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลซื้อมา สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุด  $39.4\ \text{mV}$  ที่ความเร็วของอากาศแวดล้อม  $0.7\ \text{m s}^{-1}$  และมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ  $1068.7\ \text{W m}^{-2}$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวางแผนการทดลองควรกำหนดระยะเวลาในช่วงเดือนที่ปราศจากฝนซึ่งในความเป็นจริงภูมิอากาศได้เปลี่ยนแปลงทำให้ไม่สามารถคาดเดาเหตุการณ์ หรือปริมาณแสงอาทิตย์ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญของงานวิจัยนี้ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน ในเรื่องของอุณหภูมิได้

5.2.2 การเลือกใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ควรเลือกคุณภาพของผู้ผลิตที่ได้มาตรฐาน เช่น จากสหรัฐอเมริกา หรือยุโรป ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ดี เนื่องจากในงานวิจัยได้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก จากประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งคุณภาพและคุณสมบัติลดลง อาจจะไม่ตรงกับรายละเอียดประกอบสินค้า เนื่องจาก ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย

5.2.3 การเพิ่มจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล น่าจะทำให้ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ แต่ควรเพิ่มผลต่างอุณหภูมิด้วยเช่นกัน

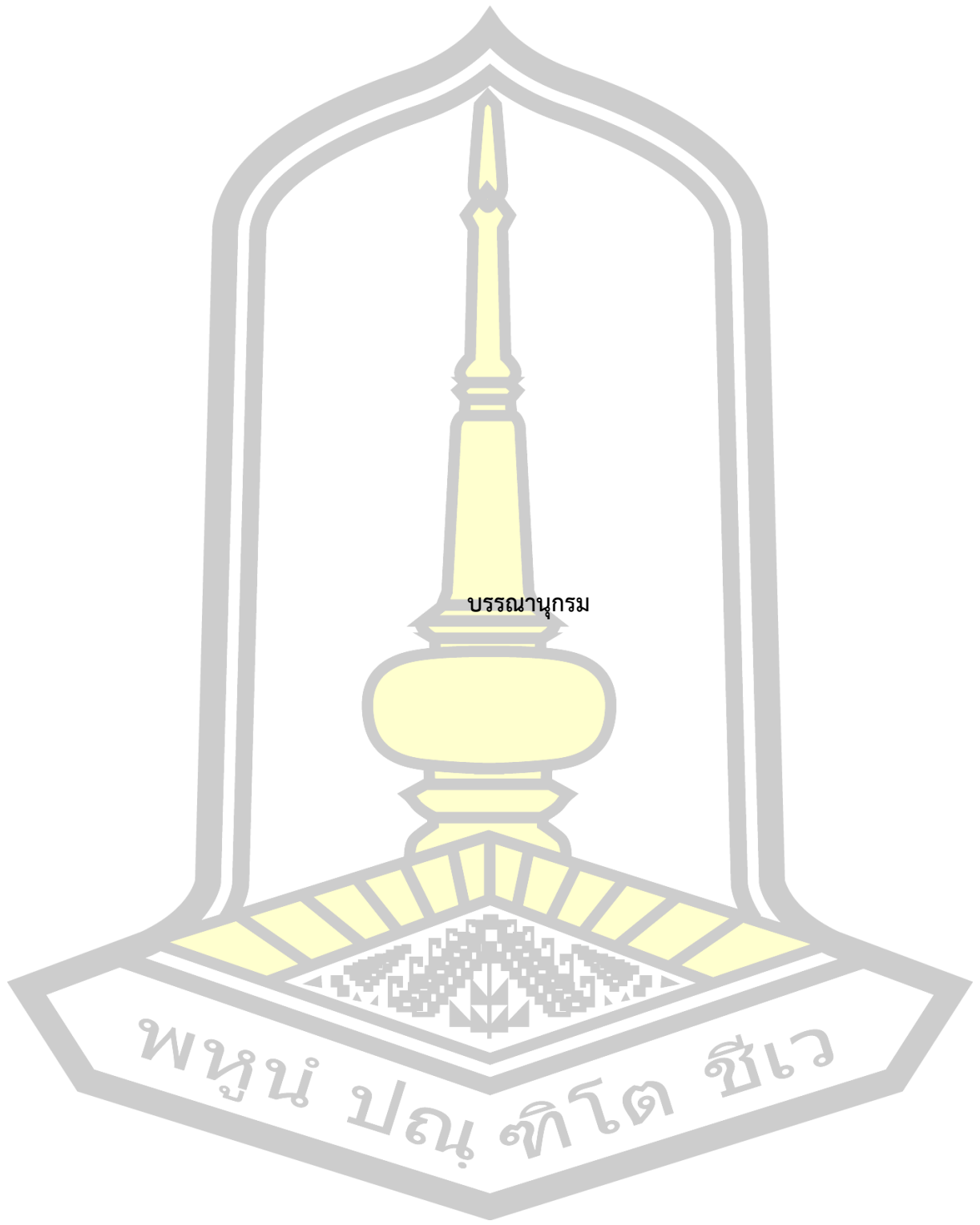
5.2.4 การเพิ่มขนาดวัสดุ ตัวประกอบอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น ความหนา และขนาดพื้นที่ของขนาดอลูมิเนียมแผ่นช่วยระบาย ซึ่งองค์ประกอบต่าง ๆ ล้วนมีความสำคัญในการพัฒนากระเบื้องมุงหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริกให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า

5.2.5 ควรนำแนวความคิดไปปรับใช้ อาทิ เช่น การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกควบคู่กับแผงโซลาร์เซลล์โดยการทำงานเป็น 2 ระบบ เป็นการสะสมพลังงานไฟฟ้า ที่ได้ในช่วงกลางวัน ไว้ใช้เพื่อแสงสว่าง ในเวลากลางคืนในพื้นที่ห่างไกล ควรมีการศึกษา ค้นคว้า ในรายละเอียดต่อไป ซึ่งจะได้ผลดีกว่าการ

นำมาใช้โดยตรง อาทิเช่น การออกแบบหลังคา 2 ชั้น สำหรับอาคารโรงงานที่มีพื้นที่หลังคาจำนวนมาก ส่วนบนใช้หลังคาเป็นสีดำ ติดตั้งชุดผลิตกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก อาศัยการระบายโดยธรรมชาติ โดยออกแบบอุปกรณ์ประกอบผลิตกระแสไฟฟ้า และการกักเก็บกระแสไฟ การแปลงกระแสไฟ เพื่อนำมาใช้งาน

5.2.6 ควรมีการออกแบบชุดผลิตกระแสไฟฟ้าโดยกระเบื้องหลังคาเทอร์โมอิเล็กทริก ประกอบด้วยส่วนรับความร้อน และส่วนผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งทั้ง 2 ส่วน จะต้องทำงานประสานกัน สอดคล้องกันทั้งการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ การประกอบติดตั้งการตรวจเช็ค การตรวจเช็คอุปกรณ์ตรวจวัดว่าอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการทราบผลหรือไม่ รวมถึงควบคุมอุณหภูมิ ในส่วนที่ไม่ต้องการ อย่างไรก็ตามธรรมชาติคือตัวแปรสำคัญ ที่จะให้งานวิจัยชิ้นนี้ประสบความสำเร็จ ความร้อน แสงแดด เมฆ ลม ฝน เหล่านี้คือตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงต้องวางแผน ตรวจสอบปรับปรุง แก้ไข โดยตลอดงานวิจัย





บรรณานุกรม

พรหม ปรณ ทิโต ชีเว

## บรรณานุกรม

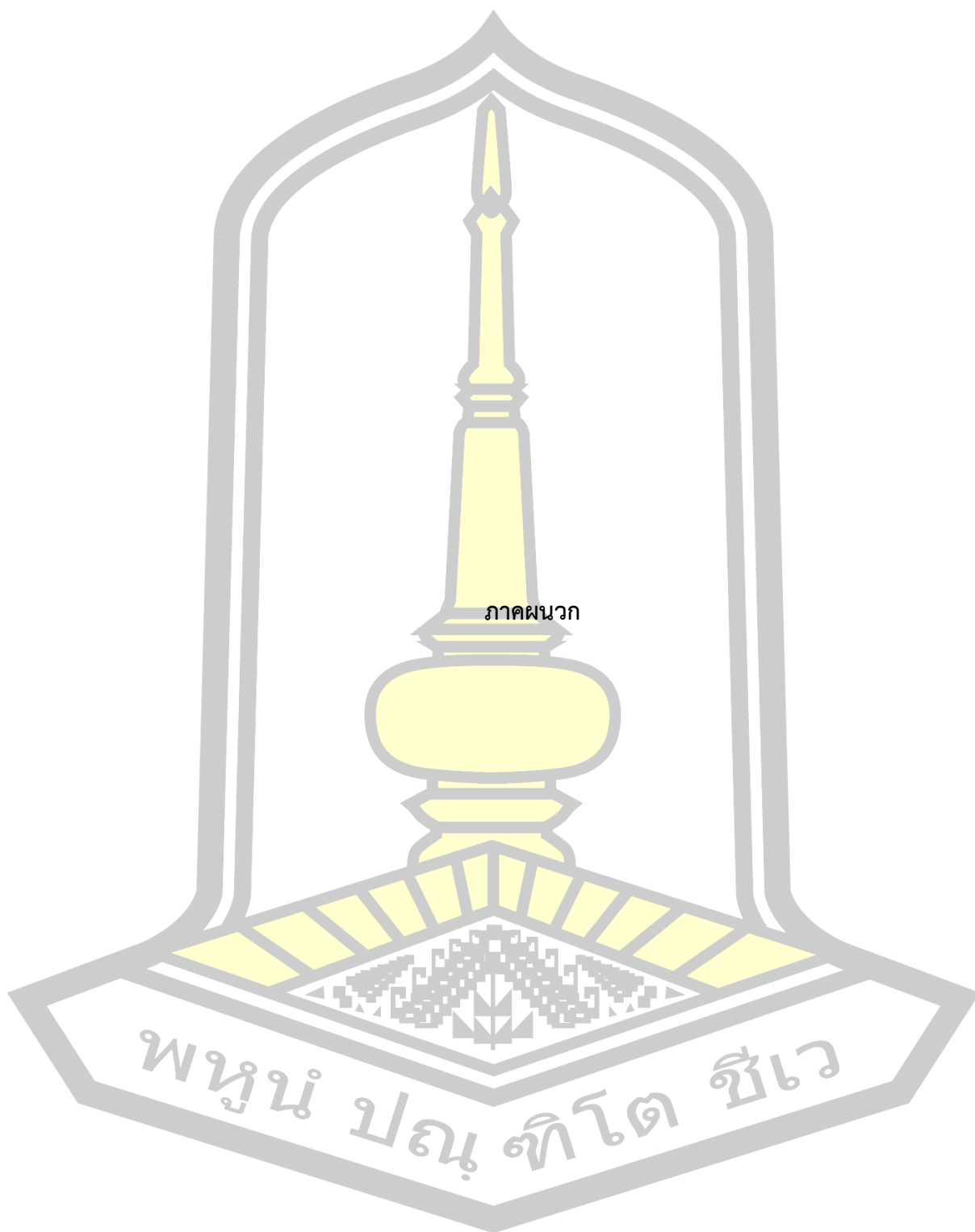
- [1] วรวิทย์ โกสลาทิพย์ และทศวัลย์ คัมภีระ, “วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกจีวและแจ้ว,” 2015. [Online]. Available: <http://webstaff.kmutt.ac.th/%7B~%7DDivorthip/TE/>. [Accessed: 12-Aug-2009].
- [2] กระทรวงพลังงานแห่งประเทศไทย, “แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี,” 2015. [Online]. Available: [http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015\\_Final\\_version.pdf](http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf). [Accessed: 19-Aug-2015].
- [3] นิตยา आयูยีน, “การออกแบบตู้ทำความเย็นและความร้อนขนาดเล็กโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก,” มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2549.
- [4] Stack Exchange, “Flexing Peltier Plate,” 2015. [Online]. Available: <http://electronics.stackexchange.com/questions/177046/flexing-peltier-plate-physical-question>. [Accessed: 23-Aug-2015].
- [5] Vwmin, “Gallery of Peltier Modules China,” 2015. [Online]. Available: <http://www.vwmin.org/peltier-modules-china.html>. [Accessed: 22-Aug-2015].
- [6] นฤชิต ธาระชนผล, เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับอุปกรณ์ส่งแบบไร้สาย. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [7] National Science Foundation, “The Best Thermoelectric Materials,” 2015. [Online]. Available: <http://chemgroups.northwestern.edu/kanatzidis/%0Agreatthermo.html%0A>. [Accessed: 22-Aug-2015].
- [8] Gregory P. Meisner, “Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive Waste Heat at GM,” 2015. [Online]. Available: [http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics\\_app\\_2011/monday/meisner.pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2011/monday/meisner.pdf). [Accessed: 19-Aug-2015].
- [9] สินเดิม ดีโต, การศึกษาประสิทธิภาพของตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริกแบบท่อนำความร้อน. ตาก: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2550.
- [10] Everredtronics, “Thermoelectric Seebeck Generator-TEG,” 2015. [Online]. Available: <http://www.everredtronics.com/TEG.html>. [Accessed: 19-Aug-2015].

- [11] Joseph Pawelski, "Next Generation Thermo Electric Systems Family of Projects," 2006. [Online]. Available: <http://edge.rit.edu/edge/P07440/public/Home>. [Accessed: 19-Aug-2015].
- [12] ณรงค์ สัจวารธนที, "การศึกษาการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนจากเตาเศรษฐกิจ," เทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.
- [13] กองวิศวกรรมการแพทย์ กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ, "การบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า," 2015. [Online]. Available: <http://medi.moph.go.th/center9/toolman/03.pdf>. [Accessed: 22-Aug-2015].
- [14] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, "การนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ (Waste Heat Recovery)," 2015. [Online]. Available: <http://www.dip.go.th/Portals/0/Thermal Energy Book/11 การนำความร้อนที่เหลือ%0A%09ทิ้งกลับมาใช้ใหม่.pdf>. [Accessed: 19-Aug-2015].
- [15] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, "Electric Power Generated from Waste Heat," 2005. [Online]. Available: [http://www.aist.go.jp/aist\\_e/list/latest\\_research/2005/20050617/20050617.html](http://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2005/20050617/20050617.html). [Accessed: 19-Aug-2015].
- [16] L.C. Ding, A. Akbarzadeh, and A. Date, "Performance and reliability of commercially available thermoelectric cells for power generation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, pp. 548–556, 2016.
- [17] A. A. Muhammad Fairuz Remeli, Abhijit Date, Bradley Orr, Lai Chet Ding, Baljit Singh, Nor Dalila Nor Affandi, "Experimental investigation of combined heat recovery and power generation using a heat pipe assisted thermoelectric generator system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 111, pp. 147–157, 2016.
- [18] P. K. Y.J. Dai, H.M. Hu, T.S. Ge, R.Z. Wang, "Investigation on a mini-CPC hybrid solar thermoelectric generator unit," *Renew. Energy*, vol. 92, pp. 83–94, 2016.
- [19] K. S. Hassan, "Heat exchanger design and development for automotive exhaust waste heat recovery using thermoelectric devices," 2012. [Online]. Available: <http://search.proquest.com/docview/1294045555?accountid=50152>. [Accessed: 19-Aug-2015].

- [20] V. Leonov, P. Fiorini, S. Sedky, T. Torfs, and C. Van Hoof, "Thermoelectric mems generators as a power supply for a body area network," in *The 13th International Conference on Solid-State Sensors*, 2005.
- [21] S. Zhou, B. G. Sammakia, B. White, and P. Borgesen, "A multiscale modeling of Thermoelectric Generators for conversion efficiency optimization," in *13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2012.
- [22] A. Bouknadel, I. Rah, and H. E. Omari, "Comparative study of fin geometries for heat sinks in natural convection," in *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2014.
- [23] M. Ekpu, R. Bhatti, N. Ekere, S. Mallik, E. Amalu, and K. Otiaba, "Investigation of effects of heat sinks on thermal performance of microelectronic package," in *International Conference on Adaptive Science and Technology (ICAST)*, 2011, pp. 127–132.
- [24] ธนากร ชัยศิริวารินทร์, "การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับคอมสัทอนแสงและพัดลมระบายอากาศ," มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [25] สมมาตร ละใบยูไซ้, "การพัฒนาหลังคาโลหะประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า," มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2556.
- [26] วริษฐา รัตมี, "ประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่นฝ้าเย็นที่ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นตัวทำความเย็น," จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [27] พรหมพิทักษ์ อัสรางชัย, "ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อใช้งานกับเปลือกอาคารและระบบผนังสองชั้นระบายอากาศ," จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [28] สุภาวดี รัตนมาศ, *หลังคาในงานสถาปัตยกรรม*. กรุงเทพฯ: นูย์บุ๊คส์, 2543.
- [29] อ.ป.ก. ดาวคู่, "กระเบื้องหลังคาว่าว," 2019. [Online]. Available: <https://apk.co.th/collections/>. [Accessed: 09-Jul-2019].
- [30] SCG, "กระเบื้องหลังคาคอนกรีต," 2019. [Online]. Available: <https://www.scgbuildingmaterials.com/th/products/8852422009206>. [Accessed: 09-Jul-2019].
- [31] E. E. Antonova and D. C. Looman, "Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS," *Int. Conf. Thermoelectr.*, pp. 215–218, 2005.

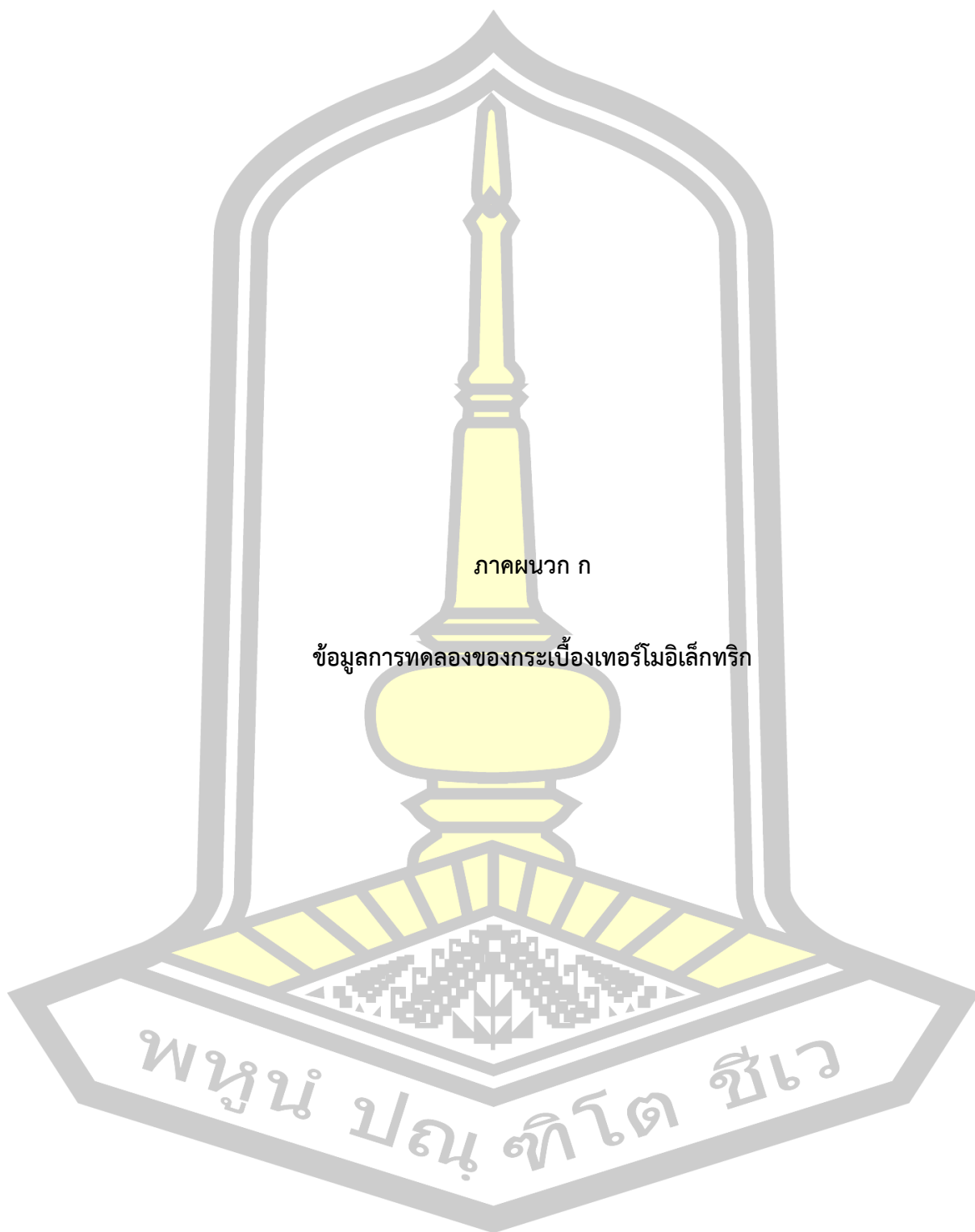


- [32] N. S. Benday, D. M. Dryden, K. Kornbluth, and P. Stroeve, "A temperature variant method for performance modelling and economic analysis of thermoelectric generators," *Appl. Energy*, vol. 190, pp. 764–771, 2017.
- [33] Jeffrey W. Fergus, "Oxide materials for high temperature thermoelectric energy conversion," *Oxide Mater. high Temp. Thermoelectr. energy Convers.*, vol. 532, pp. 525–540, 2012.
- [34] A. Mozaffari, A. M. Goudarzi, A. Fathi, and P. Samadian, "Bio-inspired methods for fast and robust arrangement of thermoelectric modulus," *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, pp. 19–34, 2013.
- [35] N. R. Kristiansen and H. K. Nielsen, "Potential for Usage of Thermoelectric Generators on Ships," *J. Electron. Mater.*, vol. 39, no. 9, pp. 1746–1749, 2010.
- [36] S. M. O'Shaughnessy, M. J. Deasy, C. E. Kinsella, J. V. Doyle, and A. J. Robinson, "Small scale electricity generation from a portable biomass cookstove: Prototype design and preliminary results," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 374–385, 2013.
- [37] กมลมาศ สิงคเสลิต, อาภาภรณ์ สุกุลภาวะเวก และราชศักดิ์ คักदानุภาพ, "อิทธิพลของอุณหภูมิที่ต่อสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์แบบบิวดงอได้เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง," *Naresuan Univ. J. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 148–155, 2016.
- [38] E.M.F. Vieira, "Enhanced thermoelectric properties of Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> films for flexible thermal sensors," *J. Alloys Compd.*, vol. 774, pp. 1102–1116, 2019.
- [39] U. Erturun, K. Erermis, and M. Karla, "Effect of various leg geometries on thermo-mechanical and power generation performance of thermoelectric devices," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, pp. 128–141, 2014.
- [40] Y. L. Mingjian Liao, Zhu He, Chengpeng Jiang, Xi'an Fan and F. Qi, "A three-dimensional model for thermoelectric generator and the influence of Peltier effect on the performance and heat transfer," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 133, pp. 493–500, 2018.



ภาคผนวก

พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว



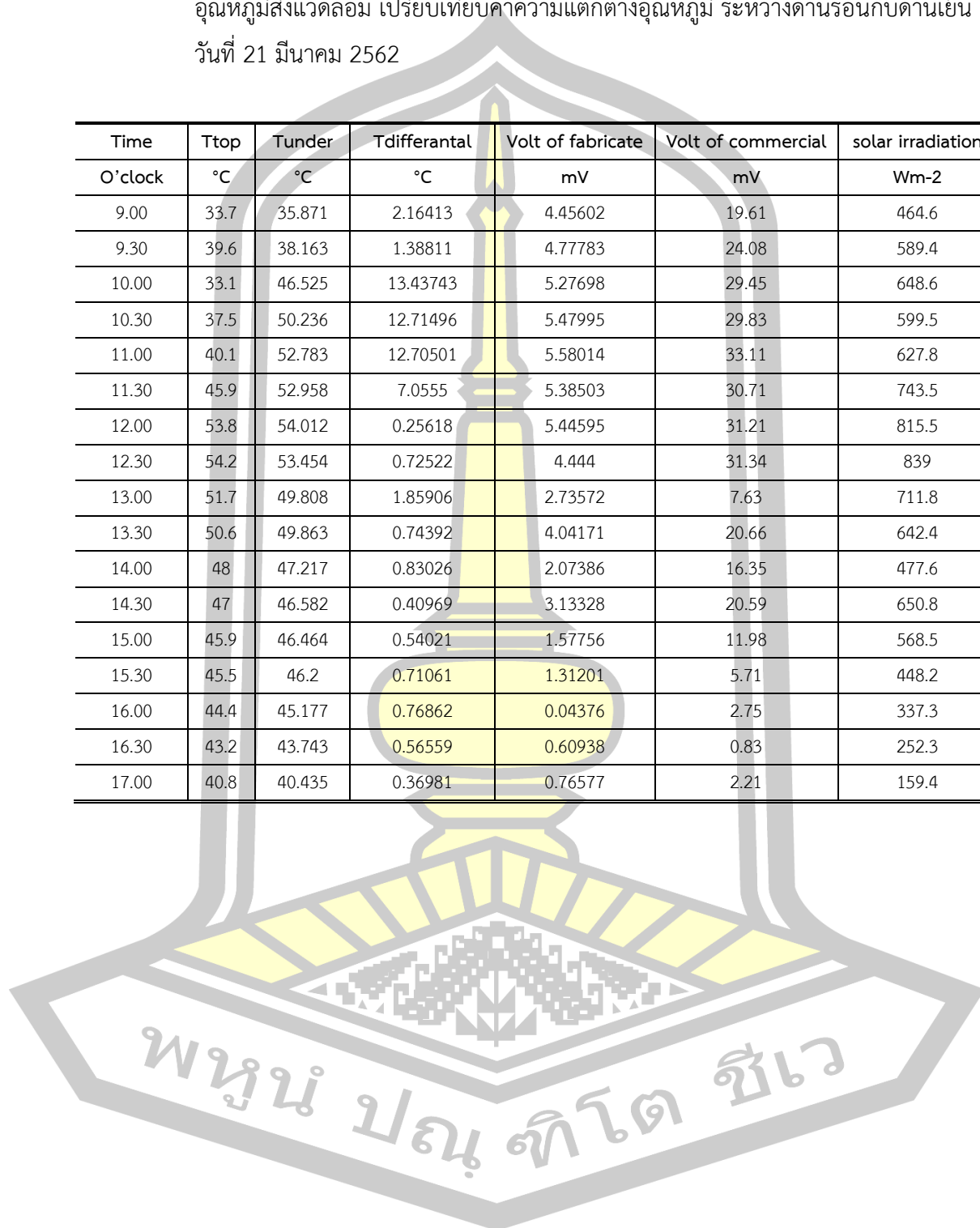
ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองของกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก

พหุพันธ์ ปณ. ที. โตะ ชีวะ

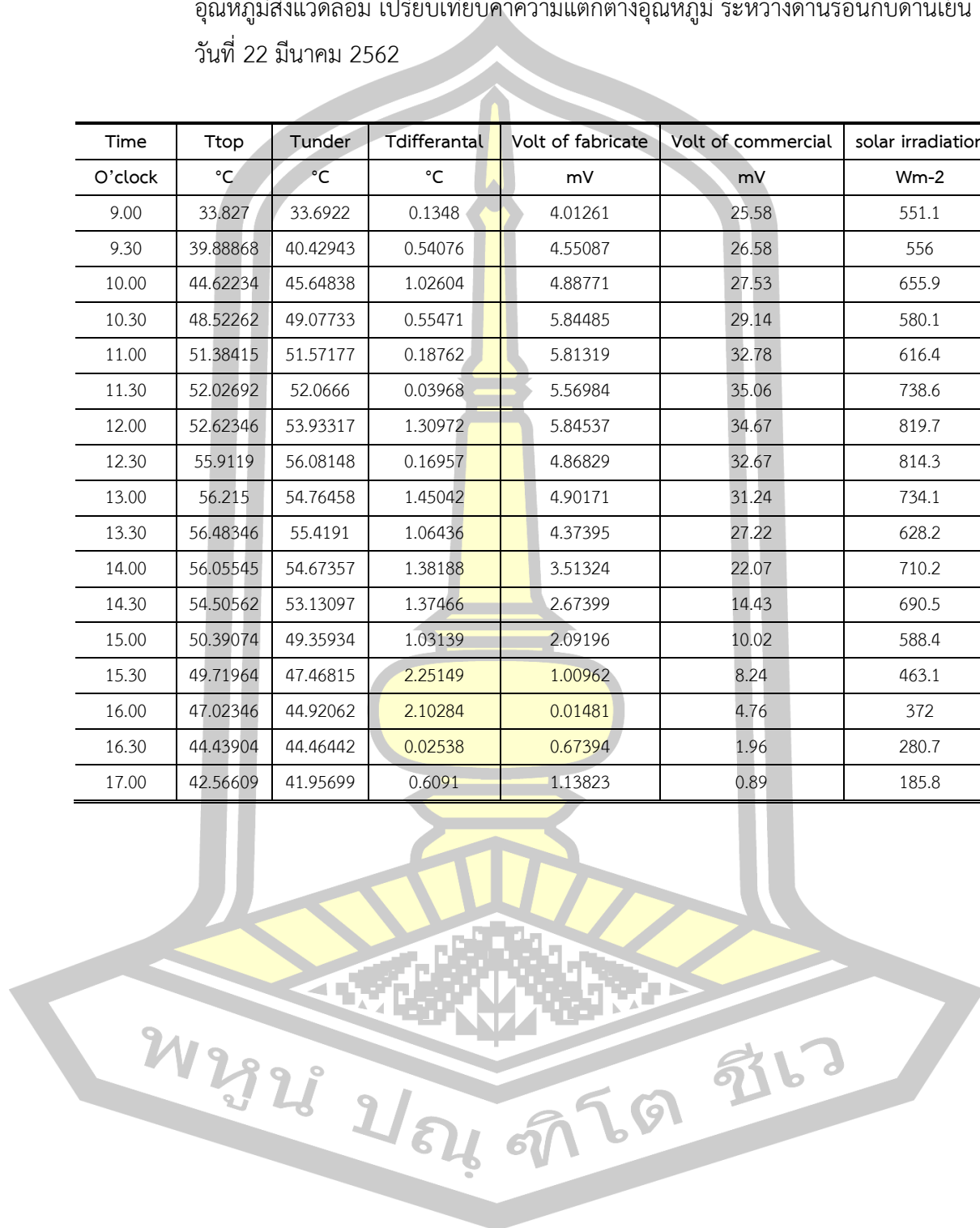
ตาราง ก.1 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 21 มีนาคม 2562

Time O'clock	Ttop °C	Tunder °C	Tdifferantal °C	Volt of fabricate mV	Volt of commercial mV	solar irradiation Wm-2
9.00	33.7	35.871	2.16413	4.45602	19.61	464.6
9.30	39.6	38.163	1.38811	4.77783	24.08	589.4
10.00	33.1	46.525	13.43743	5.27698	29.45	648.6
10.30	37.5	50.236	12.71496	5.47995	29.83	599.5
11.00	40.1	52.783	12.70501	5.58014	33.11	627.8
11.30	45.9	52.958	7.0555	5.38503	30.71	743.5
12.00	53.8	54.012	0.25618	5.44595	31.21	815.5
12.30	54.2	53.454	0.72522	4.444	31.34	839
13.00	51.7	49.808	1.85906	2.73572	7.63	711.8
13.30	50.6	49.863	0.74392	4.04171	20.66	642.4
14.00	48	47.217	0.83026	2.07386	16.35	477.6
14.30	47	46.582	0.40969	3.13328	20.59	650.8
15.00	45.9	46.464	0.54021	1.57756	11.98	568.5
15.30	45.5	46.2	0.71061	1.31201	5.71	448.2
16.00	44.4	45.177	0.76862	0.04376	2.75	337.3
16.30	43.2	43.743	0.56559	0.60938	0.83	252.3
17.00	40.8	40.435	0.36981	0.76577	2.21	159.4



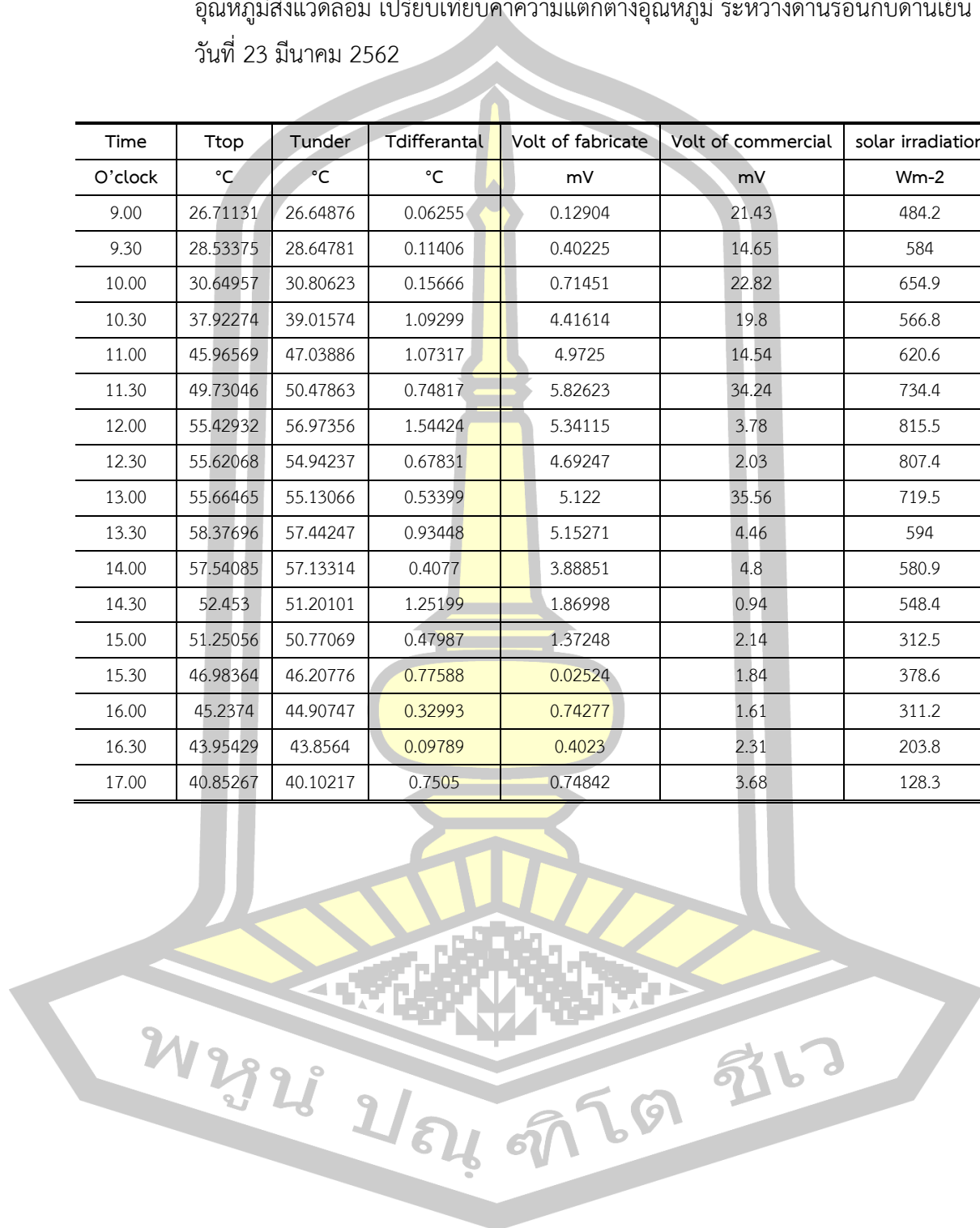
ตาราง ก.2 ค่าอุณหภูมิต้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 22 มีนาคม 2562

Time	Ttop	Tunder	Tdifferantal	Volt of fabricate	Volt of commercial	solar irradiation
O'clock	°C	°C	°C	mV	mV	Wm-2
9.00	33.827	33.6922	0.1348	4.01261	25.58	551.1
9.30	39.88868	40.42943	0.54076	4.55087	26.58	556
10.00	44.62234	45.64838	1.02604	4.88771	27.53	655.9
10.30	48.52262	49.07733	0.55471	5.84485	29.14	580.1
11.00	51.38415	51.57177	0.18762	5.81319	32.78	616.4
11.30	52.02692	52.0666	0.03968	5.56984	35.06	738.6
12.00	52.62346	53.93317	1.30972	5.84537	34.67	819.7
12.30	55.9119	56.08148	0.16957	4.86829	32.67	814.3
13.00	56.215	54.76458	1.45042	4.90171	31.24	734.1
13.30	56.48346	55.4191	1.06436	4.37395	27.22	628.2
14.00	56.05545	54.67357	1.38188	3.51324	22.07	710.2
14.30	54.50562	53.13097	1.37466	2.67399	14.43	690.5
15.00	50.39074	49.35934	1.03139	2.09196	10.02	588.4
15.30	49.71964	47.46815	2.25149	1.00962	8.24	463.1
16.00	47.02346	44.92062	2.10284	0.01481	4.76	372
16.30	44.43904	44.46442	0.02538	0.67394	1.96	280.7
17.00	42.56609	41.95699	0.6091	1.13823	0.89	185.8



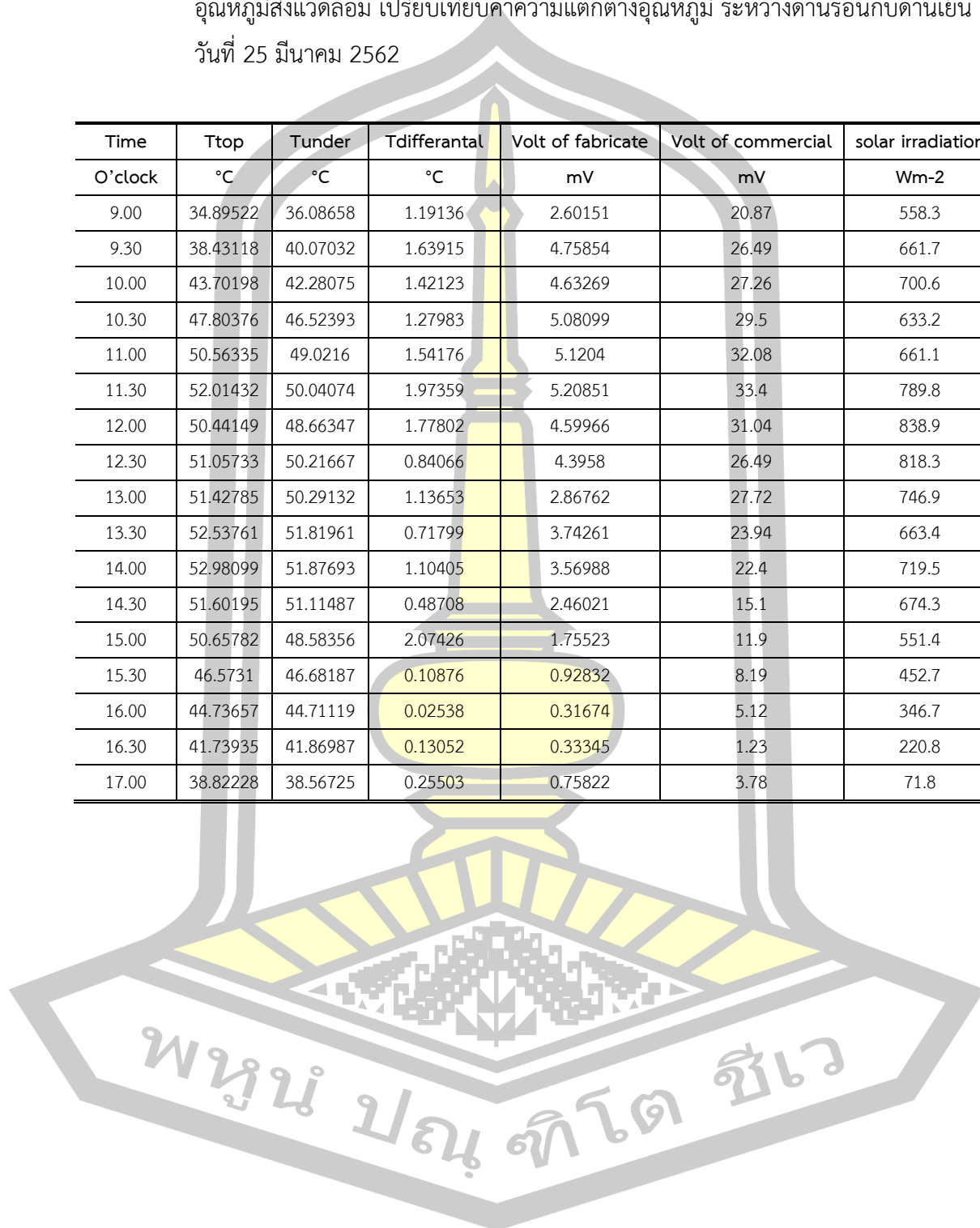
ตาราง ก.3 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 23 มีนาคม 2562

Time	Ttop	Tunder	Tdifferantal	Volt of fabricate	Volt of commercial	solar irradiation
O'clock	°C	°C	°C	mV	mV	Wm-2
9.00	26.71131	26.64876	0.06255	0.12904	21.43	484.2
9.30	28.53375	28.64781	0.11406	0.40225	14.65	584
10.00	30.64957	30.80623	0.15666	0.71451	22.82	654.9
10.30	37.92274	39.01574	1.09299	4.41614	19.8	566.8
11.00	45.96569	47.03886	1.07317	4.9725	14.54	620.6
11.30	49.73046	50.47863	0.74817	5.82623	34.24	734.4
12.00	55.42932	56.97356	1.54424	5.34115	3.78	815.5
12.30	55.62068	54.94237	0.67831	4.69247	2.03	807.4
13.00	55.66465	55.13066	0.53399	5.122	35.56	719.5
13.30	58.37696	57.44247	0.93448	5.15271	4.46	594
14.00	57.54085	57.13314	0.4077	3.88851	4.8	580.9
14.30	52.453	51.20101	1.25199	1.86998	0.94	548.4
15.00	51.25056	50.77069	0.47987	1.37248	2.14	312.5
15.30	46.98364	46.20776	0.77588	0.02524	1.84	378.6
16.00	45.2374	44.90747	0.32993	0.74277	1.61	311.2
16.30	43.95429	43.8564	0.09789	0.4023	2.31	203.8
17.00	40.85267	40.10217	0.7505	0.74842	3.68	128.3



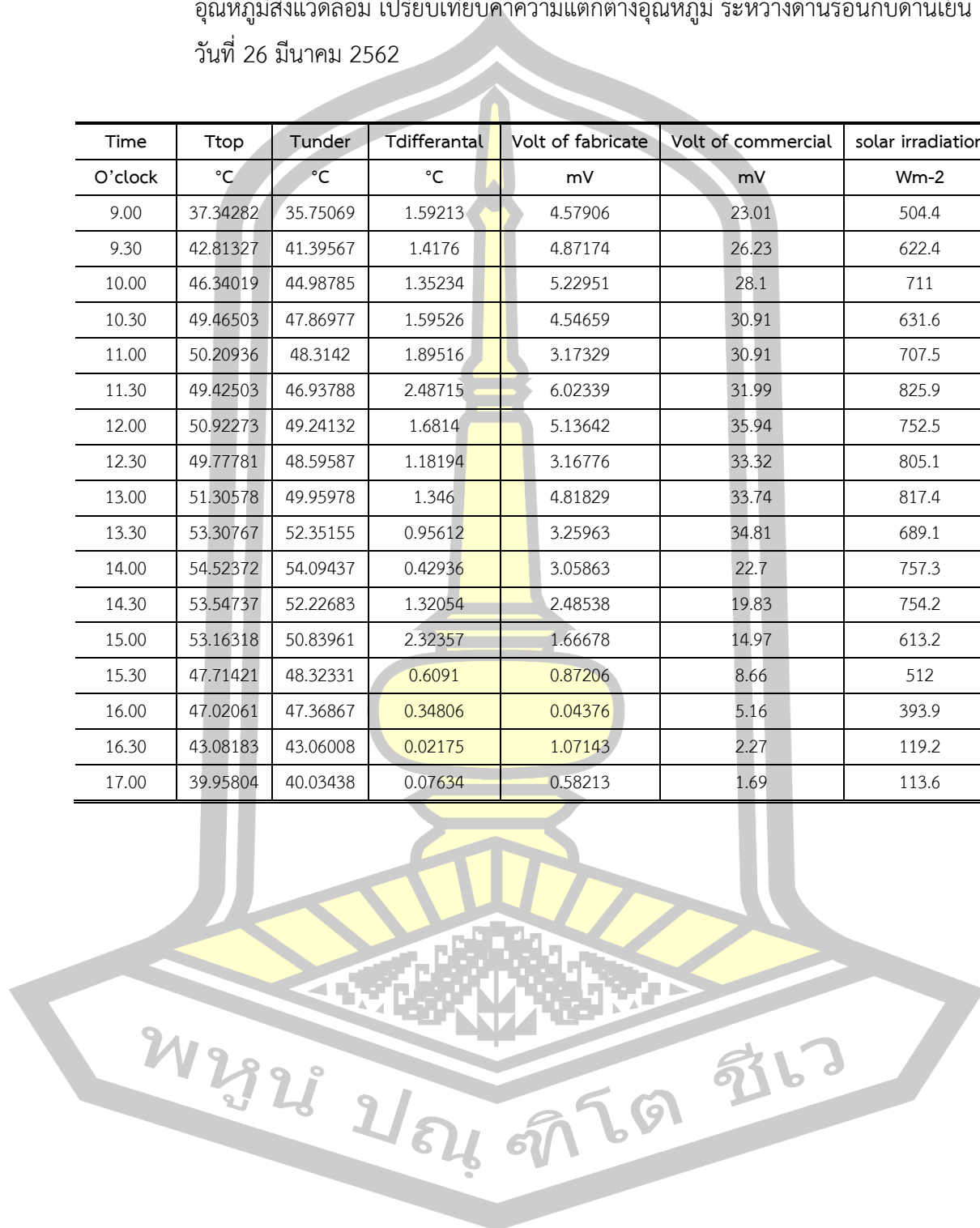
ตาราง ก.4 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 25 มีนาคม 2562

Time	Ttop	Tunder	Tdifferantal	Volt of fabricate	Volt of commercial	solar irradiation
O'clock	°C	°C	°C	mV	mV	Wm-2
9.00	34.89522	36.08658	1.19136	2.60151	20.87	558.3
9.30	38.43118	40.07032	1.63915	4.75854	26.49	661.7
10.00	43.70198	42.28075	1.42123	4.63269	27.26	700.6
10.30	47.80376	46.52393	1.27983	5.08099	29.5	633.2
11.00	50.56335	49.0216	1.54176	5.1204	32.08	661.1
11.30	52.01432	50.04074	1.97359	5.20851	33.4	789.8
12.00	50.44149	48.66347	1.77802	4.59966	31.04	838.9
12.30	51.05733	50.21667	0.84066	4.3958	26.49	818.3
13.00	51.42785	50.29132	1.13653	2.86762	27.72	746.9
13.30	52.53761	51.81961	0.71799	3.74261	23.94	663.4
14.00	52.98099	51.87693	1.10405	3.56988	22.4	719.5
14.30	51.60195	51.11487	0.48708	2.46021	15.1	674.3
15.00	50.65782	48.58356	2.07426	1.75523	11.9	551.4
15.30	46.5731	46.68187	0.10876	0.92832	8.19	452.7
16.00	44.73657	44.71119	0.02538	0.31674	5.12	346.7
16.30	41.73935	41.86987	0.13052	0.33345	1.23	220.8
17.00	38.82228	38.56725	0.25503	0.75822	3.78	71.8



ตาราง ก.5 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 26 มีนาคม 2562

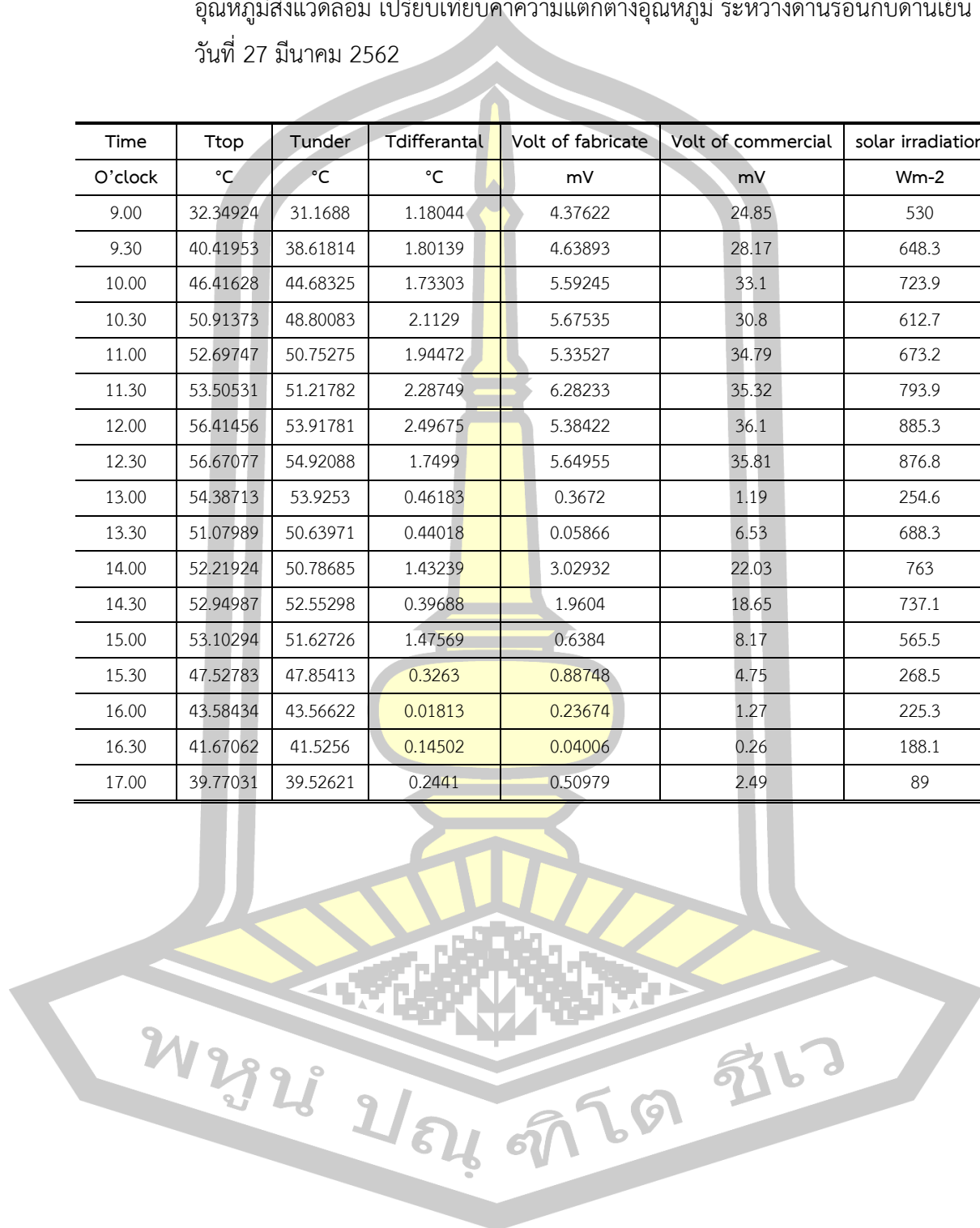
Time	Ttop	Tunder	Tdifferantal	Volt of fabricate	Volt of commercial	solar irradiation
O'clock	°C	°C	°C	mV	mV	Wm-2
9.00	37.34282	35.75069	1.59213	4.57906	23.01	504.4
9.30	42.81327	41.39567	1.4176	4.87174	26.23	622.4
10.00	46.34019	44.98785	1.35234	5.22951	28.1	711
10.30	49.46503	47.86977	1.59526	4.54659	30.91	631.6
11.00	50.20936	48.3142	1.89516	3.17329	30.91	707.5
11.30	49.42503	46.93788	2.48715	6.02339	31.99	825.9
12.00	50.92273	49.24132	1.6814	5.13642	35.94	752.5
12.30	49.77781	48.59587	1.18194	3.16776	33.32	805.1
13.00	51.30578	49.95978	1.346	4.81829	33.74	817.4
13.30	53.30767	52.35155	0.95612	3.25963	34.81	689.1
14.00	54.52372	54.09437	0.42936	3.05863	22.7	757.3
14.30	53.54737	52.22683	1.32054	2.48538	19.83	754.2
15.00	53.16318	50.83961	2.32357	1.66678	14.97	613.2
15.30	47.71421	48.32331	0.6091	0.87206	8.66	512
16.00	47.02061	47.36867	0.34806	0.04376	5.16	393.9
16.30	43.08183	43.06008	0.02175	1.07143	2.27	119.2
17.00	39.95804	40.03438	0.07634	0.58213	1.69	113.6





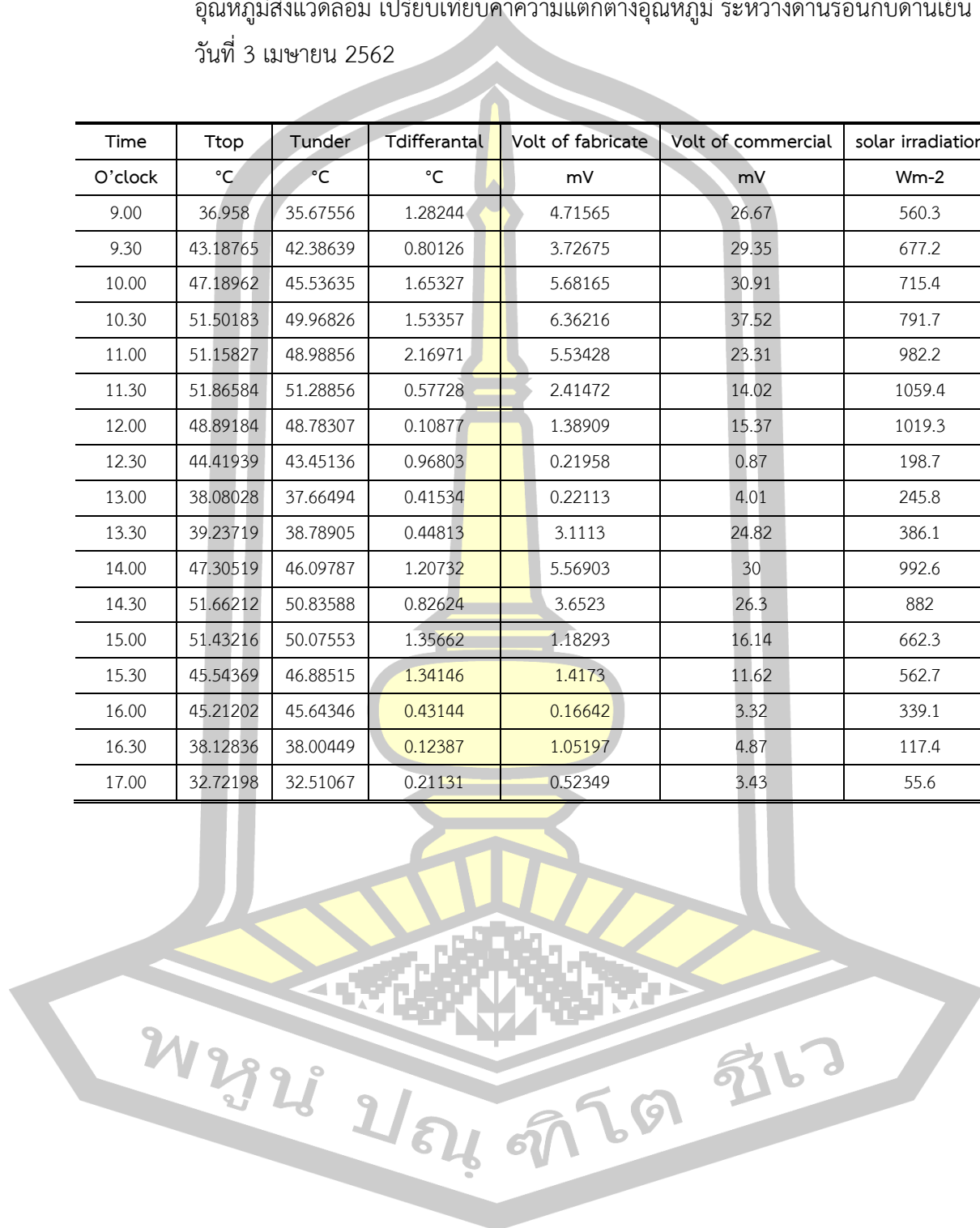
ตาราง ก.6 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 27 มีนาคม 2562

Time	Ttop	Tunder	Tdifferantal	Volt of fabricate	Volt of commercial	solar irradiation
O'clock	°C	°C	°C	mV	mV	Wm-2
9.00	32.34924	31.1688	1.18044	4.37622	24.85	530
9.30	40.41953	38.61814	1.80139	4.63893	28.17	648.3
10.00	46.41628	44.68325	1.73303	5.59245	33.1	723.9
10.30	50.91373	48.80083	2.1129	5.67535	30.8	612.7
11.00	52.69747	50.75275	1.94472	5.33527	34.79	673.2
11.30	53.50531	51.21782	2.28749	6.28233	35.32	793.9
12.00	56.41456	53.91781	2.49675	5.38422	36.1	885.3
12.30	56.67077	54.92088	1.7499	5.64955	35.81	876.8
13.00	54.38713	53.9253	0.46183	0.3672	1.19	254.6
13.30	51.07989	50.63971	0.44018	0.05866	6.53	688.3
14.00	52.21924	50.78685	1.43239	3.02932	22.03	763
14.30	52.94987	52.55298	0.39688	1.9604	18.65	737.1
15.00	53.10294	51.62726	1.47569	0.6384	8.17	565.5
15.30	47.52783	47.85413	0.3263	0.88748	4.75	268.5
16.00	43.58434	43.56622	0.01813	0.23674	1.27	225.3
16.30	41.67062	41.5256	0.14502	0.04006	0.26	188.1
17.00	39.77031	39.52621	0.2441	0.50979	2.49	89



ตาราง ก.7 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 3 เมษายน 2562

Time	Ttop	Tunder	Tdifferantal	Volt of fabricate	Volt of commercial	solar irradiation
O'clock	°C	°C	°C	mV	mV	Wm-2
9.00	36.958	35.67556	1.28244	4.71565	26.67	560.3
9.30	43.18765	42.38639	0.80126	3.72675	29.35	677.2
10.00	47.18962	45.53635	1.65327	5.68165	30.91	715.4
10.30	51.50183	49.96826	1.53357	6.36216	37.52	791.7
11.00	51.15827	48.98856	2.16971	5.53428	23.31	982.2
11.30	51.86584	51.28856	0.57728	2.41472	14.02	1059.4
12.00	48.89184	48.78307	0.10877	1.38909	15.37	1019.3
12.30	44.41939	43.45136	0.96803	0.21958	0.87	198.7
13.00	38.08028	37.66494	0.41534	0.22113	4.01	245.8
13.30	39.23719	38.78905	0.44813	3.1113	24.82	386.1
14.00	47.30519	46.09787	1.20732	5.56903	30	992.6
14.30	51.66212	50.83588	0.82624	3.6523	26.3	882
15.00	51.43216	50.07553	1.35662	1.18293	16.14	662.3
15.30	45.54369	46.88515	1.34146	1.4173	11.62	562.7
16.00	45.21202	45.64346	0.43144	0.16642	3.32	339.1
16.30	38.12836	38.00449	0.12387	1.05197	4.87	117.4
17.00	32.72198	32.51067	0.21131	0.52349	3.43	55.6



ตาราง ก.8 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 10 มิถุนายน 2562

Time	Ttop	Tunder	Tamb	Tdiff	solar irradiation	Volt of commercial	Volt of fabricate	velocity
O'clock	°C	°C	°C	°C	Wm-2	mV	mV	m/s
07:00	28.4	28.7	29.2	-0.3	214.5	5.51	0.7	0.7
07:30	29.8	29.6	29.8	0.2	222.6	5.58	0.9	0.6
08:00	34.4	32.3	30.9	2.1	476.4	21.5	3.8	0.7
08:30	39.8	37.1	33.7	2.7	709.0	30	5.4	0.2
09:00	43.8	41.4	33.4	2.4	654.1	27	4.1	0.8
09:30	44.3	42.3	34.1	2.0	714.2	26.9	3.4	0.7
10:00	48.4	44.0	35.2	4.4	767.4	30.5	5.3	0.7
10:30	49.5	44.7	35	4.8	804.3	33.5	5.5	0.7
11:00	51.1	44.3	36.2	6.8	943.3	38.7	5.3	0.6
11:30	53.4	46.9	38	6.5	961.4	36	5.8	0.7
12:00	55.3	48.6	37.9	6.7	955.4	37.1	6.1	1.4
12:30	54.6	49.1	38.2	5.5	1068.7	39.4	6.7	0.7
13:00	54.2	47.3	39.4	6.9	897.0	34	5.8	0.7
13:30	54.3	46.7	38.7	7.6	1014.6	36.1	6.8	0.9
14:00	48.6	42.7	38.1	5.9	923.6	34.1	5.3	1.4
14:30	49.0	43.8	38.5	5.2	745.9	24.4	4	0.7
15:00	50.7	45.0	38.9	5.7	686.7	16.3	2.6	1.1
15:30	48.9	44.0	38.7	4.9	583.7	12.1	1.9	1.5
16:00	49.2	43.9	38.1	5.3	465.2	5.3	0.4	1.9
16:30	45.9	41.7	37.2	4.2	392.3	-0.1	0.5	0.9
17:00	42.3	40.0	36	2.3	45.5	-4.3	-0.8	0.9
17:30	41.1	40.2	36.2	0.9	145.1	-6.1	-1	0.7
18:00	37.9	37.4	35.2	0.5	18.9	-6.1	-0.9	0.7

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตาราง ก.9 ค่าอุณหภูมิด้านบนกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านล่างกระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริก และ  
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น  
วันที่ 11 มิถุนายน 2562

Time	Ttop	Tunder	Tamb	Tdiff	solar irradiation	Volt of commercial	Volt of fabricate	velocity
O'clock	°C	°C	°C	°C	Wm-2	mV	mV	m/s
07:00	29.5	29.5	29.6	0.0	90.1	1	0.1	1.6
07:30	31.2	31.0	30.4	0.2	140.7725	4.7	1.2	0.9
08:00	33.3	31.8	31.1	1.5	383.691	15.5	2.7	1.2
08:30	39.3	37.4	33.6	1.9	426.6094	23.4	3.7	1.1
09:00	41.6	39.0	33.5	2.6	538.1974	21.4	3.5	1.9
09:30	45.2	41.6	34.4	3.6	761.3734	26.4	4.4	1.5
10:00	49.0	45.4	35.2	3.6	651.5021	7.1	0.6	1.9
10:30	49.8	46.7	35.9	3.1	962.2318	12.8	1.2	1
11:00	50.3	46.3	36.3	4.0	1004.292	38.9	6.1	1
11:30	54.0	49.2	37.8	4.8	1091.845	37.7	6	1.1
12:00	50.8	49.3	37.9	1.5	218.8841	-7.4	-1	1.1
12:30	50.3	45.3	37.4	5.0	1038.627	45	6.7	1.1
13:00	49.6	49.2	39.6	0.4	168.2403	4.9	0.5	0.4
13:30	45.8	44.7	37.2	1.1	149.3562	-2	-0.4	0.6
14:00	42.3	41.2	37.1	1.1	270.3863	7	1.1	0.8
14:30	49.1	46.5	39.7	2.6	759.6567	29.8	4.6	0.2
15:00	48.6	47.7	39.3	0.9	214.5923	-0.5	0	0.6
15:30	45.2	44.0	36.8	1.2	212.0172	2.5	0.4	0.7
16:00	44.6	42.0	36.3	2.6	569.0987	13.1	1.4	0.7
16:30	43.6	42.4	37.5	1.2	327.0386	2.2	-0.5	0.7
17:00	38.6	38.2	35.5	0.4	63.51931	2.6	-0.3	0.6
17:30	36.0	36.1	34.5	-0.1	20.60086	-2.4	-0.4	0.6
18:00	34.9	35.0	34.1	-0.1	13.73391	-2.2	-0.3	0.7

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตาราง ก.10 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทาน  
ที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 6 เมษายน 2562

Load	Tdifftemp	V <sub>out</sub>	I <sub>out</sub>	P <sub>out</sub>
$\Omega$	$^{\circ}\text{C}$	(mV)	(mA)	(mW)
1	2.8	4.0268	4.0268	16.21514
2	3.3	6.48898	3.24449	21.0534
3	3.8	6.32048	2.10683	13.31615
4	4.5	6.5145	1.62862	10.60966
5	4.3	6.02714	1.20543	7.26527
6	3.9	6.09569	1.01595	6.19291
7	4.7	5.93685	0.84812	5.03517
8	3.7	6.11424	0.76428	4.67299
9	3.8	5.79465	0.64385	3.73088
10	5	6.04065	0.60406	3.64894
11	3.4	6.20534	0.56412	3.50057
12	2.8	6.14236	0.51186	3.14405
13	4.5	5.96107	0.45854	2.73341
14	4.8	6.21814	0.44415	2.7618
15	3	5.86977	0.39132	2.29694
16	3	5.44149	0.34009	1.85061
17	2.9	5.56413	0.3273	1.82115
18	4.4	5.88841	0.32713	1.9263
19	4.2	6.04144	0.31797	1.921
20	3.1	5.60854	0.28043	1.57279
21	3.8	5.43106	0.25862	1.40459
22	6.4	5.57564	0.25344	1.41308
23	3.3	5.19939	0.22606	1.17538
24	4	5.14887	0.21454	1.10462
25	2.8	5.1736	0.20694	1.07065
26	4	3.93219	0.15124	0.5947
27	3.8	5.38871	0.19958	1.07549
28	5.1	5.85052	0.20895	1.22245
29	5	5.15692	0.17782	0.91703
30	5.1	5.55893	0.1853	1.03006
35	3.7	5.36085	0.15317	0.8211
40	4	5.10301	0.12758	0.65102
45	4.5	4.85465	0.10788	0.52373
50	5.6	4.8686	0.09737	0.47407

ตาราง ก.11 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิ และไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองกับกับตัวต้านทาน  
ที่เหมาะสม ทำการทดลองวันที่ 7 เมษายน 2562

Load	Tdifftemp	V <sub>out</sub>	I <sub>out</sub>	P <sub>out</sub>
$\Omega$	$^{\circ}\text{C}$	(mV)	(mA)	(mW)
1	4.8	33.41517	33.41517	1116.5735
2	4.7	35.89619	17.9481	644.2683
3	5.6	36.71543	12.23848	449.34094
4	3.6	35.38015	8.84504	312.9387
5	4.8	34.70324	6.94065	240.863
6	4.7	34.36128	5.72688	196.78296
7	5	34.86368	4.98053	173.63942
8	5.1	32.84178	4.10522	134.82283
9	4.9	31.16441	3.46271	107.91338
10	2.2	36.18521	3.61852	130.93692
11	4.4	37.19617	3.38147	125.77775
12	4	37.05433	3.08786	114.41863
13	5	32.52937	2.50226	81.39691
14	4.9	27.98155	1.99868	55.92621
15	4.2	32.66027	2.17735	71.11286
16	4.1	26.06668	1.62917	42.46699
17	5	29.85217	1.75601	52.42071
18	4.3	31.51439	1.7508	55.17537
19	5.1	29.64659	1.56035	46.25895
20	5.2	34.77846	1.73892	60.47707
21	5.5	34.33165	1.63484	56.12676
22	5.2	32.99604	1.49982	49.48813
23	3.7	30.65528	1.33284	40.85854
24	2.2	29.4142	1.22559	36.04981
25	4.3	32.45425	1.29817	42.13114
26	4.4	34.67382	1.33361	46.24129
27	4.6	35.03388	1.29755	45.45824
28	4.1	35.67526	1.27412	45.45443
29	4.5	32.17403	1.10945	35.69546
30	4	32.53767	1.08459	35.29
35	3.1	35.96788	1.02765	36.96253
40	4	32.68596	0.81715	26.70931
45	4.5	33.97748	0.75506	25.65487
50	5.7	30.16214	0.60324	18.19509

ตาราง ก.12 ค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model A

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
0.59605	2.58314	0	4.04E-12
0.66595	2.64619	1	4.22607
0.72482	2.70688	2	8.45214
0.75426	2.76765	3	12.67821
0.76161	2.82581	4	16.90428
0.78001	2.87858	5	21.13035
0.82416	2.93323	6	25.35642
0.88671	2.98582	7	29.58249
0.84256	3.03148	8	33.80856
0.83888	3.07714	9	42.2607
0.89039	3.12456	10	46.48677
0.91247	3.16928	11	50.71284
0.94558	3.21221	12	54.93891
0.98605	3.25494	13	59.16498
1.01181	3.29479	14	63.39104
1.0486	3.33295	15	67.61712
1.07435	3.3702	16	71.84318
1.05596	3.40704	17	76.06926
1.07067	3.44138	18	80.29532
1.11851	3.47517	19	84.5214
1.07804	3.50232	20	88.74746
1.03756	3.53182	21	92.97354
1.067	3.55956	22	97.1996
1.12587	3.58927	23	101.42568
1.15162	3.61778	24	105.65174
1.18105	3.64541	25	109.87782
1.21417	3.67253	26	114.10388
1.19209	3.69743	27	118.32996
1.14794	3.72093	28	122.54619
1.1369	3.74516	29	126.77875
1.1737	3.77091	30	131.01178
1.21049	3.79276	31	135.25218
1.22889	3.81268	32	139.49345
1.25096	3.83261	33	143.73983

ตาราง ก.12 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
1.2804	3.85567	34	147.99009
1.31351	3.88071	35	152.24166
1.32455	3.89927	36	156.50037
1.32455	3.92151	37	160.76197
1.3503	3.94273	38	165.02531
1.36502	3.96509	39	169.29303
1.37606	3.98546	40	173.56686
1.39445	4.00474	41	177.84278
1.42021	4.02438	42	182.12077
1.42757	4.04068	43	186.40281
1.41285	4.05527	44	190.69196
1.42021	4.07472	45	194.9835
1.44964	4.09441	46	199.27745
1.44596	4.10712	47	203.57379
1.44964	4.12438	48	207.8739
1.44964	4.14144	49	212.18196
1.457	4.15708	50	216.49271
1.50115	4.173	51	220.80615
1.51955	4.18856	52	225.12229
1.53059	4.20458	53	229.44112
1.5637	4.2199	54	233.76267
1.57106	4.23511	55	238.09168
1.58946	4.25064	56	242.42556
1.60417	4.2663	57	246.76239
1.61521	4.28181	58	251.10215
1.64097	4.2964	59	255.44488
1.6704	4.31193	60	259.79054
1.6888	4.32482	61	264.13915
1.69983	4.33922	62	268.4907
1.69616	4.35119	63	272.8464
1.73663	4.36539	64	277.21047
1.72559	4.3786	65	281.57786
1.73295	4.39169	66	285.94837
1.7771	4.40446	67	290.32207
1.78814	4.41762	68	294.69889



ตาราง ก.12 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
1.82861	4.43013	69	299.07891
1.83229	4.44329	70	303.46209
1.85069	4.45481	71	307.84842
1.86908	4.46843	72	312.23795
1.85805	4.48101	73	316.63063
1.87276	4.4921	74	321.02653
1.8654	4.50425	75	325.42789
1.88012	4.51519	76	329.83673
1.85805	4.52596	77	334.24893
1.88012	4.53776	78	338.66444
1.95739	4.55033	79	343.08332
1.93163	4.56332	80	347.49964
1.96107	4.57664	81	351.90275
1.95739	4.58477	82	356.30873
1.9721	4.59493	83	360.71751
2.03098	4.60557	84	365.12911
2.03097	4.61638	85	369.54352
2.01626	4.62442	86	373.95477
1.97946	4.63225	87	378.35231
1.96107	4.63717	88	382.75221
2.05305	4.64505	89	387.15443
2.08616	4.65255	90	391.55906
2.08984	4.65848	91	395.96602
2.08248	4.66696	92	400.37784
2.06409	4.67346	93	404.78736
2.04937	4.67932	94	409.18541
2.06409	4.68364	95	413.58545
2.08616	4.68983	96	417.98753
2.08248	4.69712	97	422.39162
2.13031	4.70425	98	426.79775
2.12663	4.7137	99	431.20587
2.15975	4.72553		
2.16711	4.73585		
2.17078	4.74781		
2.19654	4.76037		

ตาราง ก.12 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
2.17814	4.77288		
2.18183	4.78588		
2.17447	4.79932		
2.17447	4.81265		
2.15975	4.82313		
2.21494	4.83555		
2.22598	4.84913		
2.24069	4.86286		
2.25541	4.87462		
2.27013	4.88683		
2.27381	4.89614		
2.29588	4.90757		
2.27749	4.91761		
2.28116	4.92555		
2.29588	4.9368		
2.27381	4.94541		
2.34003	4.95343		
2.26277	4.96198		
2.35475	4.97292		
2.35475	4.98233		
2.40994	4.99337		
2.39522	5.00717		
2.39154	5.01967		
2.38786	5.02814		
2.31428	5.03598		
2.27013	5.04411		
2.31796	5.05109		
2.45409	5.06376		
2.49825	5.07514		
2.47617	5.08564		
2.49088	5.09433		
2.49457	5.10313		
2.48353	5.11194		
2.47249	5.11834		
2.46145	5.12686		

ตาราง ก.12 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
2.46145	5.13394		
2.4357	5.13946		
2.4173	5.14385		
2.4173	5.14839		
2.40626	5.15317		
2.42098	5.15771		
2.31428	5.16072		
2.41362	5.16879		
2.36579	5.1729		
2.4173	5.17713		
2.45409	5.18854		
2.45409	5.19202		
2.42098	5.19336		
2.3989	5.1948		
2.40626	5.19499		
2.40258	5.19703		
2.3805	5.19943		
2.43202	5.20302		
2.43202	5.20406		
2.44674	5.20638		
2.46513	5.20861		
2.46145	5.2107		
2.46145	5.21177		
2.45041	5.21212		
2.47985	5.21346		
2.47985	5.21453		
2.48721	5.21563		
2.46513	5.21765		
2.44673	5.21891		
2.43202	5.22032		
2.40994	5.22167		
2.4173	5.22371		
2.42098	5.22637		
2.42466	5.22991		
2.42834	5.23787		

ตาราง ก.12 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
2.43202	5.23959		
2.4173	5.24175		
2.45409	5.24694		
2.43938	5.24763		
2.4357	5.24849		
2.43202	5.2488		
2.42098	5.24933		
2.39154	5.25173		
2.45041	5.25583		
2.45777	5.26177		
2.43202	5.26145		
2.37683	5.25986		
2.42834	5.25804		
2.44305	5.25911		
2.45041	5.26065		
2.4357	5.26345		
2.41362	5.26631		
2.40626	5.26521		
2.40626	5.26388		
2.38419	5.26227		
2.3989	5.26292		
2.35475	5.26079		
2.37315	5.25929		
2.40994	5.26285		
2.36947	5.27111		
2.3989	5.27644		
2.43202	5.28298		
2.43202	5.29006		
2.3989	5.30222		
2.329	5.31089		
2.40994	5.32027		
2.43937	5.32723		
2.36211	5.32904		
2.27381	5.33934		
2.42834	5.35311		

ตาราง ก.12 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
2.524	5.35401		
2.54976	5.34986		
2.52032	5.34793		
2.47249	5.34839		
2.45041	5.345		
2.46513	5.34095		
2.47249	5.33711		
2.45041	5.33226		
2.45777	5.33311		
2.46513	5.34031		
2.48353	5.33983		
2.49824	5.3373		
2.46513	5.34561		
2.54608	5.3465		
2.49824	5.34295		
2.57919	5.34496		
2.54607	5.34566		
2.53872	5.34663		
2.50928	5.34305		
2.51664	5.36212		
2.50192	5.3766		
2.50192	5.38347		
2.46145	5.38988		
2.54607	5.40731		
2.5424	5.41923		
2.50192	5.41737		
2.48353	5.41621		
2.45409	5.40895		
2.45777	5.40234		
2.43202	5.41219		
2.44305	5.42325		
2.42834	5.43503		
2.45041	5.72579		
2.89929	7.00934		
3.52845	9.88246		

ตาราง ก.12 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
4.37469	14.58926		
6.23641	21.11948		
8.41763	29.52473		
11.1218	39.56443		
14.1642	50.97507		
17.4413	63.35966		
20.9018	76.57267		
25.0603	90.51927		
28.8612	104.94315		
31.9266	119.44054		
36.1611	135.11376		
40.2847	148.85309		
44.3528	163.32078		
47.985	177.3164		
51.5576	191.01781		
54.9253	204.4541		
58.2353	217.45162		
60.8699	229.87792		
64.1489	241.97061		
67.3436	253.81589		
70.7291	265.33222		
72.8091	276.24701		
75.7085	286.86506		
78.2753	297.17142		
80.5826	306.89773		
83.1567	316.11504		
85.4871	324.90902		
87.7925	333.46582		
89.2968	341.48112		
91.2804	349.35715		
94.1745	356.85069		
94.9124	364.04675		
96.8069	371.00448		
98.8503	377.55587		
100.605	383.90506		

ตาราง ก.13 ค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model B

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
0.01104	0.18703	0	4.04E-12
0.00368	0.18794	1	4.22607
0.00736	0.1873	2	8.45214
0.01472	0.18845	3	12.67821
0.02208	0.18728	4	16.90428
0.02944	0.18671	5	21.13035
0.01104	0.18609	6	25.35642
0.03311	0.18753	7	29.58249
0.04047	0.18827	8	33.80856
0.03679	0.18901	9	42.2607
0.02943	0.1885	10	46.48677
0.02944	0.18953	11	50.71284
0.02944	0.1903	12	54.93891
0.02943	0.19222	13	59.16498
0.02576	0.19575	14	63.39104
0.06623	0.19513	15	67.61712
0.07359	0.19567	16	71.84318
0.04415	0.19604	17	76.06926
0.05887	0.19746	18	80.29532
0.04415	0.19827	19	84.5214
0.04047	0.19935	20	88.74746
0.02575	0.19813	21	92.97354
0.01472	0.20034	22	97.1996
0.04047	0.20153	23	101.42568
0.02944	0.20382	24	105.65174
0.05519	0.20478	25	109.87782
0.05151	0.20557	26	114.10388
0.03311	0.20698	27	118.32996
0.04047	0.20793	28	122.54619
0.04783	0.20929	29	126.77875
0.05151	0.21062	30	131.01178
0.04047	0.21245	31	135.25218
0.04415	0.21378	32	139.49345
0.05151	0.21397	33	143.73983

ตาราง ก.13 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
0.04783	0.21359	34	147.99009
0.04783	0.2142	35	152.24166
0.04047	0.2147	36	156.50037
0.03311	0.21499	37	160.76197
0.0184	0.21529	38	165.02531
0.02207	0.2157	39	169.29303
0.00368	0.21741	40	173.56686
0.00736	0.22158	41	177.84278
0.04047	0.2248	42	182.12077
0.06991	0.22903	43	186.40281
0.0883	0.2279	44	190.69196
0.06991	0.22781	45	194.9835
0.08462	0.22874	46	199.27745
0.06623	0.22966	47	203.57379
0.04415	0.22992	48	207.8739
0.03679	0.23149	49	212.18196
0.02943	0.23386	50	216.49271
0.02943	0.23632	51	220.80615
0.02943	0.23713	52	225.12229
0.02943	0.23837	53	229.44112
0.04047	0.242	54	233.76267
0.03311	0.24346	55	238.09168
0.03311	0.24282	56	242.42556
0.04047	0.24403	57	246.76239
0.05519	0.24372	58	251.10215
0.06255	0.24371	59	255.44488
0.07726	0.24509	60	259.79054
0.06991	0.2473	61	264.13915
0.05519	0.24858	62	268.4907
0.04783	0.24918	63	272.8464
0.06255	0.24994	64	277.21047
0.04415	0.25071	65	281.57786
0.06255	0.25279	66	285.94837
0.05519	0.2527	67	290.32207
0.04047	0.2519	68	294.69889



ตาราง ก.13 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
0.04783	0.22008	69	299.07891
0.01472	0.05036	70	303.46209
0.06623	1.00641	71	307.84842
0.35321	3.18032	72	312.23795
1.00445	6.8045	73	316.63063
1.74031	12.06754	74	321.02653
2.73285	18.95087	75	325.42789
4.03137	27.45789	76	329.83673
5.59499	37.42283	77	334.24893
7.35123	48.67353	78	338.66444
9.29971	61.04675	79	343.08332
11.421	74.53259	80	347.49964
13.7056	88.89882	81	351.90275
16.1902	103.90801	82	356.30873
18.6374	119.15942	83	360.71751
21.0439	138.57141	84	365.12911
23.5598	150.23315	85	369.54352
25.9329	165.29371	86	373.95477
28.2561	180.02413	87	378.35231
30.4163	194.12565	88	382.75221
32.6466	207.69277	89	387.15443
34.852	220.48408	90	391.55906
36.6836	232.69162	91	395.96602
38.7659	244.31349	92	400.37784
40.6678	255.34277	93	404.78736
42.2694	265.73632	94	409.18541
43.9194	275.62838	95	413.58545
45.5771	285.03078	96	417.98753
47.0564	294.04426	97	422.39162
48.5585	302.58838	98	426.79775
50.127	310.69264	99	431.20587
51.3701	318.45702		
52.7624	325.9408		
53.995	333.02653		
54.9825	339.88864		

ตาราง ก.13 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
56.0825	346.44509		
56.8395	352.63123		
57.9641	358.59411		
59.1628	364.47325		
60.3615	370.1464		
61.4996	375.54643		
62.3614	380.78931		
63.2094	385.84109		
63.9163	390.7296		
64.6222	395.49747		
65.5046	400.06448		
66.7272	404.48659		
67.271	408.8033		
67.9281	412.95731		
68.6058	417.00928		
69.3984	420.85885		
70.6852	424.63171		
71.203	428.31795		
71.7249	431.79069		
71.5417	435.25219		
72.4452	438.61328		
73.4249	441.92634		
73.8645	445.11741		
74.249	448.21549		
74.8379	451.22192		
75.496	454.04653		
76.0805	456.87168		
77.3826	459.65424		
77.7795	462.34186		
77.8135	465.02653		
78.4271	467.66979		
79.038	470.25936		
79.5896	472.79699		
79.855	475.25664		
80.5165	477.64371		

ตาราง ก.13 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
81.3016	480.04477		
81.1897	482.38218		
81.7195	484.55952		
81.9699	486.60035		
82.1452	488.60499		
82.5817	490.5753		
83.6553	492.46234		
82.7649	494.34109		
83.4888	496.2976		
84.1907	498.30138		
84.2345	500.252		
85.0813	501.96346		
85.6175	503.55293		
85.7106	505.36877		
85.7682	507.10672		
86.0152	508.99453		
86.4532	510.84925		
87.6329	512.63379		
87.2899	514.15693		
87.7149	515.56624		
88.4549	517.06371		
88.5086	518.67498		
89.0749	520.32813		
89.3363	522.10179		
89.6569	523.59795		
89.6943	525.02768		
89.2135	526.6216		
89.7482	527.99162		
90.8172	529.12954		
89.9091	530.13939		
89.9668	531.12637		
90.0406	532.06346		
90.3991	532.94467		
90.6703	533.83306		

ตาราง ก.13 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
91.3928	534.87434		
91.4272	536.13021		
91.1602	537.30048		
91.8893	538.81581		
92.1128	540.3543		
92.3139	541.96909		
92.1854	543.57504		
92.3433	545.29075		
92.2815	546.91418		
92.5004	548.67149		
92.8154	550.49562		
93.1919	552.13997		
93.7196	553.82906		
94.4015	555.66803		
95.1352	557.20838		
95.5453	558.61728		
95.9386	560.01344		
96.1667	561.32909		
96.2717	562.48858		
95.6204	563.79866		
95.9381	565.01325		
96.7071	566.25984		
98.0055	567.6896		
98.0301	568.89165		
97.5078	570.00806		
98.0227	571.19373		
98.0704	572.31872		
98.6211	573.38362		
98.883	574.40397		
98.9054	575.42432		
99.123	576.34042		
100.177	577.22093		

ตาราง ก.14 ค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ของการทดลองและการจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลต่างของอุณหภูมิ  
ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล model C

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
0.63194	18.99	0	4.92E-12
0.66859	18.92148	1	11.52894
0.65766	18.88994	2	23.05788
0.65758	18.86639	3	34.58682
0.67962	18.82279	4	46.11576
0.69795	18.77706	5	57.6447
0.69415	18.7275	6	69.17364
0.73452	18.67798	7	80.70258
0.72373	18.63522	8	92.23152
0.7312	18.57521	9	103.76047
0.71663	18.51989	10	115.28941
0.73123	18.4742	11	126.81834
0.73127	18.44549	12	138.34728
0.7607	18.40848	13	149.87622
0.75341	18.35588	14	161.40516
0.76084	18.31112	15	172.9341
0.7573	18.20171	16	184.46304
0.76101	18.07969	17	195.99199
0.78673	18.01749	18	207.52093
0.80145	17.96801	19	219.04987
0.84195	17.94502	20	230.57881
0.80555	17.91372	21	242.10775
0.82756	17.85156	22	253.63669
0.80926	17.80783	23	265.16563
0.82401	17.80046	24	276.69457
0.82415	17.82571	25	288.2235
0.82048	17.91131	26	299.75244
0.82048	18.24932	27	311.28138
0.82407	18.90143	28	322.81032
0.85704	19.96006	29	334.2872
0.868	21.55388	30	345.83035
0.89346	23.65636	31	357.37473
0.94829	26.3163	32	368.9363
0.97393	29.60017	33	380.49999

ตาราง ก.14 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
0.99196	33.54806	34	392.07602
1.04628	38.24163	35	403.66095
1.15154	43.63117	36	415.24896
1.27509	49.85647	37	426.85378
1.4022	56.95789	38	438.46622
1.59861	65.00213	39	450.08212
1.78038	73.93681	40	461.70914
1.98404	83.8505	41	473.34996
2.20288	94.54453	42	484.99569
2.42844	106.20721	43	496.64637
2.64209	118.83437	44	508.30764
2.93251	133.16798	45	519.98478
3.3283	146.75198	46	531.66759
3.72437	162.09771	47	543.35618
4.07687	177.82952	48	555.05043
4.59058	194.47918	49	566.75488
5.00956	211.54018	50	578.47697
5.5014	229.5032	51	590.20537
6.17542	247.84888	52	601.94021
6.70735	266.77322	53	613.6815
7.50159	286.27091	54	625.42909
8.23389	306.20765	55	637.18319
8.79742	326.25731	56	648.95678
9.29992	347.11923	57	660.74014
9.89278	368.34112	58	672.53053
10.75095	390.01754	59	684.3279
11.47085	411.65389	60	696.13224
12.32619	433.53187	61	707.94362
13.04261	455.60352	62	719.76197
13.87054	478.22403	63	731.58735
14.56469	500.73635	64	743.42459
15.45892	523.36547	65	755.28002
16.60501	545.99693	66	767.14295
17.62626	568.58784	67	779.01334
18.17308	591.12973	68	790.89123

ตาราง ก.14 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
18.46955	613.33702	69	802.77663
18.98935	635.92486	70	814.66955
20.00291	659.07482	71	826.57003
21.16682	681.88256	72	838.47797
22.38765	704.2553	73	850.39347
23.44474	726.54758	74	862.31649
24.38829	749.16371	75	874.24719
25.29622	771.48224	76	886.19417
26.3231	793.45018	77	898.15557
27.44391	815.0505	78	910.12496
28.77109	836.72474	79	922.10221
29.69336	857.84051	80	934.0874
30.52262	878.72774	81	946.064
31.33186	899.57779	82	958.00489
32.41188	920.19923	83	969.95234
33.77952	940.2151	84	981.90629
34.63869	960.02458	85	993.86686
35.61916	979.3984	86	1005.83386
36.37712	998.34918	87	1017.78913
37.22491	1017.1604	88	1029.70874
38.32364	1035.76968	89	1041.63361
39.76018	1053.88544	90	1053.56383
40.8116	1071.81464	91	1065.49943
41.79815	1089.36384	92	1077.4405
42.82119	1106.66216	93	1089.39469
43.71412	1123.7128	94	1101.3366
44.73012	1140.18584	95	1113.24811
45.98557	1156.60504	96	1125.16391
46.74688	1172.79712	97	1137.08401
47.32272	1188.38848	98	1149.00851
47.95052	1204.37624	99	1160.93731
48.88326	1218.09376	100	1172.87052
49.89656	1233.13568	--	--
50.97537	1247.21728	--	--
51.86294	1260.82624		

ตาราง ก.14 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
52.72164	1274.15048		
53.90148	1287.37544		
54.86121	1300.13656		
55.04523	1313.06552		
56.31525	1325.61032		
57.17237	1337.53016		
58.19257	1348.79024		
59.50303	1359.81456		
60.05438	1370.49568		
60.80729	1380.8072		
60.90111	1390.64624		
62.13462	1400.07952		
62.79556	1409.45312		
63.89359	1418.54944		
64.07454	1427.3376		
64.83298	1435.84464		
66.32395	1443.74464		
66.52777	1451.78416		
65.97854	1459.79568		
66.44222	1468.09424		
67.17741	1475.79776		
68.4936	1483.6584		
69.56325	1490.76032		
70.22824	1497.90112		
71.63924	1504.81744		
72.25959	1511.56384		
72.80239	1517.748		
73.26395	1523.6896		
74.11004	1529.28928		
74.93098	1534.5752		
75.83391	1540.01168		
76.4997	1544.9768		
77.49546	1549.41824		
77.39802	1554.07264		
78.17848	1558.61616		



ตาราง ก.14 (ต่อ)

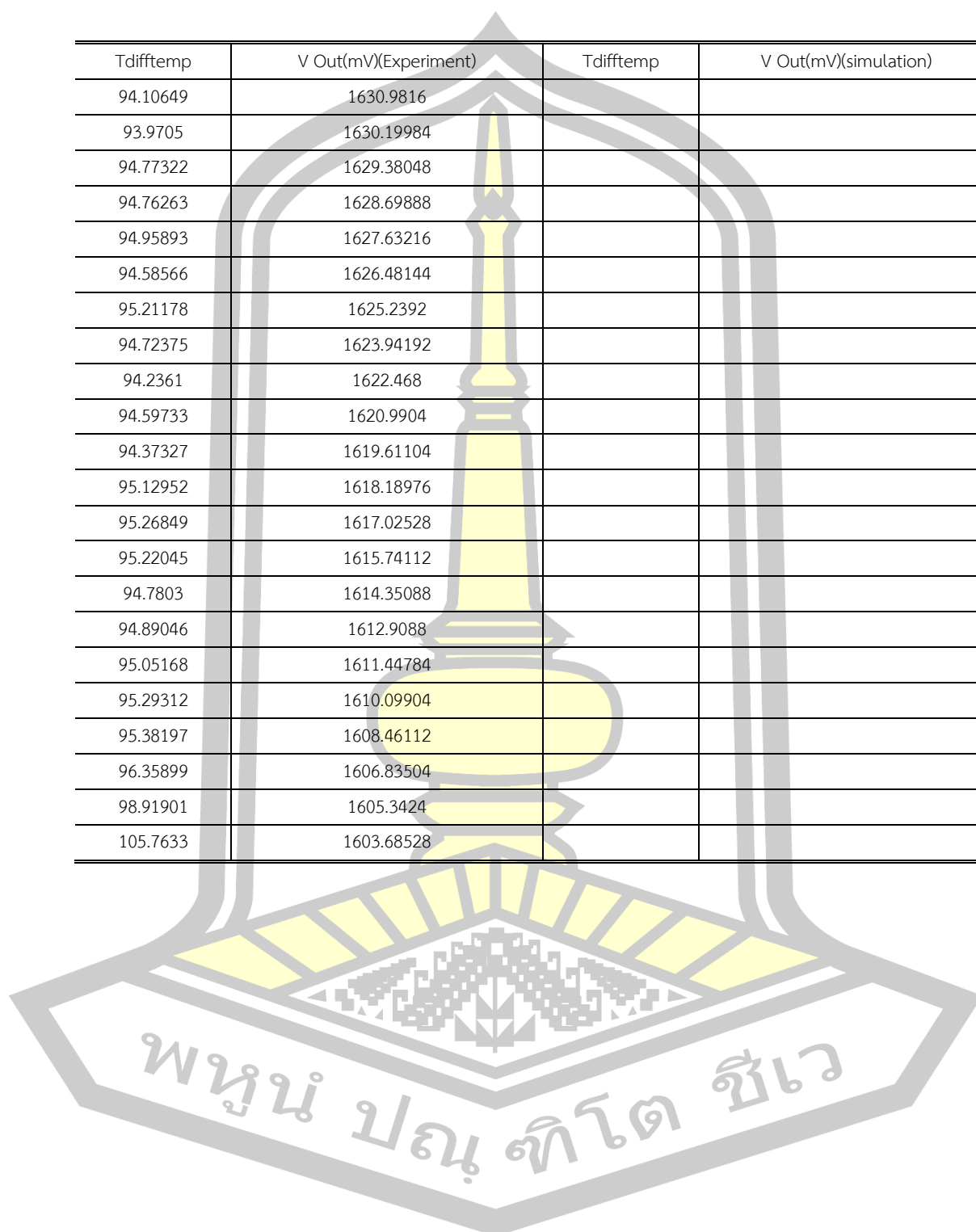
Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
78.4686	1563.34592		
78.96436	1567.52048		
78.81311	1571.63744		
79.28337	1575.52336		
79.92354	1579.21712		
80.19637	1582.8656		
80.84467	1586.18144		
80.60464	1589.29664		
80.50828	1592.25296		
81.50311	1595.14576		
82.76884	1597.74816		
82.89943	1600.18016		
82.62029	1602.62096		
83.1729	1605.49616		
83.44154	1608.79808		
83.87199	1611.7992		
84.03735	1614.26096		
84.97295	1616.71696		
85.9819	1619.01392		
86.66651	1621.05696		
86.37701	1623.62896		
86.34088	1625.6528		
87.29068	1627.51856		
88.00871	1629.23232		
87.6993	1631.0328		
88.08569	1632.5928		
87.79008	1633.71552		
87.8136	1634.86016		
88.19826	1635.92672		
88.96929	1636.81184		
89.96996	1637.55824		
89.60582	1638.25328		
89.71941	1638.77152		
90.22152	1639.97248		
89.98953	1641.15872		

ตาราง ก.14 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
90.45751	1642.04256		
91.27676	1642.34688		
91.05173	1642.60912		
91.10956	1642.7992		
91.3069	1643.19552		
90.99133	1643.82352		
91.50956	1644.22992		
91.838	1644.4944		
92.34898	1644.85296		
92.2649	1644.89968		
92.14351	1645.13632		
91.99002	1645.03408		
92.10202	1644.82736		
92.56136	1644.63024		
93.72362	1644.22896		
92.95833	1643.63792		
93.60217	1642.97312		
92.84411	1642.7104		
94.19996	1643.10496		
93.77439	1643.14256		
93.49966	1642.88816		
93.84837	1642.35296		
93.37855	1641.83856		
93.38102	1641.25424		
94.62904	1640.40464		
94.53013	1639.53936		
93.81643	1638.7472		
94.18365	1637.83728		
94.70738	1636.82608		
94.82166	1635.86688		
95.06506	1634.75616		
94.56023	1633.93584		
94.37134	1633.01568		
93.84614	1632.66944		
94.60876	1631.86608		

ตาราง ก.14 (ต่อ)

Tdifftemp	V Out(mV)(Experiment)	Tdifftemp	V Out(mV)(simulation)
94.10649	1630.9816		
93.9705	1630.19984		
94.77322	1629.38048		
94.76263	1628.69888		
94.95893	1627.63216		
94.58566	1626.48144		
95.21178	1625.2392		
94.72375	1623.94192		
94.2361	1622.468		
94.59733	1620.9904		
94.37327	1619.61104		
95.12952	1618.18976		
95.26849	1617.02528		
95.22045	1615.74112		
94.7803	1614.35088		
94.89046	1612.9088		
95.05168	1611.44784		
95.29312	1610.09904		
95.38197	1608.46112		
96.35899	1606.83504		
98.91901	1605.3424		
105.7633	1603.68528		



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสาคร อินทะชัย
วันเกิด	วันที่ 4 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2530
สถานที่เกิด	อำเภอโนนสัง จังหวัดหนองบัวลำภู
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 126 หมู่ 2 ตำบลบ้านถิ่น อำเภอโนนสัง จังหวัดหนองบัวลำภู รหัสไปรษณีย์ 39140
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เลขที่ 680 ถนนนิตโย อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร รหัสไปรษณีย์ 47000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนกุดตุ้มพิทยาคม จังหวัดหนองบัวลำภู พ.ศ. 2552 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2555 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทัต ชีเว