

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2559

การสร้างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับการเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง
จากเตาहुงต้มให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

นางสาวอาภาภรณ์ สกูลการะเวก
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 146356
วันเดือนปี 19 พ.ค. 2560

1284567X

สนับสนุนโดย สำนักบริหารโครงการวิจัยส่งเสริมการวิจัย
ในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)การสร้างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับการเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

แหล่งเงินสำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 300,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี 6 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 31 มีนาคม 2560

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ อภาภรณ์ สกุลกระเวก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมวิจัย ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปัญหาที่สำคัญของประชาชนในพื้นที่ชนบทของประเทศกำลังพัฒนาคือการขาดการเข้าถึงของพลังงานไฟฟ้า การแก้ปัญหาที่ยั่งยืนคือประชาชนต้องสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เองจากกิจกรรมในชีวิตประจำวัน เช่นการผลิตไฟฟ้าจากเตาหุงต้มที่ใช้ประกอบอาหาร เป็นต้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบแปลงพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการออกแบบอยู่บนเงื่อนไข 3 ข้อ คือ (1) ระบบที่ออกแบบต้องนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มกลับมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยพลังงานความร้อนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โม อิเล็กทริกและพลังงานความร้อนที่เหลือจะใช้เพื่อผลิตน้ำร้อนใช้ในครัวเรือน (2) การระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกต้องเป็นการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ และ (3) ระบบที่ออกแบบต้องสามารถนำไปติดตั้งร่วมกับเตาหุงต้มโดยไม่ต้องทำลายโครงสร้างของเตา วิธีการทดลองแบ่ง ออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ได้จากระบบโดยใช้วิธีตอบสนอง โครงร่างพื้นผิว และคำนวณประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบ ในขั้นตอนนี้จะใช้ฮาร์ดแวร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและติดตั้งทางด้านบนของเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล ด้านล่างของเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลถูกติดตั้งด้วยฮีทไปป์จำนวน 4 ชั้น โดยฮีทไปป์จะถูกสอดเข้าไปในถังน้ำเพื่อช่วยในการระบายความร้อนและการผลิตน้ำร้อน เทอร์โมคัมเบิลชนิดเคจจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิ อุณหภูมิกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลถูกวัดโดยใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Labview จากผลการทดลองพบว่าสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า ประมาณ 4.5 วัตต์ต่อเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล 1 ตัว อุณหภูมิของน้ำร้อนสูงสุดประมาณ 70 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพรวมของระบบมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ การทดลองตอนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาหุงต้มที่มีการติดตั้งและ ไม่ติดตั้งระบบที่ออกแบบ จ ากการทดสอบพบว่าเมื่อเตาหุงต้มมีการติดตั้งระบบที่ออกแบบจะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเตาหุงต้มที่ไม่ติดตั้งระบบที่ออกแบบ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบสามารถนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเตาหุงต้มเพื่อผลิตไฟฟ้าและน้ำ ร้อนสำหรับใช้ในครัวเรือนได้อย่างเพียงพอ โดยระบบที่ออกแบบสามารถนำไปติดตั้งร่วมกับเตาหุงต้มได้โดยตรงและไม่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดและถ่ายทอดให้กับประชาชนในพื้นที่ชนบทของประเทศได้

คำสำคัญ : ระบบนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก, RSM, เตาหุงต้ม, ฮีทปั๊ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Construction of thermoelectric generator system for converting waste heat of cooking stove into electrical energy

Researchers: Aparporn Sakulkalavek⁽¹⁾ and Rachsak Sakdanuphab⁽²⁾

⁽¹⁾ Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang

⁽²⁾ College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang

ABSTRACT

In this work, a waste-heat recovery (WHR) system was designed and implemented to utilise the waste heat from a cooking stove. The WHR system was designed to preserve maximum thermal energy efficiency, use passive cooling, and produce a system that did not alter the body of the cooking stove. The thermal energy from the cooking stove was converted into electrical energy by a thermoelectric generator (TEG) and used in a waste-heat hot water boiler. The cold side of the TEG was cooled by heat pipes immersed in a water box that offers a high heat transfer rate. The heated water can be used for domestic purposes. Dependent variables were the heater temperature and the volume of water. The heater temperature was varied between 130 and 271 °C, and 4.2–9.5 L of water was investigated. At equilibrium, response surface methodology based on a central composite design was used to empirically model the influence of the heater temperature and the volume of water on the electrical power generation and the hot water temperature. Experimental results of the system efficiency showed that the heater temperature was more influential than was the volume of water. The total efficiency of the WHR system was more than 80%. Thermal contact resistance was analysed to improve the WHR system performance. Finally, the thermal efficiency of a cooking stove, both with and without the WHR system, was measured. Results showed that the thermal efficiency of the cooking stove decreased by less than 5% when the WHR system was attached.

Keywords: Waste-heat recovery (WHR) system, Response surface methodology (RSM), Thermoelectric generator, Cooking stove, Heat pipe

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายศุภศักดิ์ คนชื้อ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับความช่วยเหลือการจัดเก็บข้อมูลและการติดต่อประสานงานในการจัดซื้ออุปกรณ์การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559



อาภาภรณ์ สกุกการเวก
ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	5
2.2.1 การนำความร้อน	5
2.2.2 การพาความร้อน	8
2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน	10
2.3 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect)	11
2.3.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)	12
2.3.2 ปรากฏการณ์เพลทีเย่ (Peltier Effect)	13
2.4 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)	15
2.4.1 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	16
2.4.2 หลักการทำงานของ Thermoelectric generator (TEG)	16
2.5 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง	17
2.5.1 ที่มาของความร้อนเหลือทิ้ง	17
2.5.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง	18
2.6 ท่อความร้อน (Heat Pipe)	19
2.6.1 หลักการทำงานของท่อความร้อน	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2	20
2.6.3	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1	24
3.1.1	24
3.1.2	25
3.1.3	26
3.1.4	26
3.1.5	27
3.1.6	27
3.1.7	28
3.1.8	29
3.2	30
3.2.1	30
3.2.2	32
3.2.3	32
3.2.4	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	34
4.1	34
4.1.1	36
4.1.2	38
4.1.3	40
4.1.4	47
4.2	48
4.3	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE})	52
4.3.2 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ	56
4.4 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อ	57
4.4.1 การหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก	59
4.4.2 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)	62
4.5 ผลการทดลองภาคสนาม	65
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย	68
บทที่ 6 ผลผลิต	69
6.1 ผลงานบทความตีพิมพ์	69
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุบางชนิด	7
2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน	9
2.3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง	18
2.4 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ	19
3.1 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-24156-1.2 จากผู้ผลิต	25
4.1 เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว ซึ่งออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง	35
4.2 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) ทั้งหมด 13 การทดลอง	37
4.3 ผลการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1-T_2 ($^{\circ}\text{C}$) และการคำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่เข้าในระบบ ทั้งหมด 13 การทดลอง	40
4.4 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง	45
4.5 อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเมื่ออุณหภูมิของน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ทั้งหมด 13 การทดลอง	47
4.6 ผลการทดลองในเบื้องต้นทั้งหมด 13 การทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำตามเงื่อนไขต่างๆ	48
4.7 (ก) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของกำลังไฟฟ้า	49
(ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของอุณหภูมิน้ำ	50
4.8 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง	56
4.9 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทั้งหมด 13 การทดลอง	57
4.10 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง	60
4.11 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes)	64
4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้ง	67

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำพาและการแผ่รังสี	5
2.2 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติ พิกัด x	6
2.3 การกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหล ขณะเกิดการพาความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน	8
2.4 การพาความร้อนในชั้นขีดผิวความร้อน และชั้นขีดผิวความเร็ว	8
2.5 การแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ	10
2.6 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีบีค	12
2.7 ภาพการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิสองด้านไม่เท่ากัน	13
2.8 วงจรการเกิดปรากฏการณ์เพลทีย่	14
2.9 การเกิดปรากฏการณ์เพลทีย่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	14
2.10 การเกิดปรากฏการณ์เพลทีย่กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี	15
2.11 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	16
2.12 โครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	16
2.13 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในรูปแบบ TEG	17
2.14 ความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้พลังงานแหล่งต่างๆ	18
2.15 แสดงโครงสร้างภายในของฮีทไปป์	20
2.16 Limit Heat pipe	20
3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-24156-1.2	24
3.2 ฮีทไปป์	25
3.3 แผ่นทองแดง	26
3.4 EAD MILL	26
3.5 ถังน้ำ	27
3.6 กระบวนการจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	27
3.7 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติประกอบด้วย NI 9211, NI 9201 และ NI 9227	28
3.8 โปรแกรม Lab View	29
3.9 เต้าหุงต้ม	29
3.10 ภาพไอโซเมตริกแสดงลักษณะของฐานทั้งสองด้านของชุดระบายความร้อน	30
3.11 การกัดชิ้นงานแผ่นทองแดง	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.12 การเจาะรูชิ้นงานแผ่นทองแดง	31
3.13 ชิ้นงานแผ่นทองแดงที่ทำการกัดและเจาะรูเรียบร้อยแล้ว	31
3.14 ชิ้นงานแผ่นทองแดง (ส่วนปิดทับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล) ที่ทำการเจาะรูเรียบร้อยแล้ว	31
3.15 ระบบระบายความร้อนที่เป็นฮีทไปป์ร่วมกับถังน้ำ	33
3.16 ระบบระบายความร้อนที่เป็นฮีทไปป์ร่วมกับถังน้ำ ยึดติดกับเดาหุงต้ม	33
4.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 ตามลำดับ	36
4.2 (ก) ความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน ($T_1 - T_2$) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 ตามลำดับ	38
(ข) อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 ตามลำดับ	38
4.3 อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ช่วงที่ 1) และอุณหภูมิน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ตามการทดลองที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 ตามลำดับ	41
4.4 (ก) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 3	42
(ข) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 4	43
(ค) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 6	43
(ง) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 9	44
(จ) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 13	44
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง	46
4.6 (ก) ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า (P)	51
(ข) ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิน้ำ (T_w)	52
4.7 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลาในการทดลองที่ 3	53
4.8 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลาในการทดลองที่ 4	54
4.9 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลาในการทดลองที่ 6	54
4.10 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลาในการทดลองที่ 9	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลาในการทดลองที่ 13	55
4.12 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน	58
4.13 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของแผงกับเทอร์โมอิเล็กทริก	59
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของแผงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเฉลี่ย (R_c) กับ อุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) ทั้งหมด 13 การทดลอง	61
4.15 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)	62
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) เฉลี่ย (R_{chp}) กับ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง	65
4.17 การทดลองภาคสนาม (ก) ก่อนติดตั้งระบบ	66
(ข) หลังการติดตั้งระบบ	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1ความเป็นมาและความสำคัญ

ในยุควิกฤตพลังงานและภาวะโลกร้อน (Global warming) [1] เป็นปัญหาสำคัญในระดับนานาชาติที่ส่งผลกระทบต่อระบบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก สาเหตุหนึ่งเกิดจากการที่มนุษย์เผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เพื่อผลิตพลังงาน โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) [2] ออกสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ความต้องการในการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นทั้งในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้ชีวิตประจำวัน ล้วนนำมาซึ่งวิกฤตการณ์การขาดแคลนเชื้อเพลิงในอนาคต จึงจำเป็นต้องมีการแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อทดแทน ที่สำคัญต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมและภาวะเรือนกระจกด้วย

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยมีปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและการวิจัยเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าให้ได้เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า การผลิตพลังงานจากพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการผลิตพลังงานไฟฟ้า การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่ยั่งยืน รวมทั้งเป็นที่ต้องการอย่างยิ่ง เพื่อนำมาทดแทนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น น้ำมันเตา ถ่านหิน เป็นต้น นอกจากนี้ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานอื่นๆ เช่น พลังงานชีวมวล พลังงานเคมี (Fuel Cell) รวมทั้งการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาจากพลังงานความร้อนที่เหลือใช้จากขบวนการต่างๆ ด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) จึงเป็นหัวข้อหนึ่ง ซึ่งเป็นที่สนใจในการทำงานวิจัยอยู่ในขณะนี้อย่างมาก การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานสะอาด มีต้นกำเนิดเป็นความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้งานประจำวัน เช่น การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งท่อไอเสียของรถยนต์ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเตาหุงต้ม เป็นต้น เนื่องด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละโมดูลสร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N หลายตัว โดยจัดโครงสร้างให้ผนังด้านใดด้านหนึ่งนั้นรับความร้อนอุณหภูมิเดียวกันและสม่ำเสมอตลอดทั้งโมดูล โดยพลังงานความร้อนส่วนใหญ่จะมาจากดวงอาทิตย์ ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหรือความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามภายในครัวเรือนของเราเองยังมีความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งเราละเลยไป ทั้งจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น ลมร้อนของเครื่องปรับอากาศและแผ่กระจายความร้อนของตู้เย็นหรือกิจกรรมภายในครัวเรือน เช่น การประกอบอาหารจากเตาแก๊สหุงต้ม เตาถ่าน และการเผาขยะ ซึ่งพลังงานความ

ร้อนส่วนนี้ถูกทิ้งไปทุก ๆ วัน จึงเป็นที่มาของแนวคิดสำหรับการวิจัยนี้ ที่จะนำพลังงานความร้อนจากภายในครัวเรือนที่สูญเสียไปโดยเปล่านั้นมาแปลงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะมีการศึกษาและออกแบบของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเตาหุงต้ม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบระบายความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อใช้ในระบบเตาหุงต้มจากถ่าน เนื่องจากเป็นระบบขนาดเล็กและมีใช้แพร่หลายในครัวเรือนตามต่างจังหวัด โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากการหุงต้มมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งสิ่งสำคัญของกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือการควบคุมปริมาณอากาศที่จะเข้าไปยังเตาเชื้อเพลิงให้เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยทั่วไปเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบหลักคือ ชาติคาร์บอน เมื่อเผาไหม้ร่วมกับออกซิเจนในอากาศที่สมบูรณ์ จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกมา แต่ถ้าหากออกซิเจนไม่เพียงพอจะทำให้เกิด ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในการควบคุมการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะต้องใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ต้องการจะใช้พลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งจากเตาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงระบบระบายความร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้ม
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาหุงต้มในการใช้ประโยชน์นอกเหนือจากการใช้งานหลัก

1.3 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาและออกแบบระบบระบายความร้อนที่เหมาะสม ในการนำไปติดตั้งกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ความร้อนเป็นฮีตเตอร์
2. บันทึกอุณหภูมิทางด้านร้อน (TH) , อุณหภูมิทางด้านเย็น (TC) , ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยเครื่องระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (NI 9201, NI 9211 และ NI 9227)
3. ออกแบบระบบระบายความร้อนเพิ่มเติม โดยการนำถ่านน้ำเข้ามาติดตั้ง
4. นำระบบระบายความร้อนที่มีการติดตั้งถ่านแล้ว ไปติดตั้งกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ความร้อนเป็นฮีตเตอร์
5. บันทึกอุณหภูมิทางด้านร้อน (TH) , อุณหภูมิทางด้านเย็น (TC) , ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยเครื่องระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (NI 9201, NI 9211 และ NI 9227)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยใช้แหล่งระบายความร้อนที่ออกแบบไป ประกอบเข้ากับเตาหุงต้ม
7. บันทึกอุณหภูมิทางด้านร้อน (TH) , อุณหภูมิทางด้านเย็น (TC) , ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยเครื่องระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (NI 9201, NI 9211 และ NI 9227)
8. สรุปผลงานวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและพัฒนาระบบระบายความร้อนในการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
2. สามารถนำระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มไปใช้งานจริง ตามบ้านเรือน ชุมชนต่างๆ
3. การทดสอบครั้งนี้จะช่วยกระตุ้นให้เรามองหามุมมองใหม่ๆ ในการออกแบบการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

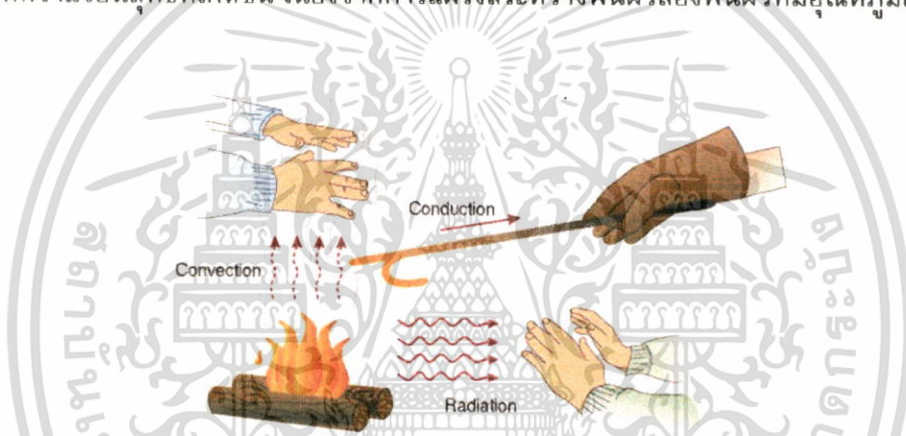
ในบทนี้จะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก ตลอดจนศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในการสร้างและออกแบบชุดระบายความร้อนเพื่อช่วยในการระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นในการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มมาทำการผลิตกระแสไฟฟ้า คณะผู้วิจัยได้ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทำเตาจากกระบวนการหลายๆ กระบวนการใช้เชื้อเพลิง [3] ต่างๆ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดเอกสารที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อ้างอิงจากงานวิจัย เรื่อง Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator[4] ที่ได้มีการพัฒนาเตาประกอบอาหารชีวมวลที่ติดตั้งด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก การใช้เตาชีวมวลป้อน รุงอาหารโดยใช้ชีวมวล เช่น ฟางข้าว เศษไม้ กากอ้อย เป็นต้น นำมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการอุปโภคและบริโภค เริ่มเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายภายในประเทศที่กำลังพัฒนา แต่ในส่วนการใช้งานของเตาชีวมวลนั้น อาจยังไม่มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนเพื่อที่จะนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเท่าที่ควร การจะเพิ่มประสิทธิภาพของเตาชีวมวลจะต้องมีการทดสอบความเป็นไปได้ ในการที่จะติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกและฮีทซิงค์ เข้าไปยังเตาชีวมวล ในการทดลองที่เกิดขึ้นนี้ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพของเตาชีวมวลในอุณหภูมิที่แตกต่างกันซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเตาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกในความต่างอุณหภูมิที่ 150 °C นั้นจะผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 2.4 W ประสิทธิภาพที่วัดได้จะมีประมาณ 3.2 % ซึ่งจะเพียงพอสำหรับการขับเคลื่อนกำลังไฟฟ้าต่ำ ๆ ที่สามารถทำให้หลอดไฟสว่างหรือวิทยุพกพาขนาดเล็กใช้งานได้เนื่องจากปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมจึงทำให้มีตลาดที่จะสามารถพัฒนาศักยภาพของเตาชีวมวลต่อไปได้ จากความเรียบง่ายและต้นทุนที่ไม่สูงมากของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกทำให้มีการส่งเสริมในเชิงพาณิชย์มากขึ้น

2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน [5] คือการส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก ความแตกต่างของ อุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่างๆเมื่อมี เกรเดียนต์อุณหภูมิ (Temperature Gradient) เกิดขึ้นในตัวกลางที่อยู่หนึ่งเช่น ของแข็งหรือ ของไหลเทอมของการนำความร้อน (Conduction) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลางในขณะที่การพาความร้อน (Convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่เมื่อมี อุณหภูมิแตกต่างกันส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้น ในสภาวะที่ปราศจากตัวกลางใดๆจะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้น เนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้



รูปที่ 2.1 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำการพาและการแผ่รังสี

2.2.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน [6] หมายถึง การส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูง ไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลอย่างต่อเนื่องกัน การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางแบบการนำความร้อนคำนวณจากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law)

กฎของฟูเรียร์ กล่าวว่า สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายเทความร้อน (\dot{Q}_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้น เป็นปริมาณโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อน (A) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางใน

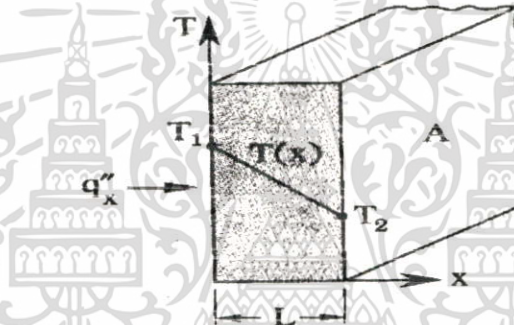
ทิศทางดังกล่าว ($\frac{dT}{dx}$) สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady State) อุณหภูมิในตัวกลาง $T = T(x)$

จากกฎของฟูเรียร์

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

โดยที่ k คือ ค่าสภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของตัวกลาง มีหน่วยเป็น $W/m \cdot K$ ฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลางสามารถคำนวณ

$$q_x'' = \frac{\dot{Q}_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติ พิกัด x

ในสมการ (2.1) และ (2.2) ถ้าอุณหภูมิของตัวกลางลดลงตามทิศทาง $+x$ พบว่าค่าของ $\frac{dT}{dx}$

เป็นลบ ดังนั้น ถ้า \dot{Q}_x หรือ q_x'' มีทิศการไหลในทิศ $+x$

ภายใต้สภาวะคงตัวและตัวกลางมี k เป็นค่าคงที่ อุณหภูมิ $T(x)$ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ดังรูปที่

2.2

ดังนั้น

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{-(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.3)$$

ดังนั้น

$$q_x'' = \frac{k(T_1 - T_2)}{L} = \frac{k\Delta T}{L} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุบางชนิด[7]

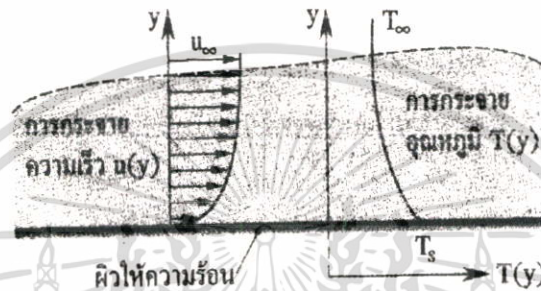
Thermal Conductivity of Common Materials (at 25 °C)	
Material	Conductivity (Watts/meter- °C)
Acrylic	0.200
Air	0.024
Aluminum	250.000
Copper	401.000
Carbon Steel	54.000
Concrete	1.050
Glass	1.050
Gold	310.000
Nickel	91.000
Paper	0.050
PTFE (Teflon)	0.250
PVC	0.190
Silver	429.000
Steel	46.000
Water	0.580
Wood	0.130

จากตาราง พบว่า วัสดุโลหะที่นำความร้อนที่ดีที่สุดก็คือ เงิน (แต่ไม่นิยมใช้ในงานทั่วไปเพราะว่ามีราคาค่อนข้างสูง) รองลงมา ก็คือ ทองแดง และ อลูมิเนียม ซึ่งทั้งคู่มิคุณสมบัติในการนำความร้อนที่สูง จึงเหมาะในการนำไปทำเป็นวัสดุระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การพาความร้อน

การพาความร้อน [8] หมายถึง การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล ผลการเคลื่อนไหวของของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น (h , $W/m^2 \cdot K$) พลังงานความร้อนถูกโอนถ่ายเป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลและผลการเคลื่อนไหวไปทั้งปริมาตรของของไหล

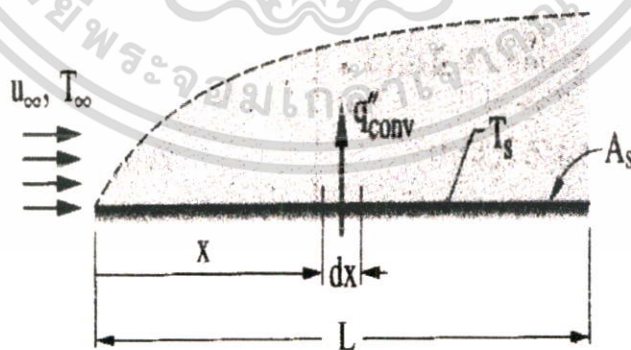


รูปที่ 2.3 การกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหล

ขณะเกิดการพาความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน

การพาความร้อนจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวของของไหลเป็นผลของแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อันเกิดจากมีผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ
2. การพาความร้อนโดยบังคับ (Forced Convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวของของไหลที่เป็นผลมาจากแรงกระทำจากภายนอก เช่น เครื่องสูบลม เครื่องเป่าลม (Blower) ฯลฯ



รูปที่ 2.4 การพาความร้อนในชั้นขีดผิวความร้อน และชั้นขีดผิวความเร็ว

พิจารณาการพาความร้อนจากผิวของแข็งพื้นที่ A_s อุณหภูมิผิว T_s ขณะของไหล ไหลผ่านด้วยความเร็ว U_∞ และอุณหภูมิ T_∞ คงที่ ฟลักซ์ความร้อนเฉพาะที่คำนวณเป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ($W/m \cdot K$)

ดังนั้น จะคำนวณอัตราการพาความร้อนทั้งหมดบนพื้นผิว A_s จาก

$$\dot{Q}_{conv} = \int_{A_s} q''_{conv} dA_s = (T_s - T_\infty) \int h dA_s \quad (2.6)$$

$$\dot{Q}_{conv} = h_m A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

โดยที่ h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Average Convection Coefficient) สำหรับแผ่นระนาบ (flat plate) ยาว L จะพบว่า

$$h_m = \frac{1}{L} \int_0^L h dx \quad (2.8)$$

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน

ชนิดของการพาความร้อน	ค่าสัมประสิทธิ์ ($W/m \cdot K$)
การพาตามธรรมชาติ	5 - 25
การพาโดยบังคับ	
ก๊าซ	25 - 250
ของเหลว	50 - 20000
การพาขณะเปลี่ยนแปลงเฟส (เดือดตัวและควบแน่น)	2500 - 100000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน [9] หมายถึง การถ่ายเทความร้อนจากผิวตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกผิวตัวกลางหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งถ่ายในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือในรูปของโฟตอนโดยไม่ต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง การแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถเกิดในสุญญากาศได้ พลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง

คำนวณจากกฎของ สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

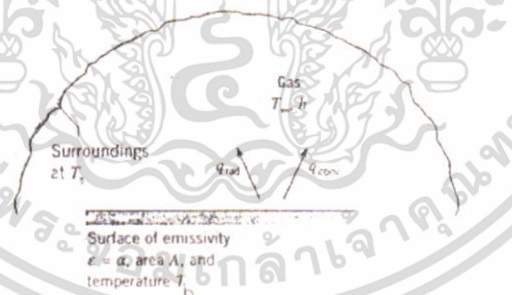
$$q_{rad}'' = \sigma T_s^4 \quad (2.9)$$

โดยที่ T_s คือ อุณหภูมิผิวแผ่รังสีในหน่วยองศาเซลเซียสหรือหน่วยเป็นเคลวิน (K)

σ คือ ค่าคงที่ของ สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

สมการ (2.9) ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiator) หรือวัตถุดำ (Black Body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (Real Surface) พลักซ์แผ่รังสีจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้จะขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของพื้นผิวนั้น (ϵ) ด้วย พลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจาก

$$q_{rad}'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.5 การแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

พิจารณาการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิว A อุณหภูมิ T_s มีสภาพเปล่งรังสี ϵ กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบซึ่งมีอุณหภูมิกองที่ T_{sur} อัตราการแผ่รังสีสุทธิบนพื้นผิว A คือ

$$q_{net}'' = \frac{\dot{Q}_{rad,net}}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากรูปแบบสมการ (2.11) แล้วรูปแบบสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณการแผ่รังสีจะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{rad,net} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (2.12)$$

โดยที่ h_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน มีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (2.13)$$

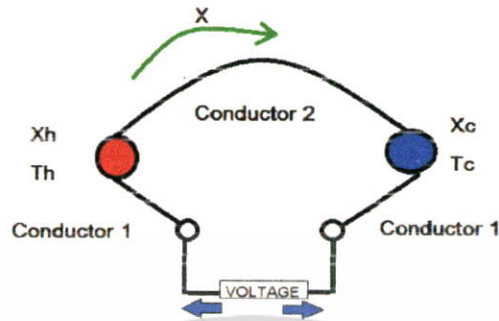
ในรูปที่ 2.5 ถ้าหากระหว่างพื้นผิว A กับสิ่งแวดล้อมเป็นก๊าซ จะมีการพาความร้อนเกิดร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนด้วย ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสุทธิออกจากพื้นผิว A คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad,net} = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.14)$$

2.3 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect)

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect) [10] เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เริ่มต้นขึ้นในปีค.ศ.1821 โดย Thomas Johann Seebeck นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ค้นพบว่าเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของตัวนำ (Conductor) สองชนิดจะเกิดแรงดันและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในตัวนำเมื่อเป็นวงจรปิดซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ต่อมาในปีค.ศ. 1834 Jean Chales Athanase Peltier นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ค้นพบว่าเมื่อนำตัวนำสองชนิดมาต่อกันแล้วทำการจ่ายกระแสให้ไหลผ่านตัวนำที่รอยต่อระหว่างตัวนำทั้งสองจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเกิดขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตั้งอยู่กับการไหลของกระแสไฟฟ้าปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์เพลทียี (Peltier Effect)

2.3.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)



รูปที่ 2.6 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีเบ็ค [11]

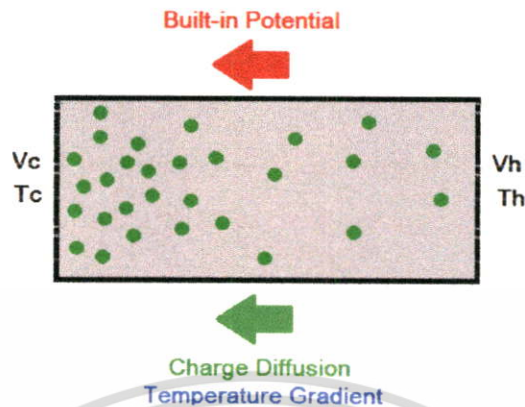
จากรูปที่ 2.6 เส้นลวดโลหะสองชนิด (Conductor 1 และ Conductor 2) ถูกเชื่อมต่อโดยจุดเชื่อมต่อ X_h ซึ่งมีอุณหภูมิสูง (T_h) และจุด X_c ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ (T_c) พาหะไฟฟ้า (Carrier) ในตัวนำจะมีทิศทางการแพร่ (Diffusion) ไปในทิศทางเดียวกันกับการถ่ายเทอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ตามทิศทาง x ที่บริเวณฝั่งด้านร้อนพาหะจะมีพลังงานสูงจึงพยายามแพร่ไปหาด้านที่เย็นกว่าเพื่อลดพลังงานลงทำให้พาหะไฟฟ้าอยู่ในภาวะสมดุลเนื่องจากลวดตัวนำทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกันจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (S) ไม่เท่ากันและทำให้เกิดแรงดันคร่อมจุดเชื่อมต่อทั้งสอง สมการ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ต่างกันของจุดต่อทั้งสองกับแรงดันที่เกิดขึ้น

$$V = (S_2 - S_1) \Delta T \quad (2.15)$$

- V คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างจุดต่อทั้งสอง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
- S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบ็คหรือค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิของโลหะชนิดต่างๆ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V) / เคลวิน (K)
- ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อทั้งสองมีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

ค่า S จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ อุณหภูมิ โครงสร้างอะตอม และชนิดของตัวนำซึ่งหากใช้ตัวนำต่างชนิด จะได้ค่า S ไม่เท่ากันทำให้ V ที่ได้จะมีค่าไม่เป็นศูนย์

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในยุคปัจจุบันจะใช้สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) มาผ่านกระบวนการโด๊ป (Doping) เพื่อให้ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) คือ สารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เป็นพาหะข้างมากและชนิดพี (P-type) คือ สารกึ่งตัวนำที่มีโฮล (ประจุบวก) เป็นพาหะข้างมาก



รูปที่ 2.7 ภาพการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิสองด้านไม่เท่ากัน

พาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีทิศทางการแพร่ (Diffusion) เป็นไปตามรูปที่ 2.6 คือพาหะมีการไหลตามทิศทางการถ่ายเทอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ การแพร่ของพาหะข้างมากก็จะเกิดการไหลของกระแส กรณีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนกระแสก็จะไหลในทิศสวนทางกับการแพร่ในรูปที่ 2.6 ไหลจากซ้ายไปขวาและถ้าหากพาหะข้างมากเป็นโฮลกระแสที่เกิดขึ้นจะไหลทิศทางเดียวกันกับการแพร่ในรูปที่ 2.7 จะไหลจากขวาไปซ้ายและแรงดัน (Built-in potential) ที่เกิดขึ้นระหว่างด้านทั้งสองที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันสามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = -\frac{V_h - V_c}{(T_h - T_c)} \quad (2.16)$$

V_h คือแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากด้านร้อน มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

V_c คือแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากด้านเย็น มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

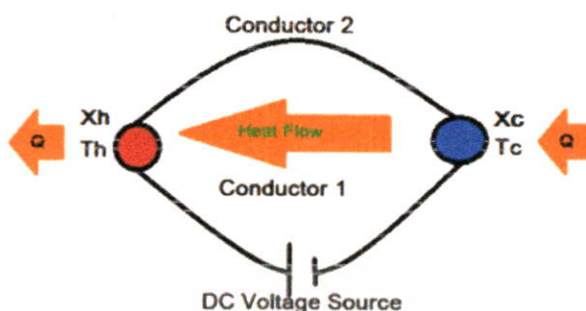
T_h คือ อุณหภูมิด้านร้อน มีหน่วยเป็น เคลวิน (K)

T_c คือ อุณหภูมิด้านเย็น มีหน่วยเป็น เคลวิน (K)

S คือ Seebeck Coefficient มีหน่วยเป็น โวลต์ (V) / เคลวิน (K)

2.3.2 ปรากฏการณ์เพลทีเย (Peltier Effect)

เป็นปรากฏการณ์การแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนซึ่งตรงข้ามกับปรากฏการณ์ซีเบ็คปรากฏการณ์เพลทีเยจะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวนำสองชนิดที่ทำการเชื่อมต่อกันโดยพาหะในตัวนำจะทำการเคลื่อนที่ซึ่งในขณะเดียวกันพาหะ จะทำการแพร่ความร้อนไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.8 DC Voltage Source ทำให้เกิดการแพร่ของพาหะจากจุด X_c ไปยังจุด X_h ทำให้อุณหภูมิจุด X_c มีค่าลดลงเท่ากับ T_c และทำให้อุณหภูมิจุด X_h มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ T_h



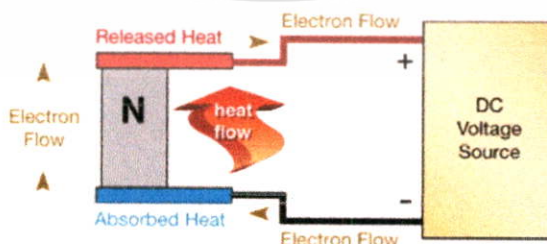
รูปที่ 2.8 วงจรการเกิดปรากฏการณ์เพลทีเย่ [12]

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับทิศทางไหลของกระแสซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพาหะสมการ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ดูดซึมทางด้านเย็นกับกระแสไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$Q_{absorb} = (\Pi_1 - \Pi_2) \times I \tag{2.17}$$

- Q_{absorb} คือ ความร้อนที่พาหะตัวนำสามารถพาไปได้มีหน่วยเป็น วัตต์ (W)
- Π คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพลทีเย่หรือพลังงานความร้อนที่ประจุไฟฟ้า 1 ประจุสามารถพาไปได้ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
- I คือ กระแสที่ไหลอยู่ในตัวนำมีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

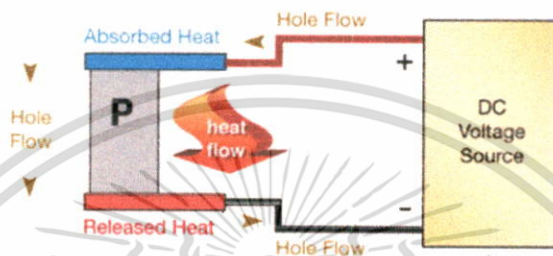
สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้นชนิดเอ็นและชนิดพีจะมีทิศทางถ่ายเทความร้อนต่างกัน ดังนี้ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมากมีประจุเป็นลบ จากรูปที่ 2.9 เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบซึ่งอยู่ด้านล่างเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ด้านล่าง อิเล็กตรอนบริเวณนั้นมีพลังงานสูงและจะพยายามแพร่ไปด้านบนเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล ระหว่างที่อิเล็กตรอนแพร่ขึ้นไปด้านบนนั้นก็จะมีนำเอาความร้อนที่ถูกดูดเข้ามาบริเวณด้านเย็นขึ้นไปปล่อยออกบริเวณด้านร้อน



รูปที่ 2.9 การเกิดปรากฏการณ์เพลทีเย่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีโฮลเป็นพาหะข้างมากมีประจุเป็นบวกจากรูปที่ 2.10 เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกซึ่งจะอยู่ข้างบนเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับโฮลที่อยู่ด้านบนโฮลบริเวณนั้นจะมีพลังงานสูงและพยายามเคลื่อนที่ลงด้านล่างเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลพลังงานความร้อนที่ดูดซึมมาจากสิ่งแวดล้อมจะถูกโฮลพาพลังงานมาปล่อยออกที่ด้านร้อน

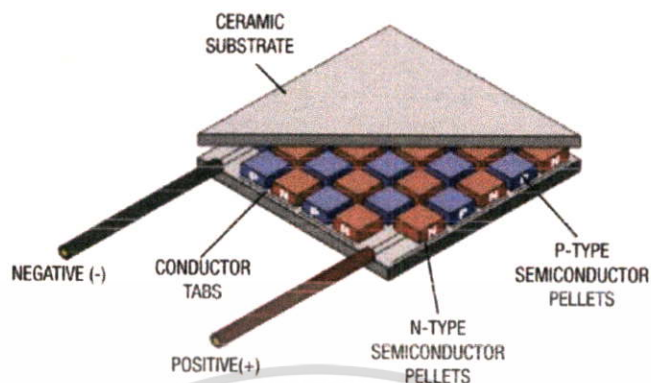


รูปที่ 2.10 การเกิดปรากฏการณ์เพลทีเยกกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี [14]

2.4 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล [15] จัดเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น (Thermoelectric Cooler) หรือถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า (Thermoelectric Generator) วัสดุที่นำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีนั้น ตามหลักควรจะเป็นวัสดุที่มีค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่สูงหรือมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมากซึ่งคือวัสดุประเภทโลหะกับสารกึ่งตัวนำเนื่องจากมีประจุไฟฟ้าอิสระมากมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำเป็นสื่อนำที่ดีเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยการเปลี่ยนคืนเป็นความร้อน ปัจจุบันเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นยังถือว่ามีประสิทธิภาพ (Efficiency) ที่ต่ำมากและถือว่าต่ำที่สุดในบรรดาวิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากความร้อนทั้งหมด แต่เนื่องจากมีข้อเด่นในเรื่องของขนาดที่เล็กมาก และไม่มีชิ้นส่วนขยับทำให้ปราศจากมลพิษทางเสียงจึงได้มีกลุ่มวิจัยส่วนหนึ่งยังคงศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น

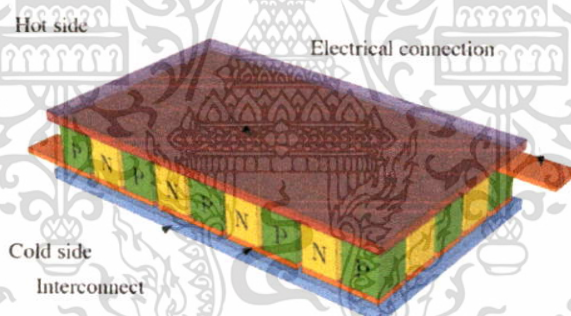
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

2.4.1 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีจะอยู่แบบเรียงกันเป็นคู่มีโลหะนำไฟฟ้าเป็นจุดเชื่อม (Interconnect) ระหว่าง (Interconnect) สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด



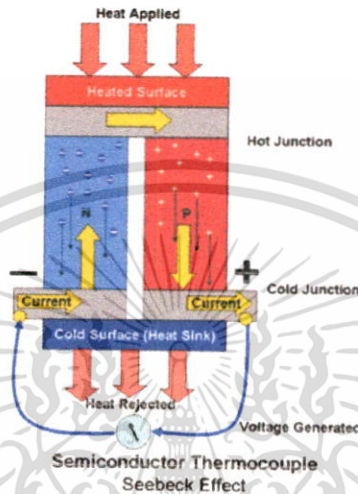
รูปที่ 2.12 โครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

2.4.2 หลักการทำงานของ Thermoelectric generator (TEG)

เป็นโหมดที่ใช้ความร้อนไปผลิตกระแสไฟฟ้าจากหลักของปรากฏการณ์ซีเบ็คโหมดนี้จะทำงานเมื่ออุณหภูมิของทั้งสองข้างของโมดูลเกิดความแตกต่างกันยกตัวอย่างการทำงานจากภาพที่ 2.12 จะให้ความร้อนความรอนที่ด้านบนและระบายความร้อนออกที่ด้านล่างทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยที่ด้านบนมีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้พาหะข้างมากบริเวณนั้นมีพลังงานสูงตามไปด้วยพาหะข้างมากจะแพร่ลงมาด้านล่างที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยพาหะข้างมากอิเล็กตรอนของชนิดเอ็นจะทำให้เกิดกระแสในทิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวนทางขึ้นด้านบนและพาหะโฮล ของชนิดพีจะทำให้เกิดกระแสทิศเดียวกัน ลงด้านล่างเมื่อ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี มีโลหะที่นำไฟฟ้ามาเชื่อมเป็นจุดต่อและทำให้เป็นวงจรปิดกระแสจะไหลได้ครบวงจรในทิศตามเข็มนาฬิกาหากทำการสลับขั้วด้านที่ให้ความร้อนเป็นด้านล่างและด้านระบายความร้อนเป็นด้านบนจะทำให้กระแสไหลกลับทิศทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.13 การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในรูปแบบ TEG [16]

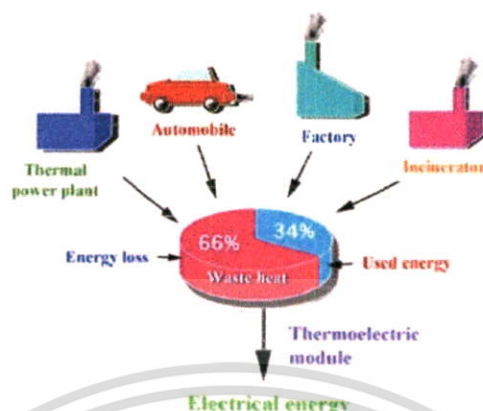
2.5 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง

2.5.1 ที่มาของความร้อนเหลือทิ้ง

การเปลี่ยนรูปพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวมวล หรือปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น เป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันและงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การใช้ความร้อนสำหรับจักรกลไอน้ำ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การใช้ความร้อนเพื่อแปรรูปโลหะ การสันดาปเครื่องยนต์ การเผาขยะในระบบปิด และการทำความเย็นแบบ Absorption เป็นต้น พบว่าประสิทธิภาพของการนำความร้อนจากแหล่งพลังงานดังกล่าวไปใช้ประโยชน์นั้นทำได้เพียง 30% - 40% เท่านั้น ความร้อนส่วนเกินต้องทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระบายความร้อนซึ่งต้องสูญเสียพลังงานไป 60% - 70% เนื่องจาก ข้อจำกัดของประสิทธิภาพคาร์โนต์ในการแปรรูปพลังงาน

ตามวัฏจักรคาร์โนต์เรียกความร้อนที่ไม่ก่อประโยชน์ว่าความร้อนเหลือทิ้ง กระบวนการแปรรูปพลังงานความร้อนและเกิดความร้อนเหลือทิ้งแสดงใน รูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้พลังงานแหล่งต่างๆ [17]

2.5.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง[18]

ความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งกำเนิดความร้อนขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมโลหะและโรงเผาขยะนับเป็นแหล่งความร้อนเกรดสูง (High Grade Source) มีอุณหภูมิมากกว่า 650°C ส่วนโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากปล่องไอเสียเครื่องยนต์จะมีอุณหภูมิปานกลางประมาณ $120^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$ ขณะที่ความร้อนจากการหุงต้มหรือกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ใช้ไอน้ำแรงดันต่ำจะเป็นความร้อนเกรดต่ำ (Low Grade Source) มีอุณหภูมิสูงในช่วง $60^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$ โดยประมาณตั้งแสดงข้อมูลเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ซึ่งความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่แทนที่จะทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยเปล่าประโยชน์อีกประการหนึ่งลักษณะของความร้อนเป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากจึงสามารถนำมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนเพื่อคืนกลับพลังงานเหลือทิ้งมาเป็นพลังงานไฟฟ้าจะช่วยให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าเสริมตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน

ตารางที่ 2.3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง

Type of device	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature ($^{\circ}\text{F}$)
Steam boiler exhausts	123 - 482	450 - 900
Gas turbine exhausts	371 - 538	700 - 1000
Reciprocating engine exhausts	316 - 593	600 - 1100
Heat treating furnace	427 - 649	800 - 1200
Drying and backing ovens	232 - 593	450 - 1100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ

Type of device	Temperature (°C)	Temperature (°F)
Process steam condensate	54 – 88	130 - 190
Cooling water from :		
Furnace	32 – 55	90 – 130
Bearing	32 – 88	90 – 190
Welding machines	32 - 88	90 – 190
Injection molding machines	32 - 88	90 – 190
Air compressor	27 - 49	80 – 120
Internal combustion engines	66 – 121	150 – 250
Air-cond. And refrig. condensers	62 - 43	90 – 110

2.6 ท่อความร้อน (Heat Pipe)

ท่อความร้อนหรือฮีทไปป์ [19] คือ อุปกรณ์อย่างง่ายซึ่งมีความสามารถถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆได้รวดเร็วมากโดยเปรียบเทียบกับตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้ทั้งหมดโดยไม่มีการสูญเสีย

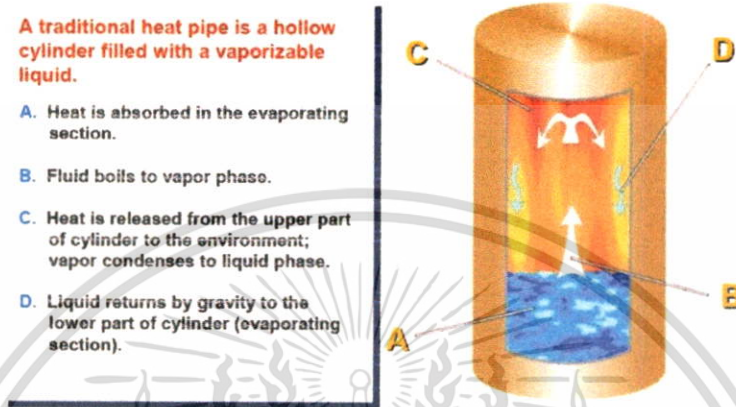
ฮีทไปป์ถูกคิดค้นในช่วงประมาณปี ค.ศ. 1950 และ ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงตั้งแต่ ค .ศ. 1970 เป็นต้นมาและค้นคว้าและพัฒนาจนถึงปัจจุบันมีเวลายาวนานกว่า 60 ปีแล้ว โดยแรกเริ่มต้นในต้นเทคโนโลยีอวกาศ ดาวเทียม โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยในระยะหลัง 10-15 ปี จนถึงปัจจุบัน ฮีทไปป์ได้ถูกนำมาใช้ในการลดความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ หรือ นำไปใช้ด้านประหยัดพลังงานและแลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมทั่วไป

2.6.1 หลักการทำงานของท่อความร้อน

ฮีทไปป์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือส่งถ่ายความร้อนได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ส่วนประกอบของฮีทไปป์จะเป็นท่อโลหะที่ปิดหัวท้ายภายในเป็นสุญญากาศที่มีสารทำงาน (Working Fluid) บรรจุอยู่ภายในซึ่งมักจะเป็นสารทำความเย็น (Refrigerant) ฟร็อน 22 หรือ 134a การทำงานของฮีทไปป์อาศัยหลักการเปลี่ยนสถานะจากการระเหยและควบแน่นร่วมกับ แรงโน้มถ่วงของสารทำงานโดยไม่ใช่พลังงานจากภายนอก (Passive) กล่าวคือ สารทำงานในท่อด้านที่ต่ำกว่า เมื่อได้รับความร้อนก็จะระเหยเป็นไอลอยขึ้นไปยังด้านที่สูงกว่า แล้วคายความร้อนออกทำให้ไอของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

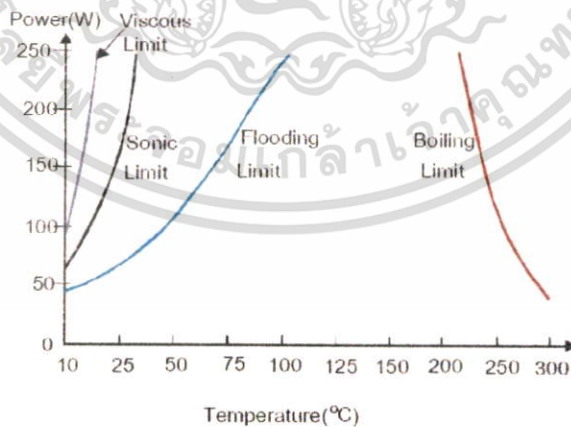
ทำงานมีอุณหภูมิลดลงถึงจุดควบแน่นกลายเป็นของเหลวตกลงสู่ด้านที่ต่ำกว่าอีก ๑ ครั้งและด้วยเหตุนี้จึงเรียกด้านที่อยู่ต่ำกว่าว่าด้านระเหย (Evaporation Section) และเรียกด้านที่อยู่สูงกว่าว่าด้านควบแน่น (Condensation Section) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างภายในของฮีทไปป์

2.6.2 ขีดจำกัดของฮีทไปป์ [20]

การถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาณสารทำงานที่เติม มุมเอียงสัดส่วนความยาวในการทำงานของท่อชนิดสารทำงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เป็นต้น ผลจากการเปลี่ยนตัวแปรไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดขีดจำกัด เนื่องจาก กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในท่อฮีทไปป์ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Limit Heat pipe (www. Electronics Cooling.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 สารทำความเย็น (Refrigerants)

สารทำความเย็น เป็นของไหลทำงานที่สำคัญในระบบความเย็นมันจะรับความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ต้องการขจัดและคายความร้อนนี้ทิ้งไปความร้อนจะถูกเคลื่อนย้ายจากระบบโดยการระเหยของสารทำความเย็นเหลวและคายความร้อนทิ้งไปโดยการควบแน่นของไอสารทำความเย็นเพื่อให้เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารทำความเย็นใน วัฏจักรอัดไอเชิงกล ของไหลนั้นๆ ควรจะต้องมีสมบัติทางเคมีทางกายภาพและทางอุณหพลศาสตร์ที่แน่นอนซึ่งทำให้มีความปลอดภัยและมีราคาถูก

ความหมายและหน้าที่ของสารทำความเย็น

สารที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนนี้วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้บัญญัติคำศัพท์ทางวิชาการขึ้นเรียกว่า “ สารทำความเย็น ” และให้ความหมายของคำว่าสารทำความเย็นไว้ว่า หมายถึง สารที่ทำให้เกิดความเย็นโดยการดูดความร้อน เมื่อขยายตัวหรือเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นไอ สารนี้ในสภาพไอถ้าได้ระบายความร้อนออกจะคืนสภาพเป็นของเหลว

สารทำความเย็นทำหน้าที่เป็นสารตัวกลางในการทำความเย็น (ถ่ายเทความร้อน) ขณะที่สารทำความเย็นในระบบภายในอีแวปอเรเตอร์เดือดเปลี่ยนสถานะเป็นไอที่อุณหภูมิ และความดันต่ำจะต้อง คายความร้อนแฝงดูดซับปริมาณความร้อนจากอากาศภายในห้องรออบอีแวปอเรเตอร์ ปริมาณความร้อนจำนวนนี้จะถูกระบายออกทิ้ง ภายนอกห้องที่คอนเดนเซอร์เพื่อให้สารทำความเย็นกลั่นตัวเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่ง

สารทำความเย็นที่ใช้โดยทั่วไปในงานเครื่องทำความเย็น

สารทำความเย็นในระยะแรกๆ ได้แก่ แอมโมเนียและ CO₂ เป็นสารทำความเย็นที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่ ต่อมา มี ฆวนาเอซัลเฟอร์ไดออกไซด์และเมทิลคลอไรด์ใช้กับเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก ต่อมาจึงใช้สารทำความเย็นพวกฟลูออโรคาร์บอนแทนและยังใช้อยู่ในปัจจุบัน สารทำความเย็นฟลูออโรคาร์บอนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เป็นสารประกอบระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนและนำเอาคลอรีนหรือฟลูออรีนเข้าไปแทนที่ ไฮโดรเจน ทั้งหมดนี้เรียกว่า ฮาโลคาร์บอน โดยชนิดและคุณสมบัติของสารทำความเย็นที่ยังใช้ในระบบเครื่องเย็น ดังนี้คือ

- แอมโมเนีย เป็นสารทำความเย็นที่เป็นพิษและไวไฟหรืออาจเกิดได้ถ้ามีส่วนผสมกับอากาศที่พอเหมาะ เป็นสารทำความเย็นที่ดูดซับปริมาณความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ปัจจุบัน พบว่าใช้ในโรงงานทำน้ำแข็ง , โรงงานบรรจุอาหาร, ลานสกเกตน้ำแข็งและห้องเย็นขนาดใหญ่ๆ มีความดันในการกลั่น 1.4 Kg/cm² ที่อุณหภูมิ -15 °C และ 10.85 Kg/cm² ที่อุณหภูมิ 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ซัลเฟอร์ไดออกไซด์** เป็นสารทำความเย็นที่เป็นพิษแต่ไม่ติดไฟและไม่ระเบิด ยังมีโซลูบิวัง จุดเดือดของสารทำความเย็นนี้อยู่ที่ประมาณ -9.5°C ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิมีมัตว -15°C และที่ 30°C มีความดัน 3.64 Kg/cm^2 ไม่ละลายน้ำกับน้ำมันหล่อลื่นคอมเพรสเซอร์และหนักกว่าน้ำมัน สารทำความเย็น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ บริสุทธิ์ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะแต่ถ้ามีความชื้นในระบบจะมีสภาพเป็นกรดกำมะถัน ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโลหะ

- **คาร์บอนไดออกไซด์** เป็นสารทำความเย็นชนิดแรกที่ใช้ในระบบเครื่องทำความเย็นอุตสาหกรรมเรือเดินทะเล โรงละคร โรงแรมและที่อื่นๆ ที่ ต้องการความปลอดภัยเป็นพิเศษ เป็นสารทำความเย็นที่ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟหรือระเบิดหรือไม่กัดกร่อนโลหะ

- **เมทิลคลอไรด์** เป็นสารพวกฮาโลคาร์บอนของมีเทนจุดเดือดอยู่ที่ -24°C ที่ความดันบรรยากาศ ใช้ในเครื่องทำความเย็นในบ้าน เช่น ตู้เย็นและตู้แช่ ซ เมทิลคลอไรด์ไม่เป็นพิษเมื่อมีส่วนผสมมาก ติดไฟปานกลางและระเบิดเมื่อผสมกับอากาศระหว่าง $8.1\% - 17.2\%$ โดยน้ำหนัก จะทำปฏิกิริยากับโลหะพวกอะลูมิเนียม สังกะสี แมกนีเซียม ซึ่งเมื่อผสมกับโลหะเหล่านี้อาจจะระเบิดได้ ถ้ามีความชื้นจะระเหิดเป็นกรดไฮโดรคลอริกอย่างอ่อน ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโลหะจำพวกเหล็กและอื่นๆ นอกจากนั้นยังทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติและยางเทียมและยังเป็นน้ำยาที่ละลายในน้ำมันเครื่อง

- **สารทำความเย็น R-11** เป็นพวกฟลูออโรคาร์บอนของมีเทน จุดเดือดอยู่ที่ 823.7°C ที่ความดันบรรยากาศ เป็นน้ำยาที่ไม่ เป็นพิษ ละลายน้ำได้อย่างดีและไม่ติดไฟ ละลายยางธรรมชาติได้ ใช้เป็นสารทำความเย็นล้างระบบทำความเย็น

- **สารทำความเย็น R-12** ใช้สำหรับเครื่องทำความเย็นที่ใช้ในบ้าน เช่น ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ รถยนต์ มีสภาพแน่นอนไม่เปลี่ยนสภาพได้ง่ายแม้อุณหภูมิสูง จุดเดือดอยู่ที่ -29.87°C ที่ความดันบรรยากาศ สารทำความเย็น R-12 สามารถละลายในน้ำมันได้อย่างดีทุกสถานะ

- **สารทำความเย็น R-22** เป็นสารทำความเย็นที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศมาก ที่จุดเดือดอยู่ที่ -40.8°C ที่ความดันบรรยากาศและสามารถทำได้ถึง -87°C

- **สารทำความเย็น R-113** เป็นสารทำความเย็นที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นที่ทำงานเป็น 2 หรือ 3 ช่วง สามารถใช้แทน R-22 ได้ในเครื่องที่มีอุณหภูมิต่ำบางเครื่อง จุดเดือดอยู่ที่ -98°C ที่ความดันบรรยากาศใช้กับคอมเพรสเซอร์ได้ทุกชนิด ไม่ละลายในน้ำมัน

- **สารทำความเย็น R-500** เป็นสารทำความเย็นระหว่าง R-22 กับ R-152a (78% กับ 26.2% โดยน้ำหนัก) สารทำความเย็น R-500 มีจุดเดือดอยู่ที่ -33°C (-28°F) ที่ความดันบรรยากาศ

- **สารทำความเย็น R-502** เป็นสารทำความเย็นที่มีส่วนผสมของสารทำความเย็น 2 ชนิด คือ R-22 เท่ากับ 48.8% ผสมกับ R-115 เท่ากับ 51.2% เป็นสารทำความเย็นที่ใช้ได้ดีในระบบต้องการอุณหภูมิที่ต่ำขนาด $0^{\circ}\text{F} - 60^{\circ}\text{F}$ สารทำความเย็นชนิดนี้จะใช้ในห้องเก็บอาหารแช่แข็งหรือเย็นจัด ตู้เก็บอาหารเย็นจัดจนแข็งและถังไอศกรีม

- สารทำความ เย็น R-503 เป็นสารทำความเย็นที่มีส่วนผสมของสารทำความเย็น R-23 และ R-13 สัดส่วนเท่ากับ 40.1% กับ 59.9% ตามลำดับ จุดเดือดของสารทำความเย็นชนิดนี้ที่แรงดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ - 128.6 °F ซึ่งเป็นระบบทำความเย็นที่ใช้ในห้องทดลองหรือประเภทระบบเครื่องเย็นอุณหภู มิต่ำที่ต้องการอุณหภู มิ - 100°F ถึง -125°F แรงดันทางต่ำที่ 50°F เท่ากับ 264 psia และแรงดันทางต่ำที่อุณหภู มิวิกฤติ (Critical Temperature 67.1°F) เท่ากับแรงดันวิกฤติ (Critical Pressure 607 psia)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

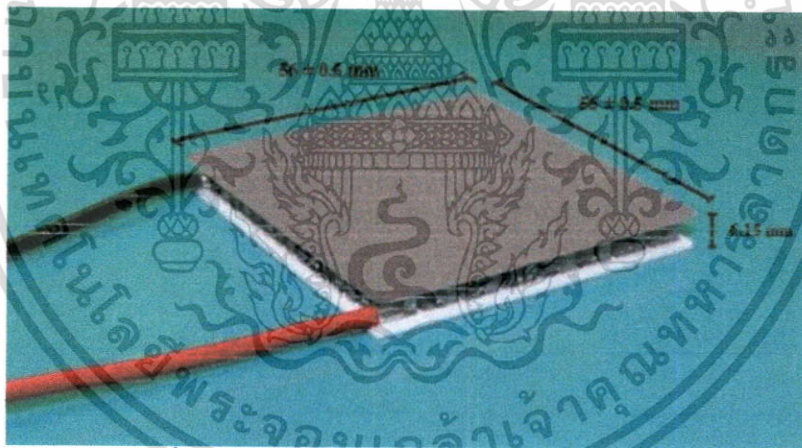
อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลในทางทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล มาผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้งานวิจัยนี้เกิดแนวคิดที่จะใช้ความร้อนจากเตาหุงต้ม [21] มาทำการผลิตกระแสไฟฟ้า และทำการออกแบบซีทไปป์ร่วมกับถังน้ำเพื่อช่วยเพิ่มการระบายความร้อนให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งจะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลรุ่น TEHP1-24156-1.2ผลิตจากบริษัท Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd. ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นโหมดสำหรับผลิตไฟฟ้า (Generator mode) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ทำมาจาก บิสมัทเทลลูไรด์ (Bismuth telluride; Bi_2Te_3) ขนาด $56 \times 56 \times 6.15$ มิลลิเมตรสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่อเนื่องที่ 400°C และอุณหภูมิสูงสุดที่ 330°C คุณสมบัติต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-24156-1.2

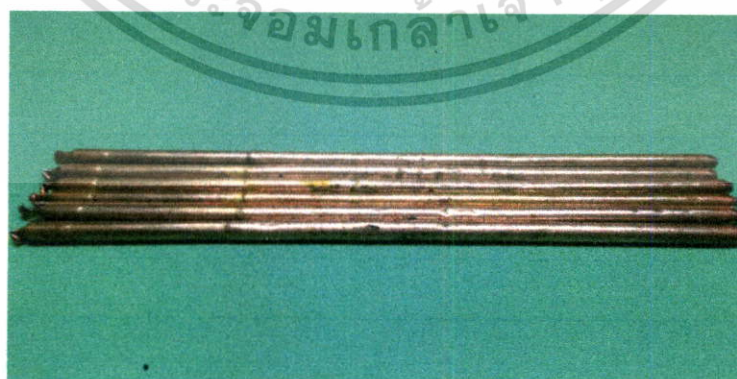
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่นTEHP1-24156-1.2จากผู้ผลิต [22]

Hot Side Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	300
Cold Side Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	30
Open Circuit Voltage (V)	14.4
Matched Load Resistance (ohms)	2.5
Matched load output voltage (V)	7.2
Matched load output current (A)	2.9
Matched load output power (W)	20.9
Heat flow across the module(W)	418
Heat flow density(W cm^{-2})	13.3

3.1.2 ฮีทไปป์

ฮีทไปป์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือส่งถ่ายความร้อนได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ส่วนประกอบของฮีทไปป์จะเป็นท่อโลหะ ที่ทำมาจากทองแดง ปิดหัวปิดท้าย ภายในเป็นสุญญากาศที่มีสารทำงาน (Working Fluid) ซึ่งมีน้ำเป็นสารทำความเย็น (Refrigerant) บรรจุอยู่ภายใน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.75 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร จำนวน 6 ชิ้น และฮีทไปป์ยังเป็นอุปกรณ์อย่างง่ายซึ่งมีความสามารถถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆได้รวดเร็วมาก โดยเราเปรียบเทียบกับตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้ทั้งหมดโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน

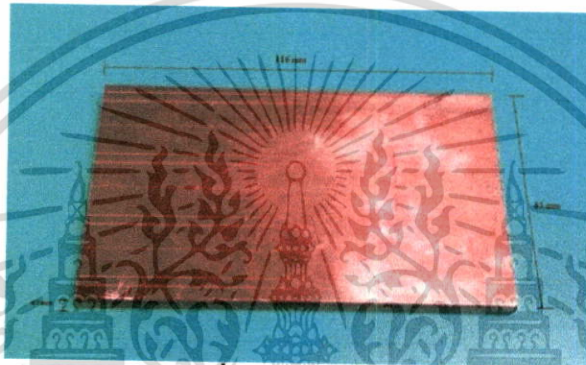


รูปที่ 3.2ฮีทไปป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 แผ่นทองแดง

เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะอ่อน จึงจัดเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย นำความร้อนได้ดี มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดค่อนข้างสูงจุดเด่นอีกอย่างหนึ่งของทองแดงก็คือ ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก แม้ในสภาวะกัดกร่อนอย่างรุนแรง เช่น ในน้ำทะเล โดยใช้แผ่นทองแดงขนาด $116 \times 63 \times 6.3$ มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น แผ่นแรกจะใช้สำหรับกักทิศทางด้านบนของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_H) ส่วนแผ่นที่สองจะทำการกักร่องเครื่องวงกลมจำนวน 6 ร่อง สำหรับวางฮีทไปป์ใช้สำหรับเป็นฐานทางด้านล่างของชุดระบายความร้อน



รูปที่ 3.3 แผ่นทองแดง

3.1.4 ดอกกัดหัว Carbide Endmill

ดอกกัดหัว Carbide Endmill ใช้สำหรับกัดร่องและกัดข้าง มีประสิทธิภาพสูงเรื่องด้านการสึกหรอและการหล่อลื่น มีการเคลือบผิวด้วย Aluminum Titanium Nitride (AlTiN) และ Titanium Aluminum Nitride (TiAlN) ที่สามารถระบายความร้อนออกไปกับเศษโลหะได้ดีมาก การเลือกดอกกัดหัว Carbide Endmill สำหรับงานทองแดงนี้ ใช้ชนิดกลม ขนาด 8 มิลลิเมตร และชนิดหัวตัด ขนาด 10 มิลลิเมตร

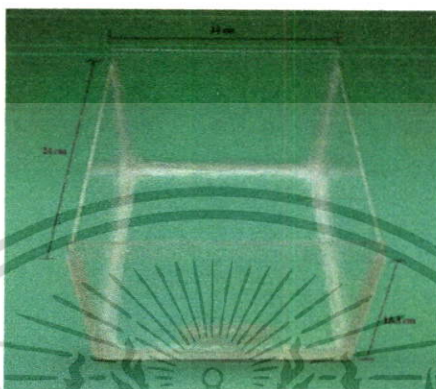


รูปที่ 3.4 EAD MILL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ถังน้ำ

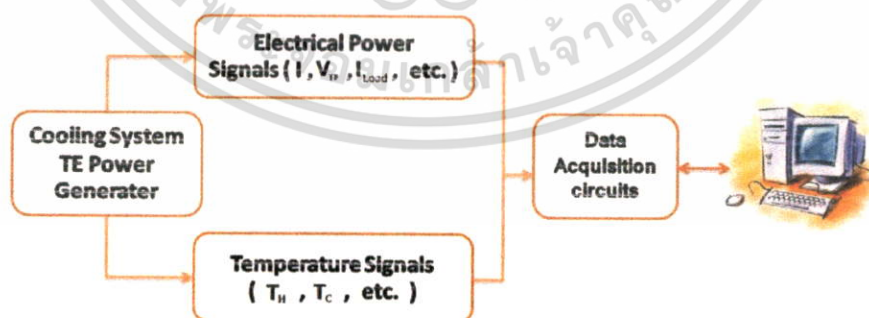
ใช้แผ่นพลาสติกพีวีซี (สีใส) เนื่องจากสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและความร้อนได้ มีน้ำหนักเบาสามารถตัด ตัด เจาะ ได้ง่าย โดยถังน้ำมีขนาด $24 \times 24 \times 15.3$ เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 ถังน้ำ

3.1.6 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ

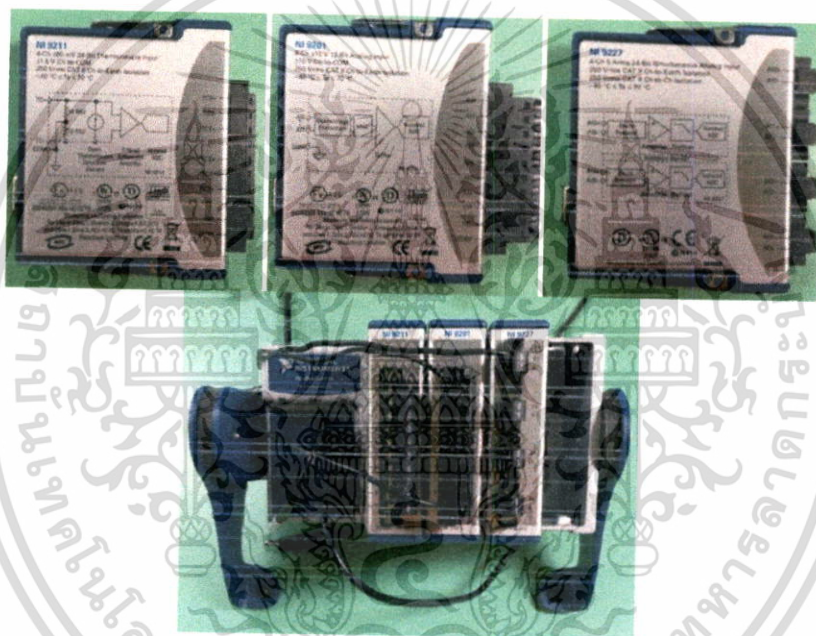
ในระหว่างกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้น จะมีตัวแปรต่างๆที่ต้องศึกษามากมาย เช่น อุณหภูมิของแหล่งความร้อน (T_H), อุณหภูมิในการระบายความร้อน (T_C), อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (T_R) รวมถึงค่ากระแสไฟฟ้า (I) และค่าความต่างศักย์ (V) ที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ฯลฯ ตัวแปรต่างๆเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลถึงประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการจัดเก็บข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำเพื่อจะได้นำข้อมูลไปวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้อง ในอดีตใช้วิธีการจดบันทึกค่า จากการทดลองซึ่งวิธีนี้ให้ความแม่นยำต่ำและส่งผลถึงการวิเคราะห์ข้อมูลที่ผิดพลาดไปทำให้การทดลองมีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก



รูปที่ 3.6 กระบวนการจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ดังนั้นในโครงการนี้จึงต้องออกแบบและสร้างระบบจัดเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.6 เริ่มต้นจากการนำสัญญาณในระหว่างการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ สัญญาณอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และสัญญาณไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจะถูกแปลงผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Data Acquisition (DAQ) ซึ่งมีความเร็วในการเก็บข้อมูลในระดับมิลลิวินาที (ms) จะใช้ NI 9211 สำหรับวัดอุณหภูมิทางด้านร้อนและด้านเย็น , NI 9201 สำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า และ NI 9227 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า ความแม่นยำในการวัดข้อมูลเป็น $\pm 0.05\%$, $\pm 0.04\%$ และ $\pm 0.1\%$ ตามลำดับ ก่อนที่จะจัดเก็บในเครื่องคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โปรแกรมมาตรฐานที่มีชื่อว่า Labview ในการจัดเก็บสัญญาณและแสดงผลแบบ Real Time ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บและนำมาวิเคราะห์เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกต่อไป



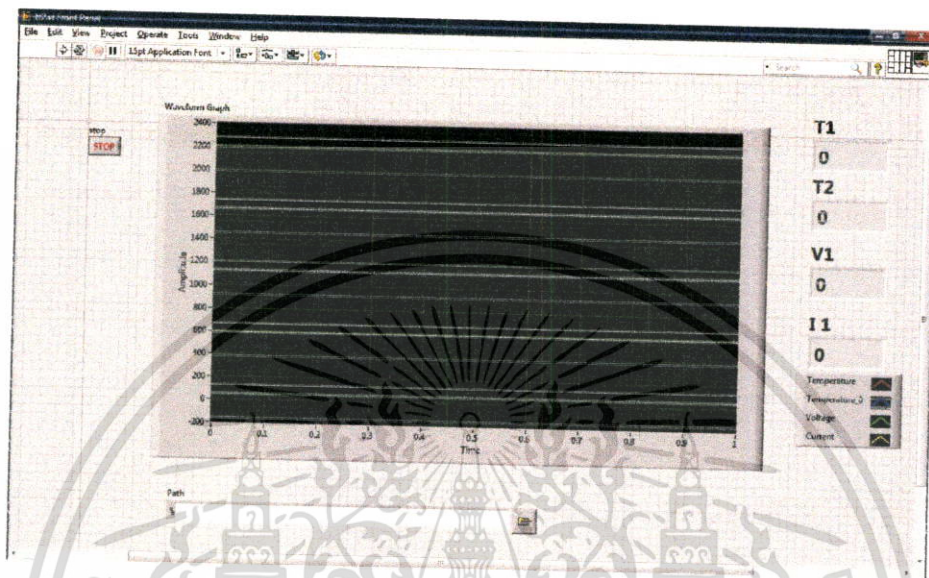
รูปที่ 3.7 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติประกอบด้วย NI 9211 , NI 9201 และ NI 9227

3.1.7 โปรแกรม Lab View

LabView ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการจัดการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรมซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลมาใช้ในการคำนวณและเก็บข้อมูลให้ได้ประโยชน์สูงสุดโดยจากรูปที่ 3.8 จะแสดงแผนภาพลักษณะของโปรแกรม Lab View ในการใช้งานหากจะเริ่มต้นการบันทึกค่าให้กดภาพลูกศร (RUN) กราฟการทดลองจะปรากฏที่ Waveform Graph ส่วนค่าตัวเลขผลการทดลองจะปรากฏที่ T1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

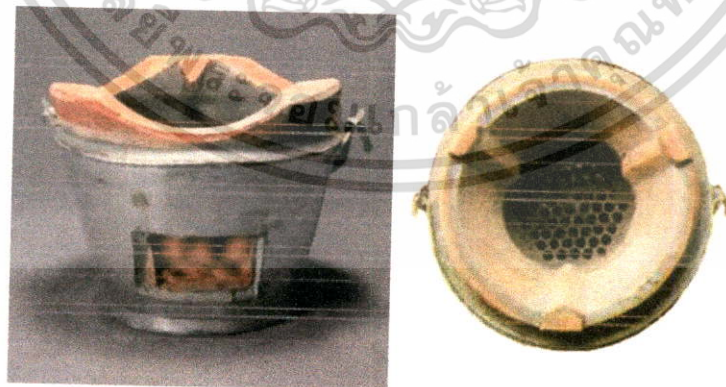
แสดงค่าอุณหภูมิที่ด้านร้อน , T2 แสดงค่าอุณหภูมิที่ด้านเย็น , V1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า , I1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและกด STOP เมื่อสิ้นสุดการบันทึกค่า



รูปที่ 3.8 โปรแกรม Lab View

3.1.8 เตาหุงต้ม

แหล่งพลังงานความร้อนในงานวิจัยนี้คือ เตาหุงต้ม โดยจะนำชุดระบบระบายความร้อนของฮีทไปป์ ร่วมกับน้ำขนาด $116 \times 63 \times 25.35$ มิลลิเมตร มาติดเข้ากับทางด้านใต้ส่วนที่เป็นรังผึ้งของเตาหุงต้มโดยใช้ลวดเป็นตัวยึด



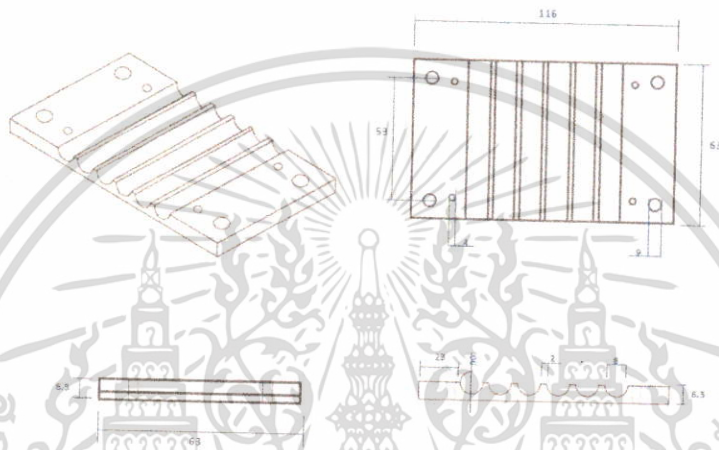
รูปที่ 3.9 เตาหุงต้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การออกแบบลักษณะของฮีทไปป์

1) เลือกใช้แผ่นทองแดง 3 แผ่น เป็นฐานสำหรับติดเข้ากับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก 2 แผ่น และ เป็นส่วนบนสุดสำหรับติดเข้ากับด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากทองแดงมีสมบัติการนำความร้อนที่ดี ซึ่งในการออกแบบลักษณะของฐานทั้งสองด้านนี้จะใช้โปรแกรม AutoCAD ในการออกแบบ



รูปที่ 3.10 ภาพไอโซเมตริกแสดงลักษณะของฐานทั้งสองด้านของชุดระบายความร้อน

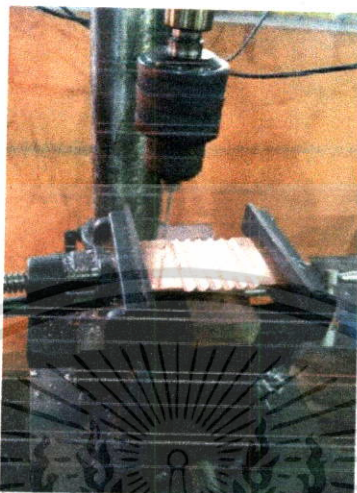
2) การนำแผ่นทองแดงมากัดให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้ โดยใช้เครื่องกัดและดอกกัด หัว Carbide Endmill ชนิดกลม ขนาด 8 มิลลิเมตร และชนิดหัวตัด ขนาด 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 การกัดชิ้นงานแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) นำทองแดงแผ่นที่เป็นฐานมาเจาะรู โดยใช้ดอกสว่าน HSS ขนาด 4 มิลลิเมตรชุดดอกสว่าน makita D-31522

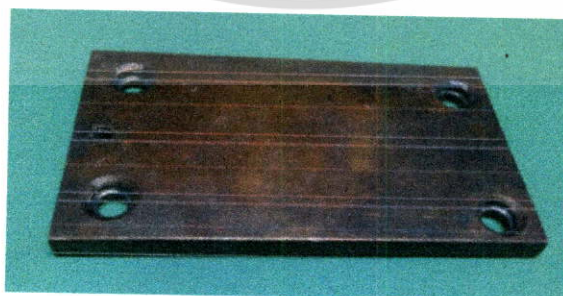


รูปที่ 3.12 การเจาะรูชิ้นงานแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานแผ่นทองแดงที่ทำการกัดและเจาะรูเรียบร้อยแล้ว

4) นำแผ่นทองแดงส่วนที่อยู่ส่วนบนสุด (ติดกับทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล) ขนาดความหนา 6.3 มิลลิเมตร กว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร มาเจาะรูโดยใช้ดอกสว่าน HSS ขนาด 9 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานแผ่นทองแดง (ส่วนปิดทับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล) ที่ทำการเจาะรูเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

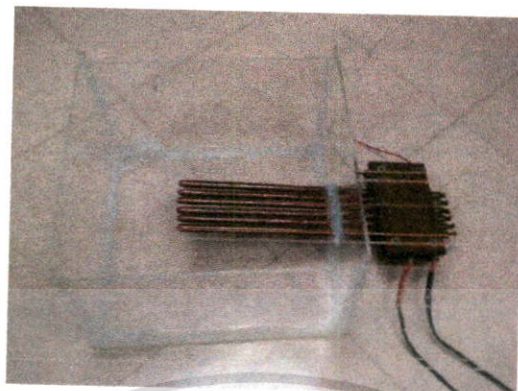
5) นำแผ่นทองแดงไปตะไบแล้วนำมาขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อตกแต่งพื้นผิวให้เรียบเนียนเสมอกัน พร้อมทั้งประกอบเข้ากับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-24156-1.2 และ ฮีทไปป์ ทั้ง 6 ชั้น

3.2.2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อระบบระบายความร้อนเป็นฮีทไปป์

- 1) ใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่เทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) นำฮีตเตอร์มาวางติดเข้ากับชุดระบายความร้อน โดยวางติดกับแผ่นทองแดงที่อยู่ด้านบนสุดของชุดระบายความร้อน (ติดกับทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก) และด้านเย็นติดอยู่กับฐานของแผ่นทองแดง
- 3) ปรับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ ที่ระดับอุณหภูมิ 150°C, 200°C และ 250°C (เป็นอุณหภูมิเดียวกับด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก) และวัดอุณหภูมิที่ฐานแผ่นทองแดงของชุดระบายความร้อน (เป็นอุณหภูมิเดียวกับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก) โดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกทำได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ
- 4) กำหนดค่าความต้านทานเท่ากับ 2 Ω ปรับระดับของฮีตเตอร์ไปที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ เพื่อให้สามารถทราบผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกสูงสุด และทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละอุณหภูมิ ที่ชุดระบายความร้อนสามารถทำได้

3.2.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อระบบระบายความร้อนเป็นฮีทไปป์ร่วมกับถังน้ำโดยใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งให้ความร้อน

- 1) ใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่เทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) นำฮีตเตอร์มาวางติดเข้ากับชุดระบายความร้อน โดยวางติดกับแผ่นทองแดงที่อยู่ด้านบนสุดของชุดระบายความร้อน (ติดกับทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก) และด้านเย็นติดอยู่กับฐานของแผ่นทองแดง
- 3) บันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกทำได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 ระบบระบายความร้อนที่เป็นฮีทไปป์ร่วมกับถังน้ำ

3.2.4 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อระบบระบายความร้อนเป็นฮีทไปป์ร่วมกับถังน้ำโดยใช้เตาหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อน

- 1) ใช้เตาหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่เทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) นำชุดระบายความร้อน สอดติดไว้บริเวณภายในเตาหุงต้มในส่วนใต้ของวางผิง โดยใช้ลวดเป็นตัวยึดให้ติดกับแผ่นทองแดงที่อยู่ด้านบนสุดของชุดระบายความร้อน จากนั้นทำการจุดเตาหุงต้มโดยใช้ถ่าน 400 กรัม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) บันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกทำได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 ระบบระบายความร้อนที่เป็นฮีทไปป์ร่วมกับถังน้ำ ยึดติดกับเตาหุงต้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทที่กล่าวมา ได้ทำการออกแบบและทดลองระบบโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน ซึ่งในบทนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ผลการทดลองในเบื้องต้น การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ ประสิทธิภาพของระบบ การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงความร้อน ระหว่างรอยต่อของระบบ และผลการทดลองภาคสนาม โดยแสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองในเบื้องต้น

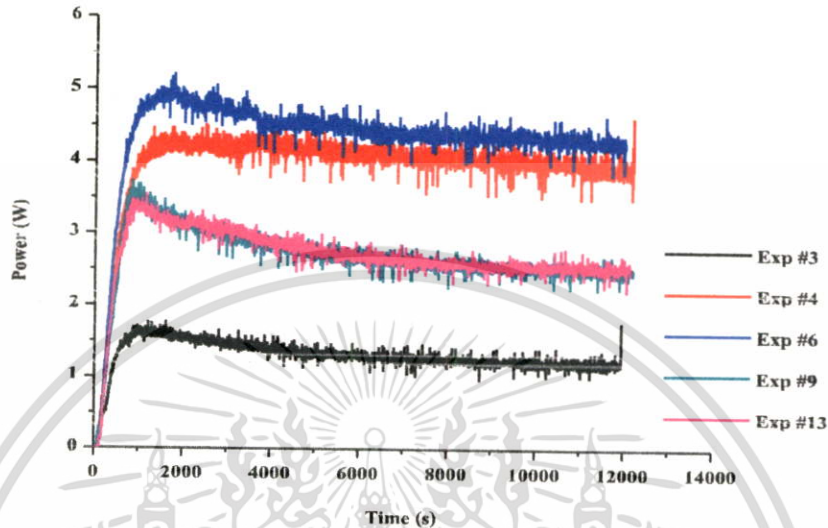
ในเบื้องต้นการออกแบบและทดลองระบบโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อนโดยมีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำ ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology) ซึ่งออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design) แสดงดังตารางที่ 4.1 แต่สำหรับในการวิเคราะห์ผลนั้นได้ทำการเลือก 5 การทดลองเพื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) , อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) , อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (Q_w) และอุณหภูมิของน้ำ (T_w) โดยจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.1-4.1.4

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่าง
พื้นผิว ซึ่งออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

การทดลอง	อุณหภูมิทางด้านร้อน (°C)	ปริมาณน้ำ (Liter)
1	150	5
2	250	5
3	150	9
4	250	9
5	130	7
6	271	7
7	200	4.2
8	200	9.8
9	200	7
10	200	7
11	200	7
12	200	7
13	200	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P)



รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลาจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.31 วัตต์ , 3.94 วัตต์ , 4.34 วัตต์ , 2.67 วัตต์ และ 2.69 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 1500 วินาที (25 นาที) และหลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มคงที่เวลาประมาณ 2000 วินาที (33นาที)ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (4.1) และสรุปค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) ดังตารางที่ 4.2

$$P = IV \quad (4.1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

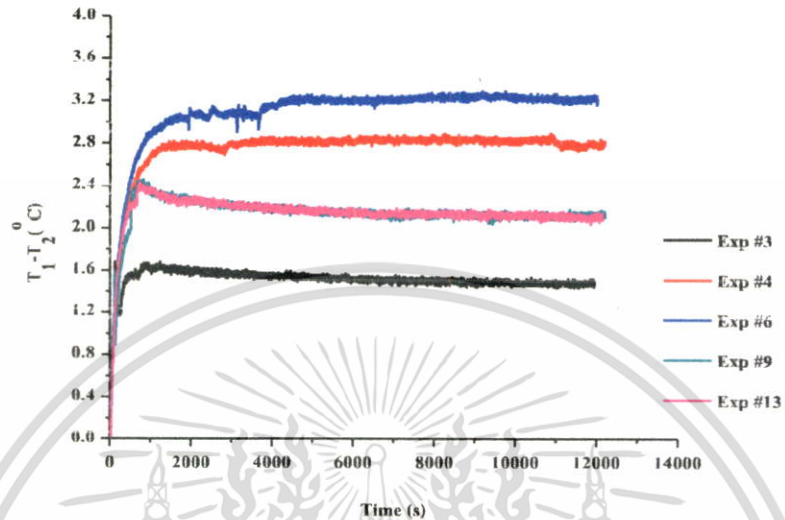
V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) ทั้งหมด 13 การทดลอง

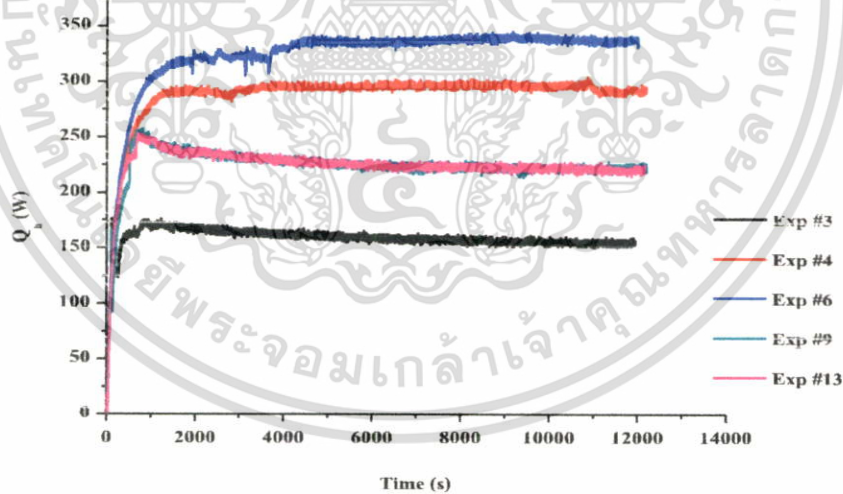
ครั้งที่	P เฉลี่ย (W)	P สูงสุด (W)
1	1.02	2.04
2	3.83	4.80
3	1.31	1.80
4	3.94	4.62
5	0.73	1.52
6	4.34	5.23
7	2.48	3.36
8	2.76	3.48
9	2.67	3.74
10	2.70	3.60
11	2.74	3.64
12	2.60	3.34
13	2.69	3.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h)



รูปที่ 4.2(ก) ความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_1-T_2) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2(ข) อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13ตามลำดับ

รูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข) ความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_1-T_2) กับเวลาและอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ

T_1 - T_2 ทำให้สามารถหาอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) ดังสมการที่ (4.2) โดยที่ในงานวิจัยของเราทำการสมมติฐาน 2 ข้อ คือ อุณหภูมิจะไหลจากจุด T_1 ไปยังจุด T_2 อาศัยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนน้อยมาก จึงสามารถหาอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบได้ ดังนั้นเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 - T_2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เท่ากับ 160 วัตต์ , 290 วัตต์ , 345 วัตต์ , 250 วัตต์ และ 240 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 1500 วินาที (25 นาที) และหลังจากนั้นอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบเริ่มคงที่เวลาประมาณ 2000 วินาที (33 นาที) ซึ่งผลการวัดอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) และความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 - T_2 ทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.3

$$Q_h = \frac{kA\Delta T}{x} \quad (4.2)$$

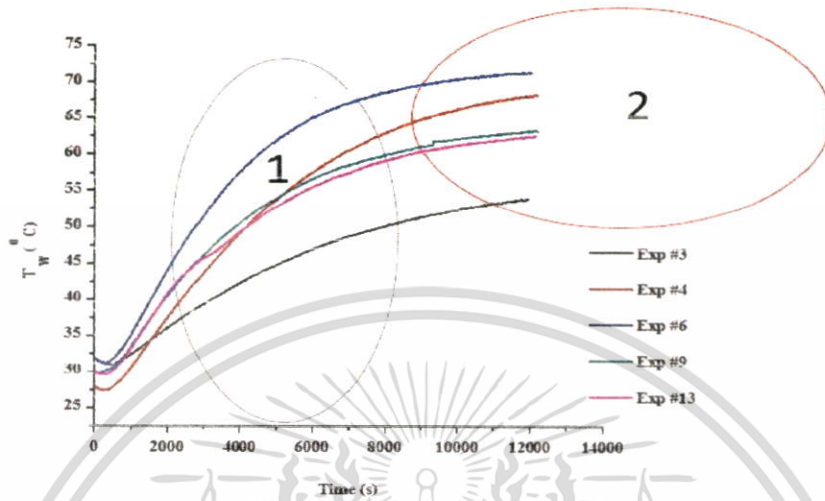
เมื่อ k คือ การนำความร้อนของทองแดง ($401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) [2]
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของเทอร์โมอิเล็กทริก ($3136 \times 10^{-6} \text{ m}^2$)
 ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิ (T_1 - T_2) ($^{\circ}\text{C}$)
 x คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ T_1 กับ T_2 (cm)

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ $T_1 - T_2$ (°C) และการคำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่เข้าไปในระบบ ทั้งหมด 13 การทดลอง

ครั้งที่	$T_1 - T_2$ (°C)	$Q_{\text{ค}}$ (W)
1	1.70	170
2	3.00	320
3	1.70	160
4	2.91	290
5	1.30	130
6	3.30	345
7	2.50	250
8	2.44	250
9	2.47	240
10	2.40	240
11	2.33	230
12	2.38	230
13	2.43	240

4.1.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (Q_w) และอุณหภูมิน้ำ (T_w)

การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คืออุณหภูมิ
น้ำเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และอุณหภูมิน้ำคงที่ โดยแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ช่วงที่ 1) และอุณหภูมิน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ตามการทดลองที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 ตามลำดับ

รูปที่ 4.3 อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ช่วงที่ 1) สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำออกมาได้จากการถ่ายเทความร้อนจากท่อความร้อน (Heat pipes) มายังน้ำ โดยใช้สมการที่ (4.3) แต่สำหรับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ไม่สามารถใช้สมการที่ (4.3) ได้เพราะอุณหภูมิน้ำยังมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นจึงมีงานวิจัยของ Ashwin Date, Abhijit Date, Chris Dixon และ Aliakbar Akbarzadeh [1] ทำการหาอุณหภูมิของน้ำที่คงที่ได้จากสมการ (4.4) ซึ่งทำโดยปรับค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) ให้ได้อุณหภูมิของน้ำ โดยนำอุณหภูมิน้ำที่ได้ fit graph กับอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง แต่ในการวิเคราะห์ทำการเลือกเพียง 5 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.4(ก)-4.4(จ) และสรุปค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนและอุณหภูมิน้ำคงที่ทั้งหมด 13 การทดลองดังตารางที่ 4.4

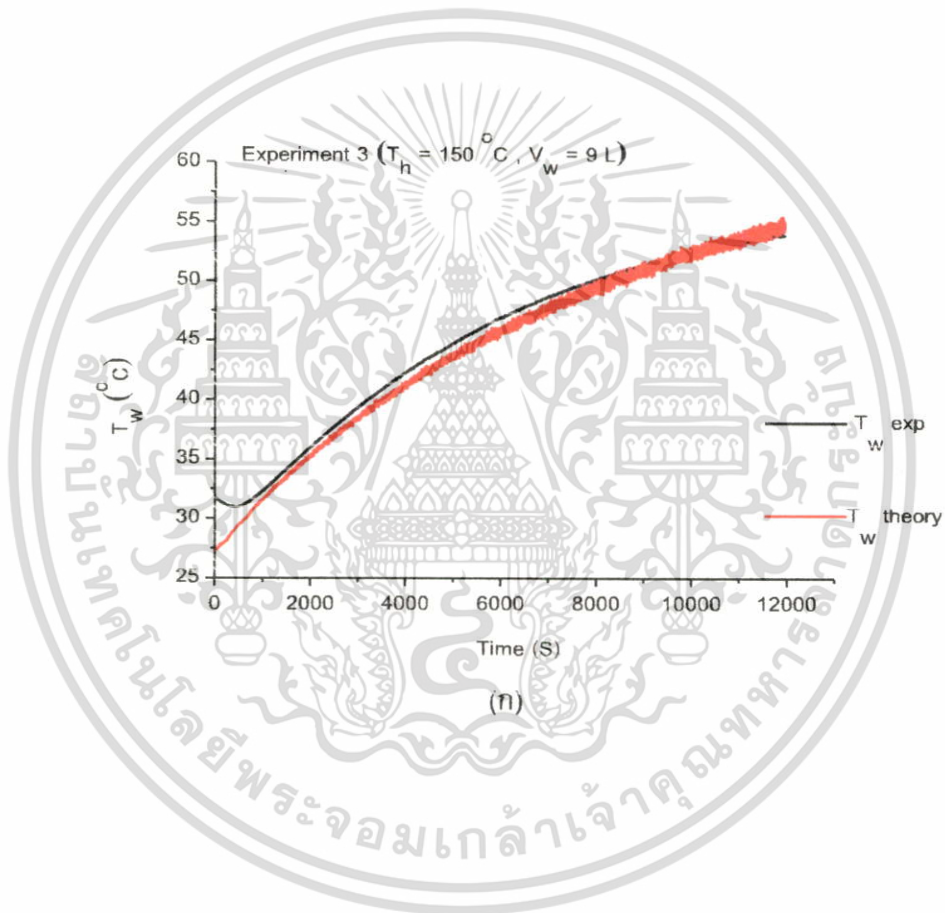
$$Q_w = mC_p(dT_w/dt) \quad (4.3)$$

$$T_w = \left[\left[T_i - \frac{Q_h + UA_s T_a}{UA_s} \right] \exp\left[-\frac{UA_s}{m \times C_p} t\right] + \left[\frac{Q_h + UA_s T_a}{UA_s} \right] \right] \quad (4.4)$$

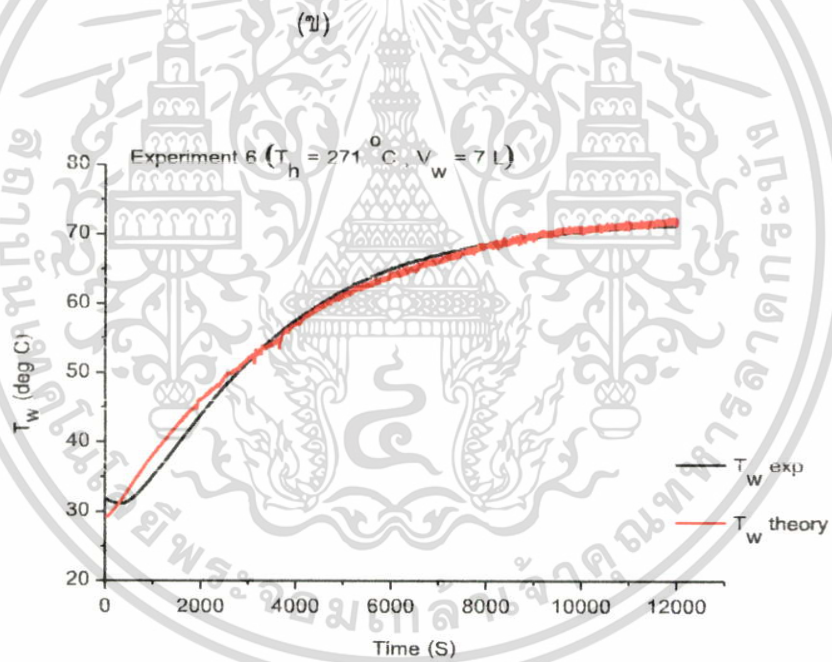
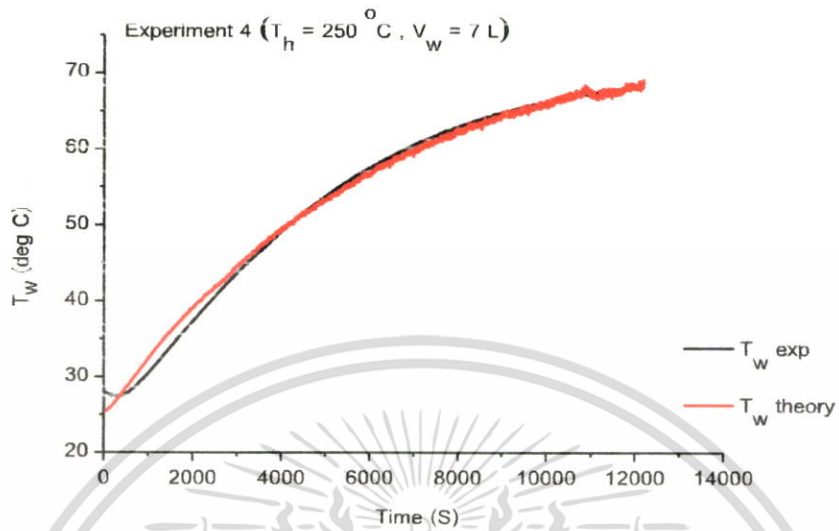
$$Q_w = UA_s(T_w - T_a) \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)
 UA_s คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)
 T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)
 m คือ มวลของน้ำ (ลิตร)
 C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ $4180 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
 T_w คือ อุณหภูมิน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)
 dT_w/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำต่อเวลา ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)

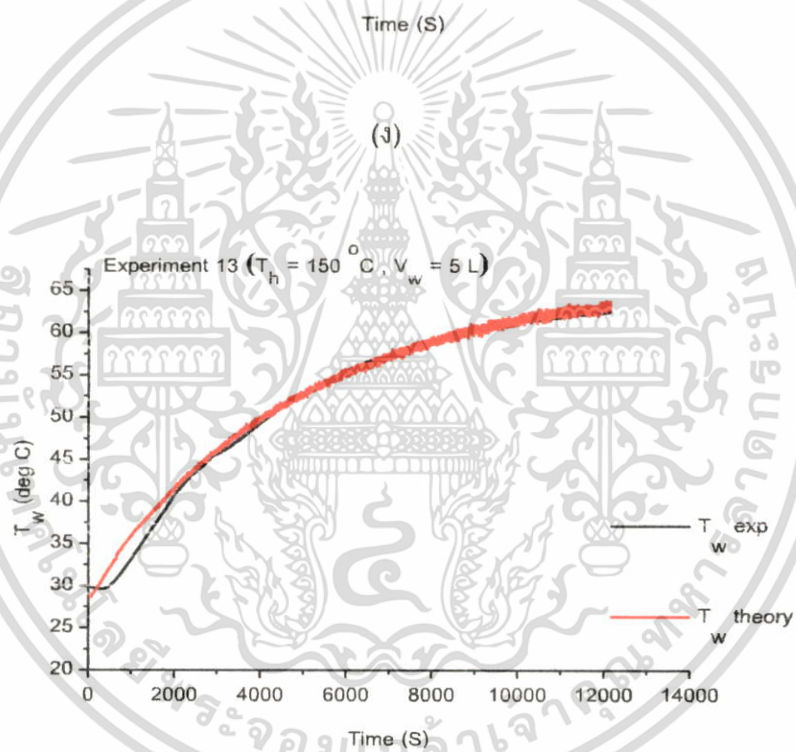
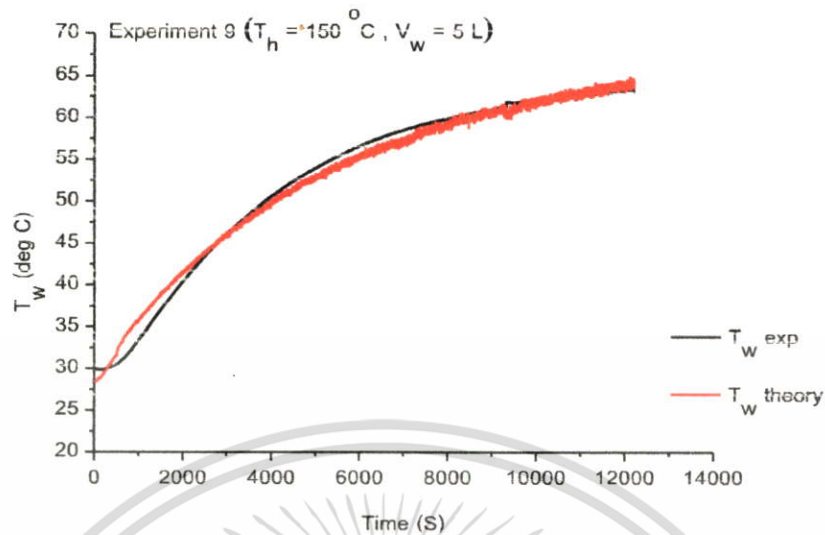


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 4.4(ก)-4.4(จ)เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 ตามลำดับ

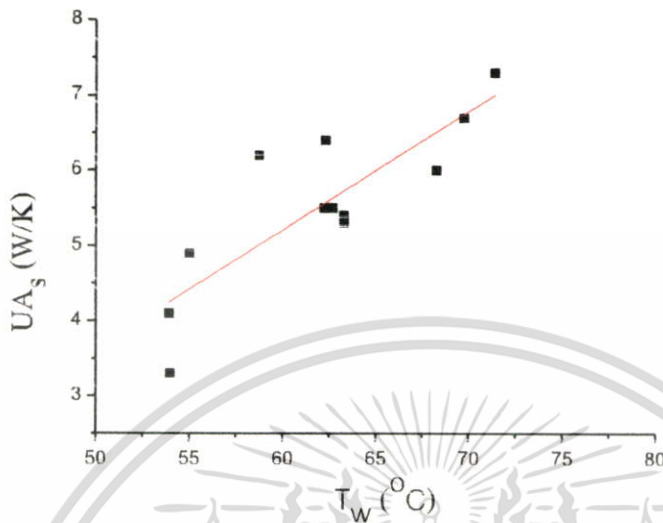
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง

ครั้งที่	UA_s	T_w (°C)
1	4.9	55.02
2	6.7	69.74
3	4.7	53.92
4	6	68.27
5	4.0	54.00
6	7.3	71.39
7	6.4	62.31
8	6.2	58.75
9	5.4	63.31
10	5.5	62.69
11	5.3	63.31
12	5.5	62.23
13	5.5	62.57

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลองสามารถเขียนในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ได้ดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนมีค่ามากขึ้น เพราะอุณหภูมิน้ำกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแตกต่างกันมาก จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนมีค่าสูงขึ้น

โดยจากรูปที่ 4.3 ในงานวิจัยของเราได้ทำการสมมติอัตรา การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำจากท่อความร้อนไปยังน้ำ (ช่วงที่ 1) เท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม (ช่วงที่ 2) เพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้ามาในระบบเท่ากับอัตราการถ่ายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงได้ทำการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเมื่ออุณหภูมิน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4.5) [1] โดยที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำต่อเวลา (dT_w / dt) น้อยกว่าหรือเท่ากับ $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนและอุณหภูมิน้ำที่คงที่จากสมการ (4.4) และสรุปค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเมื่ออุณหภูมิน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเมื่ออุณหภูมิของน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ทั้งหมด 13 การทดลอง

การทดลองครั้งที่	Q_w ที่สมดุล (W)
1	140.00
2	280.00
3	127.00
4	247.62
5	104.00
6	316.75
7	226.00
8	196.85
9	196.10
10	196.30
11	192.44
12	186.18
13	195.64

4.1.4 อุณหภูมิน้ำคงที่ (T_w)

รูปที่ 4.4(ก)-4.4(จ) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี เพื่อหาอุณหภูมิของน้ำที่คงที่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 12,000 วินาที (200 นาที) โดยที่อุณหภูมิของน้ำคงที่ 53.92 °C , 68.27 °C , 71.39 °C , 63.31 °C และ 62.57 °C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ashwin Date , Abhijit Date, Chris Dixon และ Aliakbar Akbarzadeh พบว่าอุณหภูมิของน้ำที่ได้ถึง 80 °C สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำร้อน [1] และสรุปอุณหภูมิน้ำคงที่ (T_w) ได้ดังตารางที่ 4.4 ที่กล่าวมาในข้างต้น

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

จากผลการทดลองในเบื้องต้น ในหัวข้อ 4.1 ซึ่งมีทั้งหมด 13 การทดลอง โดยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางด้วยวิธีการทางสถิติ ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งได้ทำการศึกษาตัวแปรทั้งหมด 2 แปร คือ ตัวแปรต้น (อุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำ) และตัวแปรตาม (กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก และอุณหภูมิน้ำ) ดังนั้นจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.3 จึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยความแปรปรวน (Anova) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อนดังตารางที่ 4.7(ก)-4.7(ข)

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองในเบื้องต้นทั้งหมด 13 การทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำตามเงื่อนไขต่างๆ

การทดลอง	ตัวแปรต้น		ตัวแปรตาม	
	อุณหภูมิทางด้านร้อน (°C)	ปริมาตรน้ำ (Liter)	กำลังไฟฟ้า (Watt)	อุณหภูมิน้ำ (°C)
1	150	5	1.02	55.92
2	250	5	3.83	69.74
3	150	9	1.31	53.92
4	250	9	3.94	68.27
5	130	7	0.73	49.50
6	271	7	4.34	71.39
7	200	4.2	2.48	62.31
8	200	9.8	2.76	58.75
9	200	7	2.67	63.31
10	200	7	2.70	62.69
11	200	7	2.74	63.31
12	200	7	2.60	61.85
13	200	7	2.69	62.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำเมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และ ปริมาตรของน้ำตามเงื่อนไขต่างๆ โดยมีผลการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ซึ่งจากผลการทั้งหมด 13 การทดลอง จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.7(ก) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของกำลังไฟฟ้า

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-value	
Model Power	14.05	5	2.81	652.94	< 0.0001	significant
Lack of Fit	0.02	3	6.51E-03	2.45	0.2029	not significant
Standard deviation					0.066	
Mean					2.6	
R-Squared					0.9979	
Adj R-Squared					0.9963	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7(ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของอุณหภูมิหน้า

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-value	
Model						
Temperature water	446.04	2	223.02	1555.99	< 0.0001	significant
Lack of Fit	12.82	6	2.14	5.80	0.0553	not significant
Standard deviation					1.20	
Mean					61.81	
R-Squared					0.9689	
Adj R-Squared					0.9627	

ตารางที่ 4.7(ก) และ 4.7(ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูล 3 อย่าง คือ การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำ การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และการวิเคราะห์ lack of fit ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำ มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิหน้าอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากในแต่ละปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%) โดยที่ R^2 คือ สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ สามารถอธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำที่ได้เป็นผลมาจากอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำร้อยละ 99.79 และ 96.89 ตามลำดับ ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 0.21 และ 2.11 เป็นผลมาจากปัจจัยอื่นที่ไม่ทราบ และการวิเคราะห์ Lack of fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.2029 และ 0.0553 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายความว่า สมการที่ได้มีความแม่นยำในการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิหน้า [2] ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิหน้า ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) โดยที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิหน้าที่ได้อยู่ในสภาวะสมดุล (อุณหภูมิทางด้านร้อนไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา)

$$\text{Power} = -5.46918 + 0.043213 \cdot T_h + 0.29069 \cdot V_w - 4.50E-04 \cdot T_h \cdot V_w - 3.43E-05 \cdot T_h^2 - 0.010781 \cdot V_w \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

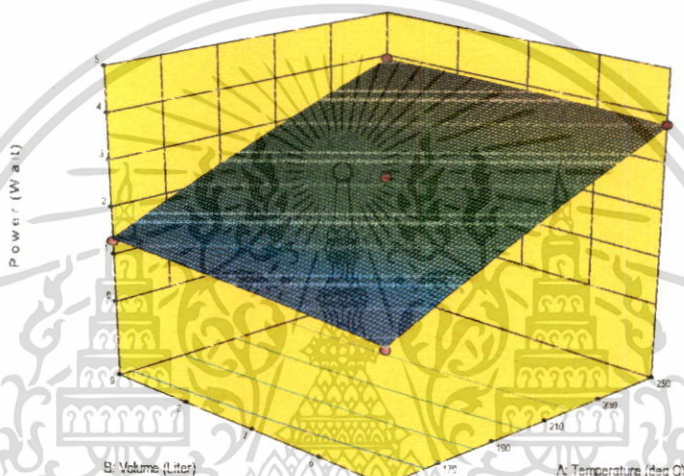
$$T_w = 35.9672 + 0.14782 \cdot T_h - 0.53154 \cdot V_w$$

(4.7)

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์) , T_w คือ อุณหภูมิน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)

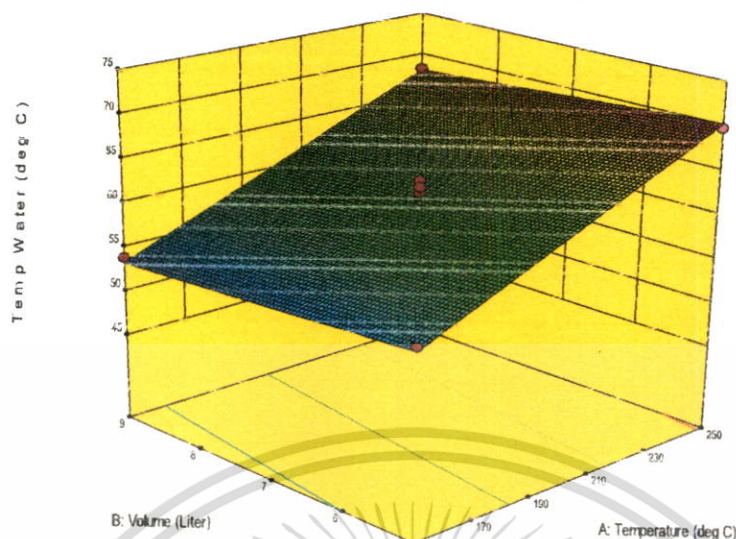
T_h คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน ($^{\circ}\text{C}$) และ V_w คือ ปริมาตรของน้ำ (ลิตร)

ตารางที่ 4.7(ก)และ 4.7(ข)ที่กล่าวมายังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลในรูปของกราฟแสดงผลตอบสนองแบบ
โครงร่างพื้นผิวแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข)



รูปที่ 4.6(ก) ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า(P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6(ข) ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิน้ำ (Tw)

รูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข) ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำ เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มระหว่างปัจจัยกับตัวแปรผลตอบสนองว่าปัจจัยใดส่งผลต่อการออกแบบระบบ เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในส่วนของปริมาตรของน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำมากที่สุด คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน

4.3 ประสิทธิภาพของระบบ

การออกแบบระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อนสามารถหาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (η_w) โดยแสดงรายละเอียดดังหัวข้อ 4.3.1-4.3.2

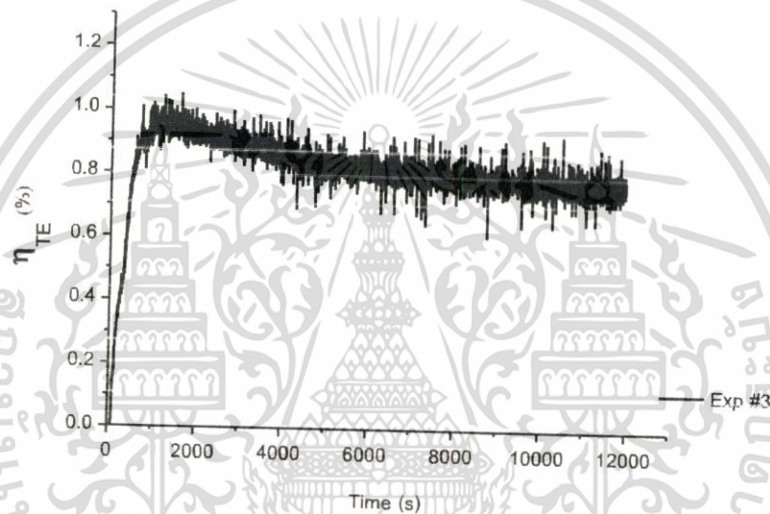
4.3.1 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE})

การหาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) สำหรับในการผลิตไฟฟ้า เกิดจากความร้อนที่เข้ามาในระบบแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าบางส่วนและความร้อนส่วนที่เหลือระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงหาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกได้จากสมการที่ 4.8 เมื่อทราบค่าในหัวข้อที่ 4.1.1-4.1.2

แต่สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกเลือกเพียง 5 การทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.7-4.11 และสรุปค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง

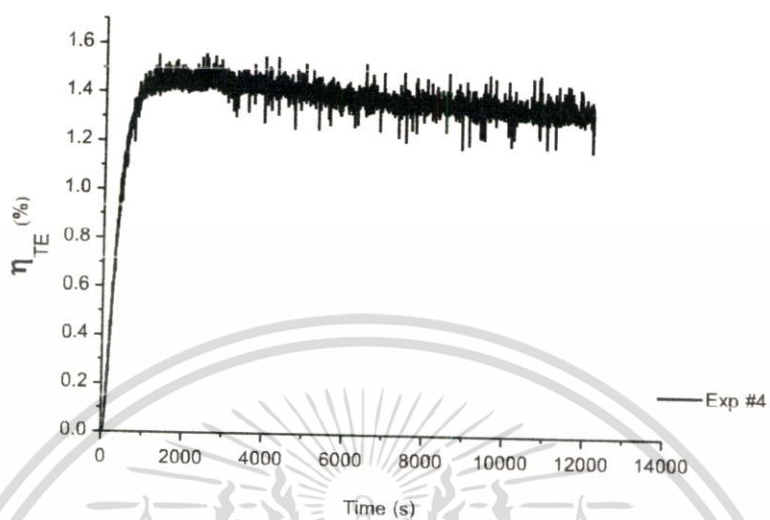
$$\eta_{TE} = (P/Q_h) \quad (4.8)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (W)
 Q_h คือ อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (W)

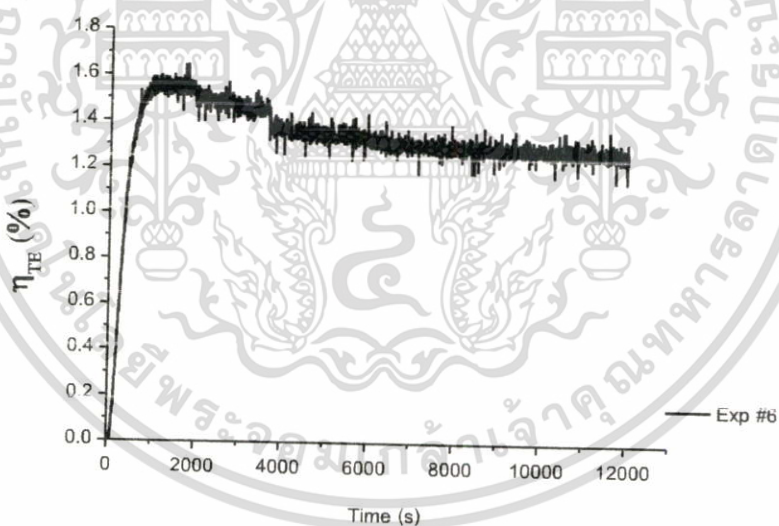


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

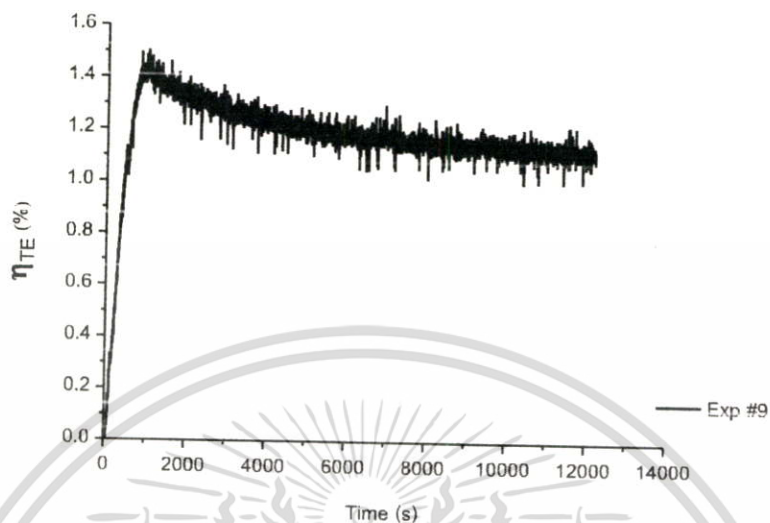


รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา

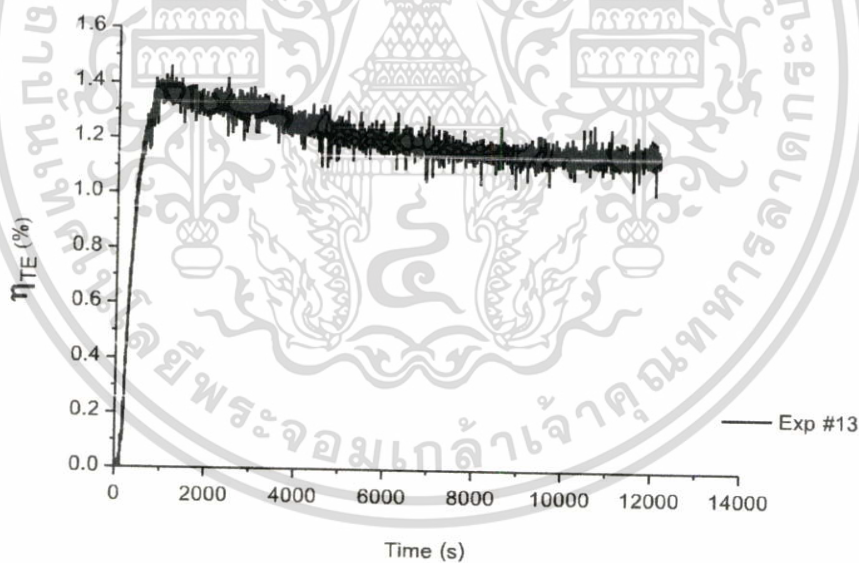


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา

รูปที่ 4.7-4.11 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและสูงสุดอยู่ที่ 0.92% , 1.50% , 1.60% , 1.40% และ 1.40% ที่เวลาประมาณ 1500 วินาที (25 นาที) หลังจากนั้นประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจะเริ่มคงที่เวลาประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4000 วินาที (67 นาที)และเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Ashwin Date , Abhijit Date, Chris Dixon และ Aliakbar Akbarzadehพบว่า การแปลงประสิทธิภาพจากพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 1-2% [1]ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเราโดยมีค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 1-2% จากนั้นจึงทำการสรุปค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลองได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง

การทดลอง	η_{TE} (%)
1	1.05
2	1.50
3	0.92
4	1.50
5	1.10
6	1.60
7	1.30
8	1.35
9	1.40
10	1.35
11	1.40
12	1.35
13	1.40

4.3.2 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ

การหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ เกิดจากอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในหัวข้อ 4.1.3 เมื่ออุณหภูมิน้ำคงที่หรืออุณหภูมิน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหาได้จากสมการที่ 4.9 เมื่อทราบค่าในหัวข้อที่ 4.1.2 และ 4.1.3 โดยแสดงค่าประสิทธิภาพที่ทำการคำนวณได้ทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 4.9

$$\eta_w = (Q_w / Q_h) \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

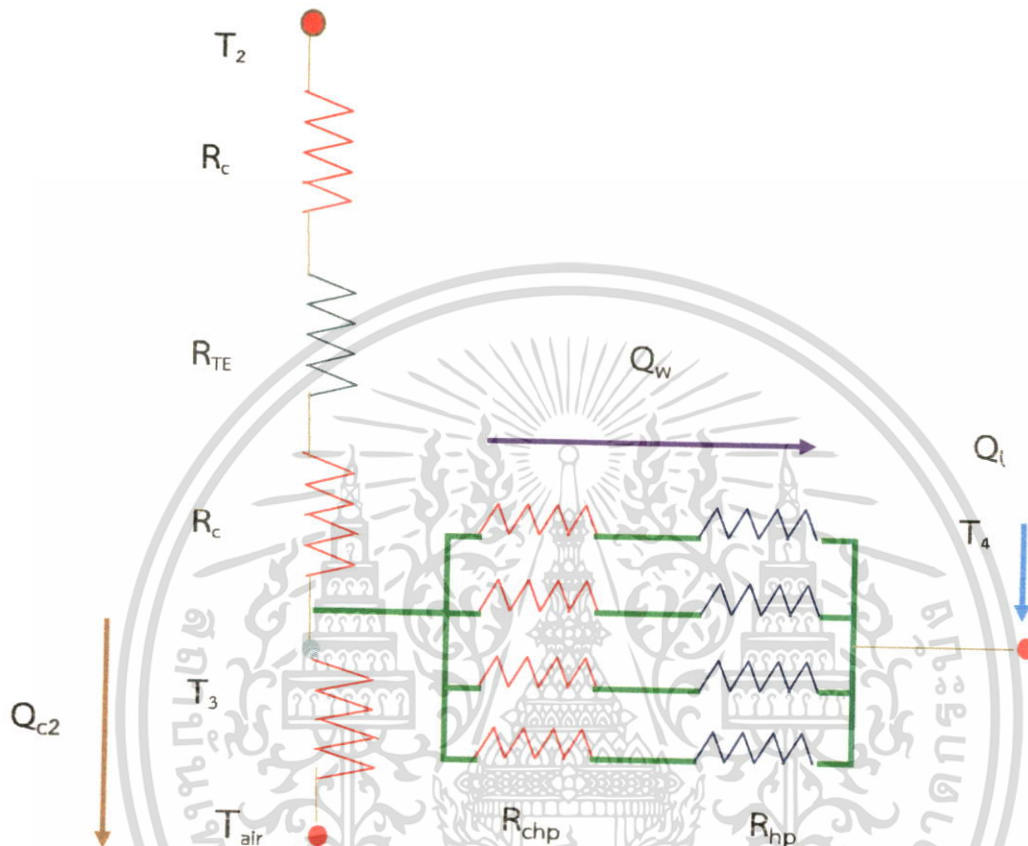
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทั้งหมด 13 การทดลอง

การทดลองครั้งที่	Q_w ที่สมดุล(W)	η_w ที่สมดุล (%)
1	140.00	82.35
2	280.00	87.50
3	127.00	79.38
4	247.62	85.40
5	104.00	80.00
6	316.75	91.80
7	226.00	90.40
8	196.85	78.74
9	196.10	81.70
10	196.30	81.80
11	192.44	83.67
12	186.18	80.95
13	195.64	81.52

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทั้งหมด 13 การทดลองพบว่า เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำและอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำได้สูงขึ้นโดยอยู่ในช่วง 70-90% ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Ashwin Date , Abhijit Date, Chris Dixon และ Aliakbar Akbarzadeh ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำอยู่ในช่วง 50-60% [1]

4.4 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อ

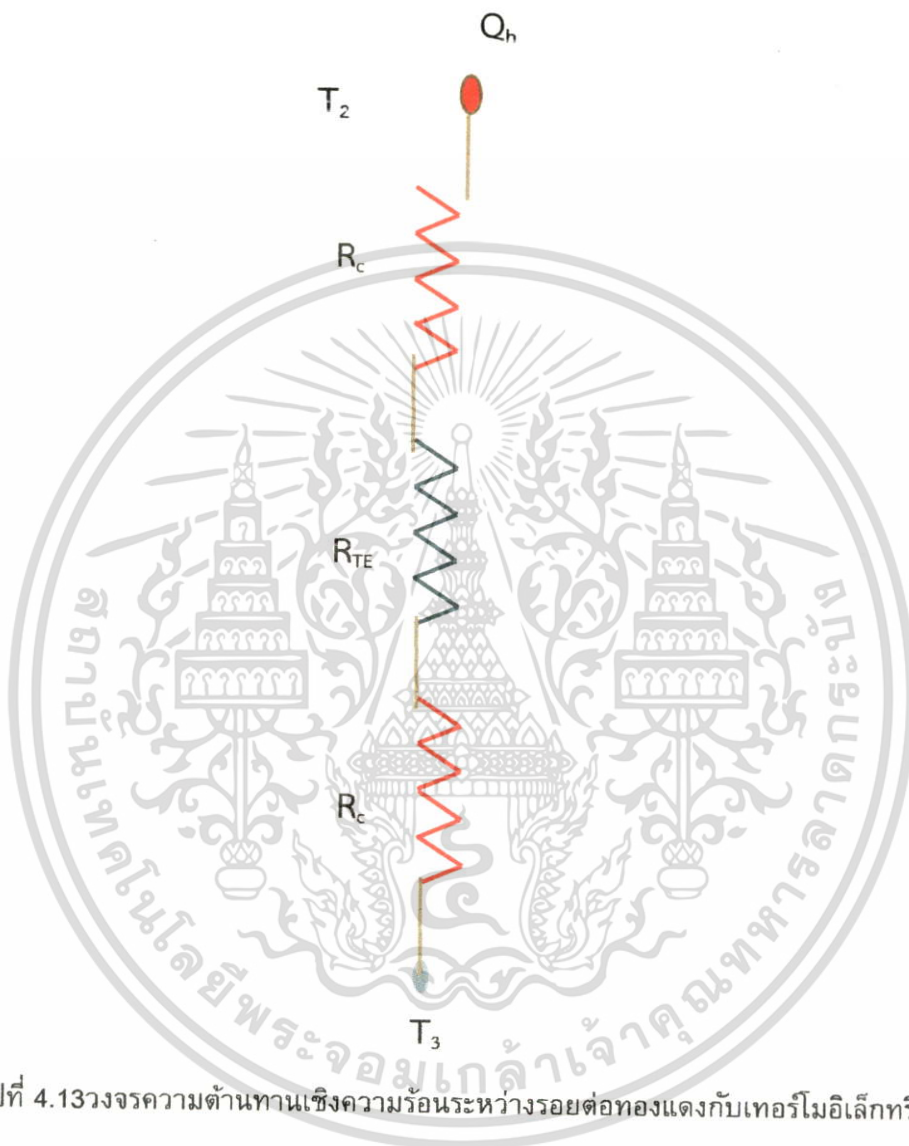
ในบทที่กล่าวมา หัวข้อ 3.3.2 รูปที่ 3.2 ได้ทำการออกแบบระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน ซึ่งจากการออกแบบจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบทั้งหมด 13 การทดลอง ดังนั้นจึงเขียนวงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อ ได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน

รูปที่ 4.12 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อนซึ่งได้ทำการแบ่งวิธีการหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

4.4.1 การหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 4.13 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก

รูปที่ 4.13 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.10) เมื่อทราบค่าอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบในหัวข้อ 4.1.2, อุณหภูมิที่ทำการวัด T_2 และ T_3 และความต้านทานของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ $1.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Ashwin Date , Abhijit Date, Chris Dixon และ Aliakbar Akbarzadeh[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_2 - T_3 = (R_c + R_{TE} + R_c) Q_h$$

$$(T_2 - T_3)/Q_h = 2R_c + R_{TE}$$

$$(T_2 - T_3)/Q_h - R_{TE} = 2R_c$$

$$R_c = ((T_2 - T_3)/Q_h - R_{TE})/2 \quad (4.10)$$

เมื่อ T_2 คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

T_3 คือ อุณหภูมิทางด้านเย็น ($^{\circ}\text{C}$)

Q_h คือ อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (W)

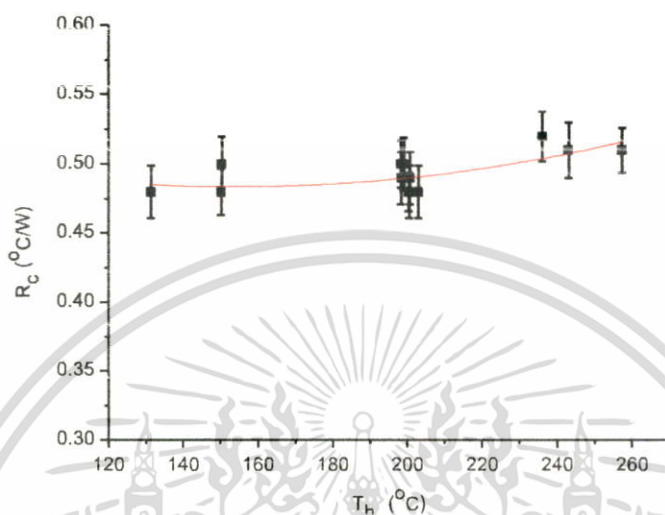
R_{TE} คือ ความต้านทานของเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ [1]

สมการที่ (4.10) จะคำนวณค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเฉลี่ยทั้ง 13 การทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.10 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง

การทดลอง	ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ย (R_c)
1	0.50 ± 0.02
2	0.51 ± 0.02
3	0.48 ± 0.02
4	0.52 ± 0.02
5	0.48 ± 0.02
6	0.51 ± 0.02
7	0.50 ± 0.02
8	0.50 ± 0.02
9	0.48 ± 0.01
10	0.48 ± 0.02
11	0.48 ± 0.02
12	0.49 ± 0.02
13	0.49 ± 0.02

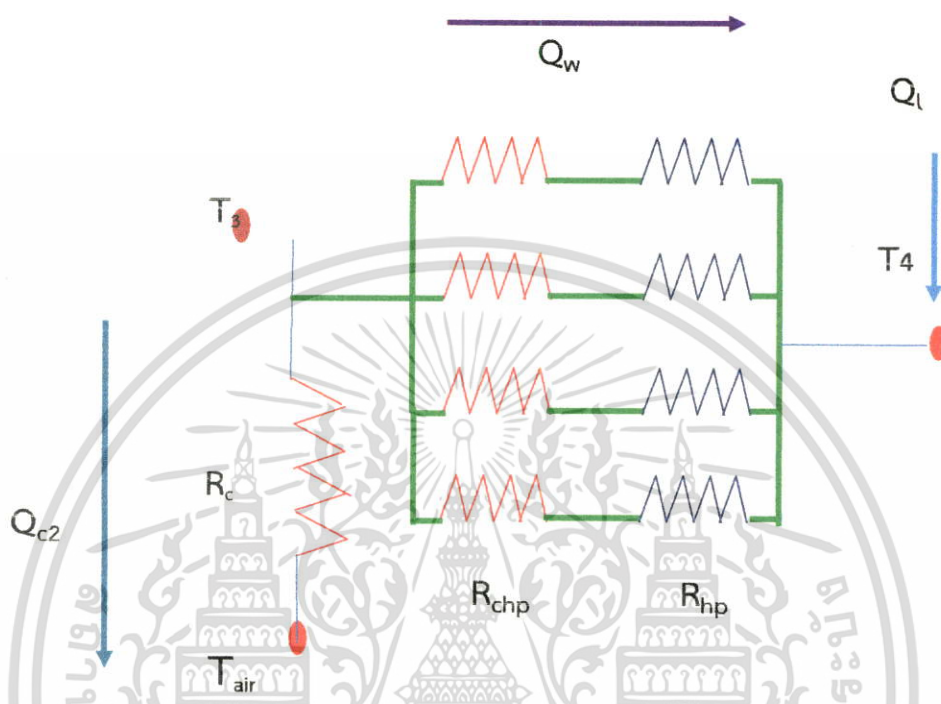
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเจลีเยียม (R_c) กับ อุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) ทั้งหมด 13 การทดลอง

รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเจลีเยียม (R_c) กับอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) ทั้งหมด 13 การทดลอง จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิทางด้านร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเจลีเยียม (R_c) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่ผ่านเข้ามาในระหว่างรอยต่อของทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกมีการเชื่อมต่อโดยใช้ thermal grease เพื่อช่วยลดความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของวัสดุ ดังนั้นจากการคำนวณ ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.4-0.5 °C/W เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Huann-Ming Chou, Jin-Chi Wang, and Yuh-Ping Chang พบว่าค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของ Cu กับ AlN มีค่าอยู่ในช่วง 0.7-0.9 °C/W [3] ซึ่งจะเป็นการบ่งบอกว่างานวิจัยของเรา มีการออกแบบระบบที่ดี

4.4.2 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)



รูปที่ 4.15 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)

รูปที่ 4.15 การหาวงจรถ้าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe) มีวิธีการโดยเมื่อความร้อนที่ไหลผ่านเข้ามาในระบบเท่ากับความร้อนที่ไหลออกจากระบบซึ่งรวมกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงดังสมการที่ 4.11 จากนั้นเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถหาได้โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ความร้อนที่ผ่านอะลูมิเนียมไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_{c2}) ความร้อนที่ไหลผ่านท่อความร้อนไปยังน้ำ (Q_w) และความร้อนที่ไหลผ่านน้ำไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_l) โดยทั้ง 3 ส่วนที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นความร้อนที่ไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมด (Q_c) แสดงดังสมการที่ (4.12)

$$Q_h = Q_c + P \quad (4.11)$$

$$Q_c = Q_w + Q_l + Q_{c2} \quad (4.12)$$

โดยที่ Q_h	คือ อัตราการไหลของความร้อนที่ออกจากระบบ (W)
Q_{c2}	คือ อัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านอะลูมิเนียมไปยังสิ่งแวดล้อม (W)
Q_c	คือ อัตราการไหลของความร้อนที่ออกจากระบบ (W)
Q_l	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำไปยังสิ่งแวดล้อม (W)
Q_w	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อความร้อนไปยังน้ำ (W)
P	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (W)

สมการที่ (4.11) สามารถหาอัตราการไหลของความร้อนที่ไหลออกจากระบบ (Q_c) เมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกและอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ ในหัวข้อ 4.1.1-4.1.2 แต่ในสมการที่ (4.12) ยังไม่ทราบค่าอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านอะลูมิเนียมไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_{c2}) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4.13) เมื่อทราบอุณหภูมิที่ทำการวัด T_3 , อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และความต้านทานระหว่างรอยต่อของอะลูมิเนียม โดยที่ความต้านทานระหว่างรอยต่อของอะลูมิเนียมหาได้จากสมการที่ (4.14) จากนั้นจึงนำค่าที่คำนวณจากสมการ (4.14) แทนในสมการ (4.13) จะได้ค่าอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านอะลูมิเนียมไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_{c2}) ดังนั้นจึงนำค่าอัตราการไหลของความร้อนที่ไหลออกจากระบบ (Q_c) และอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านอะลูมิเนียมไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_{c2}) แทนในสมการที่ (4.12) เพื่อให้ได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_l) รวมกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อความร้อนไปยังน้ำ (Q_w) ใช้ในการหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)

จากที่กล่าวมาในข้างต้นก็สามารถสรุปการหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe) ได้ดังสมการที่ (4.15) โดยที่ค่าความต้านทานของท่อความร้อน (Heat pipe) (R_{hp}) มีค่าน้อยมาก จึงให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงคำนวณค่า ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe) ทั้งหมด 13 การทดลอง เพื่อนำมาหาค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe) เฉลี่ยทั้งหมด 13 การทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.11

$$Q_{c2} = (T_3 - T_a) / R_{Al} \quad (4.13)$$

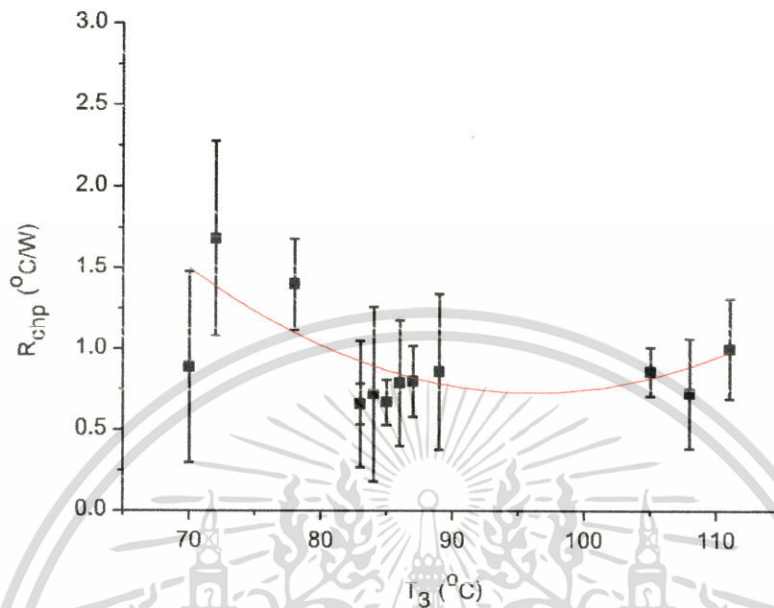
$$R_{Al} = d_{Al} / K_{Al} * A_{Al} \quad (4.14)$$

$$R_{chp} = (4(T_3 - T_4) / (Q_w + Q_l)) - R_{hp} \quad (4.15)$$

ตารางที่ 4.11 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน(Heat pipes)

การทดลอง	อุณหภูมิทางด้าน เย็น (T_3)	ความต้านเชิงความร้อน รอยต่อเฉลี่ย (heat pipe)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	78.00	1.40	0.28
2	105.000	0.86	0.15
3	70.00	0.89	0.59
4	111.00	1.00	0.31
5	72.00	1.68	0.60
6	108.00	0.73	0.34
7	85.00	0.67	0.14
8	84.00	0.72	0.54
9	83.00	0.66	0.126
10	83.00	0.66	0.39
11	89.00	0.86	0.48
12	87.00	0.80	0.22
13	86.00	0.79	0.39

ตารางที่ 4.11 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat -pipes) เฉลี่ยและอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) เฉลี่ย (R_{cp}) กับ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.16



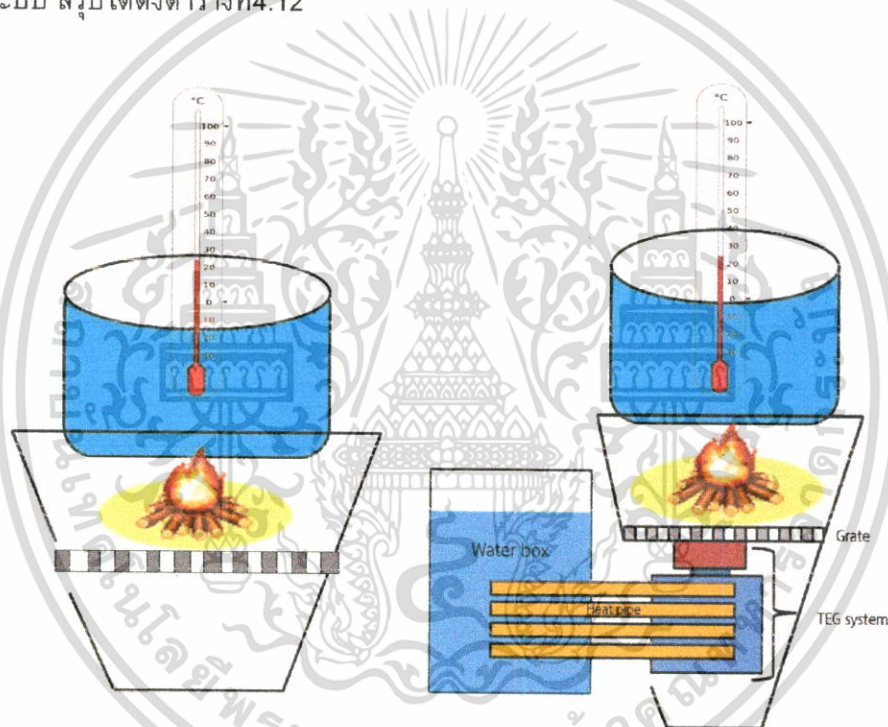
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) เฉลี่ย (R_{chp}) กับ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง

รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) เฉลี่ย (R_{chp}) กับอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง จะเห็นได้ว่า ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) เฉลี่ย (R_{chp}) ลดลงจาก $1.4 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ถึง $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ เมื่ออุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก เพิ่มขึ้นจาก $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เพราะว่าการขยายตัวทางความร้อนของ ท่อความร้อนและอะลูมิเนียมมีช่องว่างทางความร้อนที่ลดลงแต่ในทางกลับกันจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งได้อธิบายโดย Zhu และ Ertekin [4-5]

4.5 ผลการทดลองภาคสนาม

ในหัวข้อที่ 4.1-4.4 เป็นผลที่ได้จากการออกแบบและทดลองระบบโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายสำหรับในงานวิจัยของเรา คือ การนำระบบที่ออกแบบติดตั้งกับเตาหุงต้ม เพื่อต้องการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้ม แต่สำหรับการนำ

ระบบไปติดตั้งกับเตาหุงต้มนั้นยังมีจุดด้อย คือ ทำให้รั้วขวางอากาศไม่ให้เข้าไปในเตาหุงต้มจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มลดลง และจึงเป็นเหตุผลที่ทำการทดลองภาคสนาม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้ม ก่อนและหลังการติดตั้งระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งได้ทำการอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3.3 ดังนั้นผลการทดลองที่ได้สำหรับในขั้นตอนนี้ คือ ทำการวัดมวลของน้ำก่อนและหลังใช้ในการทดลอง เพื่อนำมาใช้ในการหาประสิทธิภาพของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบ ดังสมการที่ (3.3) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเตาหุงต้ม โดยใช้สมการที่ (3.4) เพื่อบ่งบอกถึงการนำระบบที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้กับเตาหุงต้มได้อย่างเหมาะสม ซึ่งค่ามวลของน้ำและประสิทธิภาพของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบ สรุปได้ดังตารางที่ 4.12



(ก) (ข)

รูปที่ 4.17 การทดลองภาคสนาม (ก) ก่อนติดตั้งระบบ (ข) หลังการติดตั้งระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาहुงต้มก่อนและหลังการติดตั้ง

ครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
มวลของน้ำก่อนติดตั้ง	2.36	2.36	2.40	2.37
มวลของน้ำหลังติดตั้ง	2.30	2.26	2.30	2.29
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนก่อนติดตั้ง	6463.00	6462.70	6554.00	6493.23
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหลังติดตั้ง	6323.10	6224.05	6325.25	6290.80
เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาहुงต้มก่อนและหลังติดตั้ง (%)	97.84	96.30	96.50	96.88
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาहुงต้มลดลง (%)	2.16	3.70	3.50	3.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาहुงต้มก่อนและหลังการติดตั้ง จะเห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาहुงต้มก่อนและหลังการติดตั้งลดลง ประมาณ 2-3 % ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายสำหรับงานวิจัยของเรา โดยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาहुงต้มลดลงไม่เกิน 5 %

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบแปลงพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการออกแบบอยู่บนเงื่อนไข 3 ข้อ คือ (1) ระบบที่ออกแบบต้องนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มกลับมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยพลังงานความร้อนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกและพลังงานความร้อนที่เหลือจะใช้เพื่อผลิตน้ำร้อนใช้ในครัวเรือน (2) การระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกต้องเป็นการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ และ (3) ระบบที่ออกแบบต้องสามารถนำไปติดตั้งร่วมกับเตาหุงต้มโดยไม่ต้องทำลายโครงสร้างของเตา วิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ได้จากระบบโดยใช้วิธีตอบสนองโครงสร้างพื้นผิว และคำนวณประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบ ในขั้นตอนนี้จะใช้ฮีทเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและติดตั้งทางด้านบนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ด้านล่างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลถูกติดตั้งด้วยฮีทไปป์จำนวน 4 ชั้น โดยฮีทไปป์จะถูกสอดเข้าไปในถังน้ำเพื่อช่วยในการระบายความร้อนและการผลิตน้ำร้อน เทอร์โมคัปเปิลชนิดเคจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิ อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลถูกวัดโดยใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Labview จากผลการทดลองพบว่าสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 4.5 วัตต์ต่อเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 1 ตัว อุณหภูมิของน้ำร้อนสูงสุดประมาณ 70 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพรวมของระบบมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ การทดลองตอนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาหุงต้มที่มีการติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบที่ออกแบบ จากการทดสอบพบว่าเมื่อเตาหุงต้มมีการติดตั้งระบบที่ออกแบบจะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเตาหุงต้มที่ไม่ติดตั้งระบบที่ออกแบบ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบสามารถนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสำหรับใช้ในครัวเรือนได้อย่างเพียงพอ โดยระบบที่ออกแบบสามารถนำไปติดตั้งร่วมกับเตาหุงต้มได้โดยตรงและไม่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดและถ่ายทอดให้กับประชาชนในพื้นที่ชนบทของประเทศไทยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 ผลผลิต

6.1 ผลงานบทความตีพิมพ์ จำนวน 1 เรื่อง

- R. Sakdanuphab and A. Sakulalavek, Design, empirical modelling and analysis of a waste-heat recovery system coupled to a traditional cooking stove, Energy Conversion and Management 139 (2017) 182–193.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานสรุปการเงินประจำปีงบประมาณ 2558
รหัสโครงการสกอ. 2559A11862013
โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ชื่อมหาวิทยาลัย ..สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ชื่อโครงการ (ไทย) การสร้างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สำหรับการเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหมต้
 ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
 (อังกฤษ) Construction of thermoelectric generator system for converting waste heat of cooking stove into electrical energy

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สุกุลกระเวก
 รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2560
 ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 6 เดือนตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2560

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณรวมทั้งโครงการ (บาท)	ค่าใช้จ่าย งวดปัจจุบัน	คงเหลือ (หรือเกิน)
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	90,000	90,000	0
3. ค่าวัสดุ	210,000	210,610	-610
4. ค่าใช้สอยอื่นๆ (ไปรตระบุเป็นข้อย่อย)	0	0	0
รวม	300,000	300,610	-610

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

จำนวนเงินที่ได้รับ 300,000 บาท
 งวดที่ 1 180,000 บาท
 งวดที่ 2 120,000 บาท
รวม 300,000 บาท

.....
 ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

...../...../.....

.....
 ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

...../...../.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาวะโลกร้อน เข้าถึงจาก : <http://www.thaiail.com/globalwarming>(วันที่ค้นข้อมูล : 19 กันยายน 2557)
- [2] ปราบปรามการฉ้อโกงภาวะเรือนกระจก . เข้าถึงจาก : <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=20> (วันที่ค้นข้อมูล : 20 กันยายน 2557)
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน . เข้าถึงจาก : <http://www.eppo.go.th> (วันที่ค้นข้อมูล : 10 ตุลาคม 2557)
- [4] Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator , C. Lertsatitthanakorn * ,Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khantawichai, Mahasarakham 44150, Thailand
- [5] การถ่ายเทความร้อน. เข้าถึงจาก : <http://www.beodom.com/en/education/entries/principles-of-thermal-insulation-heat-transfer-via-conduction-convection-and-radiation> (วันที่ค้นข้อมูล : 25 ตุลาคม 2557)
- [6] การนำความร้อน. เข้าถึงจาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/การนำความร้อน> (วันที่ค้นข้อมูล : 25 ตุลาคม 2557)
- [7] คุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal Conductivity). เข้าถึงจาก : http://www.thaiceramicsociety.com/ch_heat.php (วันที่ค้นข้อมูล : 25 ตุลาคม 2557)
- [8] การพาความร้อน. เข้าถึงจาก : <http://physicsworld.nanacity.com/physicsworld/lesson/tran2.htm> (วันที่ค้นข้อมูล : 26 ตุลาคม 2557)
- [9] การแผ่รังสีความร้อน เข้าถึงจาก : <http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Thermal%20Radiation/1-0.htm> (วันที่ค้นข้อมูล : 26 ตุลาคม 2557)
- [10] Introduction to Thermoelectricity Gang Chen ,Mechanical Engineering Department Massachusetts Institute of Technology URL: <http://web.mit.edu/nanoengineering>และเข้าถึงจาก : http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect(วันที่ค้นข้อมูล : 1 พฤศจิกายน 2557)
- [11] การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของโลหะทองแดงด้วยเครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้า ร่วมกับเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค (The Investigation of Copper Purity by Electrical Conductivity Measurement in Conjunction with Seebeck Coefficient) :โสพลบุตรงามอารีย์วิเชียรฉายสายชล พิม พิมงคลและอุดมทิพรราช ,Budngam ree ichainchai Pimmongkol and U , วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังปีที่ 22 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] การเกิดปรากฏการณ์เพลทีย่. เข้าถึงจาก : http://www.thermoelectrics.caltech.edu/history_page.htm accessed August 2010 (วันที่ค้นข้อมูล : 1 พฤศจิกายน 2557)
- [13] Introduction to Thermoelectrics & Design Manual. Retrieved on January 1, 2013 ,<http://www.tellurex.com/technology/design-manual.php> (วันที่ค้นข้อมูล : 2 พฤศจิกายน 2557)
- [14] Peltier Figure 1 [image]. Retrieved on September 9, 2012, เข้าถึงจาก :<http://www.tellurex.com/technology/peltier-faq.php> (วันที่ค้นข้อมูล : 2 พฤศจิกายน 2557)
- [15] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric generator) : This is the report of fourth year project assignment submitted in partial fulfillment of the requirement for the Degree of Bachelor of Engineering. Department of Electrical Engineering ,Faculty of Engineering, Khon Kaen University 2012 :Thermoelectric Module [image]. Retrieved on September 9, 2012, from: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/metal-and-ceramic-Science/thermoelectrics.html>
- [16] Thermoelectric generator. เข้าถึงจาก : http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator (วันที่ค้นข้อมูล : 16 พฤศจิกายน 2557)
- [17] ความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้พลังงานแหล่งต่างๆ. เข้าถึงจาก :http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Energy_Conservation_in_Industrial_Plant/5_3.html (วันที่ค้นข้อมูล : 16 พฤศจิกายน 2557)
- [18] ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง. เข้าถึงจาก : <http://www.enconlab.com/wasteheat/index.php/menu-technology-wasteheat> (วันที่ค้นข้อมูล : 16 พฤศจิกายน 2557)
- [19] การทำงานของฮีทไปป์แบบลูป (Operating of Loop Heat Pipe), Santi Wangnipparnto and Sirisom Mitranon ,Electrical Engineering Department, Pathumwan Institute of Technology, Pathumwan, Bangkok, 10330 ,Electronic Engineering Department, Pathumwan Institute of Technology, Pathumwan, Bangkok, 10330 , E-mail: nipparnto@gmail.com
- [20] การลดความชื้นด้วยฮีทไปป์ (Heat Pipe Dehumidification) (3 พฤศจิกายน 2552) :โครงการสาริตเทคโนโลยีเชิงลึกเพื่อการอนุรักษ์พลังงานกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน : Limit Heat pipe (www. Electronics Cooling.com)
- [21] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากเตาถ่าน. Rida YN, Alan S, Nesreen G, Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling, Energy Conversion and Management 46 (2005) 1631-1643. และ การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้ม Feasibility Study of Cook-Stove Thermoelectric Power Generation Nath Junkrob* Jensak Eakburanawat Department of

Mechatronic and Robotic Engineering, Faculty of Engineering, South-East Asia University, Bangkok 10160 ,Tel. 0-2870-4500-27 Fax. 0-2870-4528 E-mail: Jensak@engineer.com

[22] Creative technology with fine manufacturing processes provides you the reliable and quality products. Tel: +86-791-88198288 Fax: +86-791-88198308 Email: info@thermonamic.com

Web Site: www.thermonamic.com ,Performance Curves of the Module TEHP1-24156-1.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Conversion and Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enconman

Design, empirical modelling and analysis of a waste-heat recovery system coupled to a traditional cooking stove

Rachsak Sakdanuphab^a, Aparporn Sakulkalavek^{b,*}^a College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand^b Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 November 2016

Received in revised form 20 February 2017

Accepted 21 February 2017

Available online 2 March 2017

Keywords:

Waste-heat recovery (WHR) system

Response surface methodology (RSM)

Thermoelectric generator

Cooking stove

Heat pipe

ABSTRACT

In this work, a waste-heat recovery (WHR) system was designed and implemented to utilise the waste heat from a cooking stove. The WHR system was designed to preserve maximum thermal energy efficiency, use passive cooling, and produce a system that did not alter the body of the cooking stove. The thermal energy from the cooking stove was converted into electrical energy by a thermoelectric generator (TEG) and used in a waste-heat hot water boiler. The cold side of the TEG was cooled by heat pipes immersed in a water box that offers a high heat transfer rate. The heated water can be used for domestic purposes. Dependent variables were the heater temperature and the volume of water. The heater temperature was varied between 130 and 271 °C, and 4.2–9.5 L of water was investigated. At equilibrium, response surface methodology based on a central composite design was used to empirically model the influence of the heater temperature and the volume of water on the electrical power generation and the hot water temperature. Experimental results of the system efficiency showed that the heater temperature was more influential than was the volume of water. The total efficiency of the WHR system was more than 80%. Thermal contact resistance was analysed to improve the WHR system performance. Finally, the thermal efficiency of a cooking stove, both with and without the WHR system, was measured. Results showed that the thermal efficiency of the cooking stove decreased by less than 5% when the WHR system was attached.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

A serious problem for people in the rural areas of developing countries is a lack of reliable access to electricity. A sustainable solution to this problem is the ability to independently generate electrical power, preferably from routine activities, such as using a cooking stove. Various types of cooking stove have been widely used, and 90% of people in rural areas of developing countries use a biomass cooking stove [1]. Several countries in Southeast Asia, such as Thailand, Lao, Cambodia, Malaysia, the Philippines, and Vietnam, use a similar mechanical form of the cooking stove [2]. For example, the Thai cooking stove comprises a galvanised iron bucket and an inner ceramic firebox. The bucket has an opening cut into its side from the bottom and an integrated grate with equally distributed holes 15–20 mm in diameter [2]. Wood or charcoal can be burned on the grate. Thermal energy from the cooking stove can be converted to electricity by the thermoelectric

module contained in a thermoelectric generator (TEG). Thermoelectric has long been too inefficient to be cost effective in energy conversion application compared with solar cells and wind turbines. The application is not currently available for people in developing country. However, theoretical predictions suggested that thermoelectric efficiency could be greatly enhanced through nano-structural engineering and low-dimensional system [3,4]. Thermoelectric generator looks very promising and can contribute to applying the application. Energy conversion of a part of waste heat from stoves using TEG system has been developed. Efforts are already underway to combine a thermoelectric generator on various types of stove in many countries. The TEG has the advantages of being a maintenance-free system, containing no moving or complex parts, and being compact in size [1,5–11]. Although photovoltaic solar and wind systems are more efficient than TEGs, they depend on favourable natural conditions. Lertsatitthanakorn [10] analysed the electrical performance of the Thai cooking stove with an integrated TEG system. The side wall of the cooking stove was removed and a TEG system was installed. The system had a power output of 2.4 W at a temperature difference of

* Corresponding author.

E-mail address: aparporn.sa@kmitl.ac.th (A. Sakulkalavek).

Nomenclature

WHR	waste-heat recovery	q_1^*	heat loss rate from the water box (W)
TEG	thermoelectric generator	q_{C2}^*	heat rate leaving the thermoelectric module and transferring to the aluminium block (W)
RSM	response surface methodology	K_{Cu}	thermal conductivity of copper (W/m K)
CCD	central composite design	K_{Al}	thermal conductivity of aluminium (W/m K)
T_{ht}	heater temperature (°C)	A_{Cu}	surface area of the copper block (m ²)
V_w	water volume (L)	A_{Al}	surface area of the aluminium block (m ²)
P_{avg}	average electrical power generation from the TEG (W)	x	distance between the T_1 and T_2 measurements (m)
P_{max}	maximum electrical power generation from the TEG (W)	m_{wi}	initial mass of water (kg)
T_w	hot water temperature (°C)	C_p	specific heat capacity of water
T_{wi}	initial hot water temperature (°C)	R_c	thermal contact resistance between the thermoelectric module and apparatus (°C/W)
T_{we}	boiling water temperature (°C)	R_{chp}	thermal contact resistance between the heat pipe and aluminium block (°C/W)
$T_{w(max)}$	maximum hot water temperature at equilibrium (°C)	R_{TE}	thermal resistance of the thermoelectric module (°C/W)
T_1 and T_2	temperatures inside the copper block (°C)	R_{hp}	thermal resistance of the heat pipe (°C/W)
T_3	cold side temperature of the thermoelectric module (°C)	R_{Al}	thermal resistance of the aluminium block (°C/W)
T_a	ambient temperature	UA_x	heat loss rate from the water box per unit of temperature difference (W/°C)
q_h^*	heat rate into the waste-heat recovery system (W)		
q_c^*	heat rate leaving the thermoelectric module (W)		
q_w^*	heat rate leaving the heat pipes and transferring to the water in the box (W)		

approximately 150 °C. However, the best system design was achieved when the TEG was integrated with the cooking stove without changing or damaging the stove body.

The electric power generated by a TEG coupled to a cooking stove depends on the efficiency of the cooling system at the cool side of the TEG, and it has been shown that forced air/water-cooling systems are more efficient than free air/water-cooling systems [1,9]. However, forced cooling systems need electricity to operate and cause some electricity loss from the TEG. All previous applications of coupling the TEG to a stove depended on inefficient natural cooling of the cold side of the TEG. A solution to overcome the low efficiency was introduced by Min and Rowe [12], who combined the generation of heat and power into a symbiotic system, in which the heat released to the cold side is used to heat water for household purposes. The efficiency of the TEG system is equal to that of a conventional heating system, but the TEG system offers the advantage that both electricity and hot water are produced. Similar symbiotic systems were developed by Chen et al. [13] and Goudarzi et al. [14].

Date et al. [15] used concentrated solar energy as a heat source for a thermoelectric power generation system, in which the cooling system was a heat pipe. One end of the heat pipe was embedded inside an aluminium block and installed at the cold side of the thermoelectric module. The condenser of the heat pipe was immersed in a water tank. This technique offers a high heat transfer coefficient for cooling the TEG as well as a way to scavenge heat through water that can then be used for industrial or domestic purposes. Mathematical modelling was used to predict the transient behavior of the water temperature.

In this work, a waste-heat recovery (WHR) system was designed for a traditional cooking stove to preserve maximum thermal energy efficiency, use passive cooling, and produce a system that did not alter the body of the cooking stove. The TEG system, as shown in Fig. 1, consists of a thermoelectric module sandwiched between two heat exchangers; the hot side of the thermoelectric module is installed under the grate. The performance of the cooling system of the TEG was enhanced by using a heat pipe with a water-filled box. The system is used to generate electricity and hot water as a by-product for domestic applications.

The amount of electrical power generated and the hot water temperature depend on both the hot-side temperature and the

volume of water being heated. Data acquisition, such as generated electrical power and hot water temperatures a function of time, were analysed for studying the stability and thermal efficiency of the designed system. In addition, we used the response surface methodology (RSM) technique to study the influence of the heater temperature and volume of water on the electrical power generation and the maximum hot water temperature at steadystate. RSM is a statistical method based on a multivariate non-linear model that defines the relationship between parameters and responses and is used to estimate the effect of individual parameters and interactions of parameters on each of the response variables [16,17]. This approach results in improved statistical interpretation of the results, requires less time for analysis, and requires fewer experiments, all of which reduce the cost of system development [18]. The thermal to electrical energy conversion efficiency and hot water production efficiency were calculated. Then, the contact resistances at typical positions were evaluated to improve the WHR performance. Finally, the WHR system was then combined with the cooking stove and tested in realistic operating conditions. The thermal efficiency of the cooking stove, both with and without the WHR system, was determined.

2. Materials and methods

The WHR system constructed for this study is shown in Fig. 2. Three cartridge heaters are embedded in an aluminium block to simulate the waste heat that would be produced by the cooking stove. A copper plate with a thickness of 20 mm is installed under the heater. To calculate the rate of energy (q_1^*) into the system, K-type thermocouples (accuracy ± 0.5 °C) with 1 mm diameter tips are used to monitor the temperatures. NI 9211 (accuracy $\pm 0.05\%$), NI 9201 (accuracy $\pm 0.04\%$), and NI 9227 (accuracy $\pm 0.1\%$) were used as automatic simultaneous data collectors for temperature, electric current, and voltage across match load, respectively. This system was controlled by Labview. T_1 and T_2 are the temperatures at the upper and lower portions of the copper plate. The TEHP12656-0.3 thermoelectric module (Thermonamic, China) was used in this study. This module can work at a temperature as high as 330 °C continuously and up to 400 °C intermittently. The cooling system was designed to use four heat pipes, each with a diameter of

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

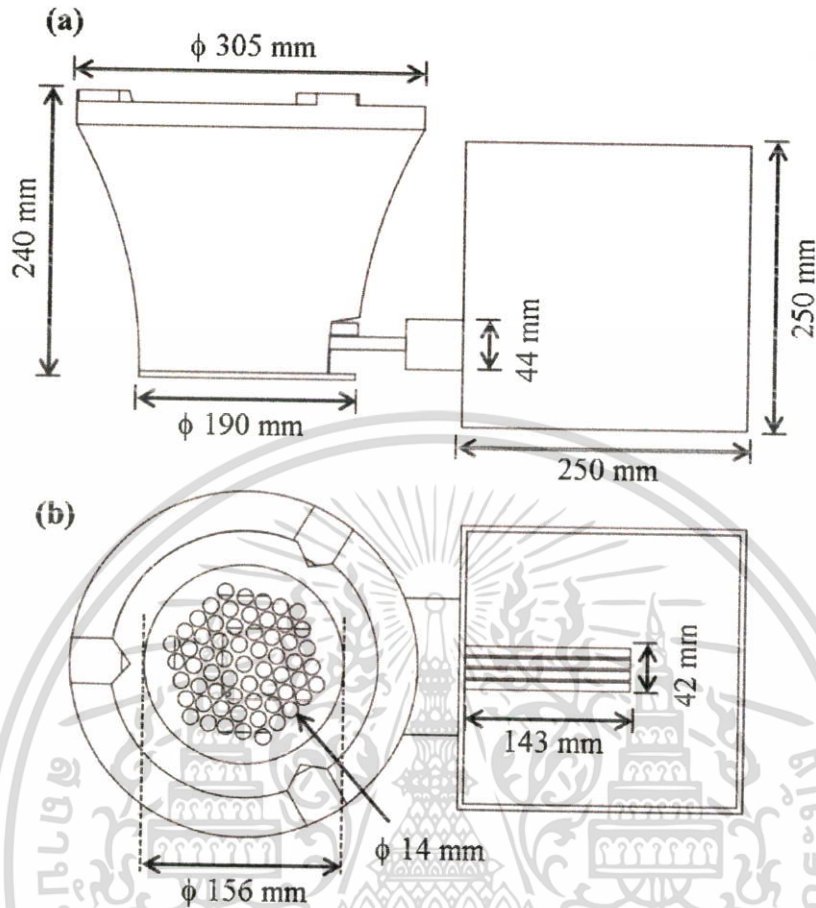


Fig. 1. Drawing of WHR system combined with cooking stove (a) side view and (b) top down view. A TEG with a heat pipe cooling system is installed under the grate.

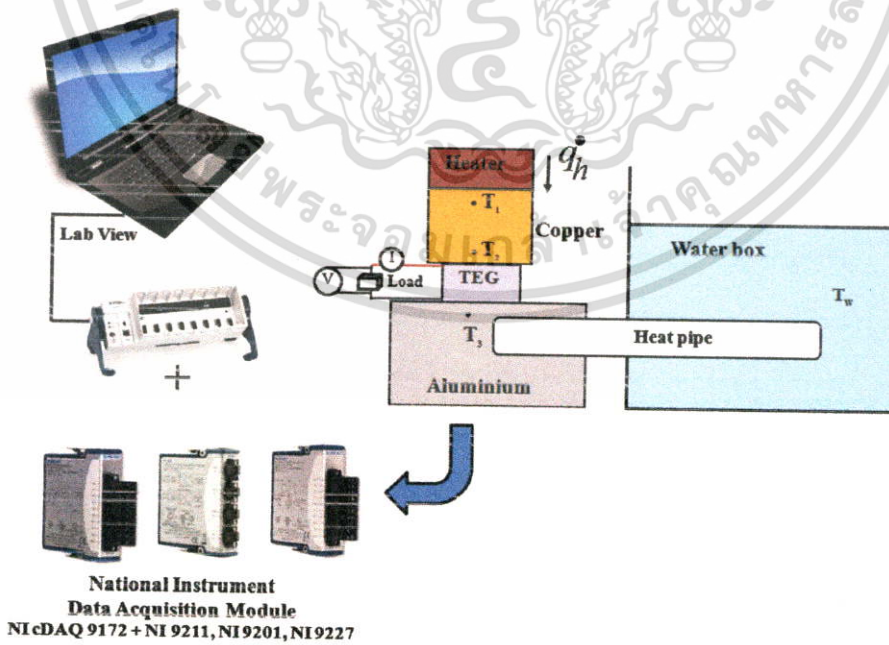


Fig. 2. Component setup and data acquisition measurement of the waste-heat recovery system.

8 mm and length of 300 mm. An aluminium block was drilled to create four 9-mm-diameter holes to hold the heat pipes in place.

Aluminium was selected because of the ease of machining and its reduced weight compared with copper. To enhance the perfor-

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mance of the cooling system and decrease the temperature of the cool side of the module, the acrylic water box was filled to the height of the evaporator of the heat pipe to accelerate heat discharge to the environment. To reduce thermal contact resistance, thermal grease was used for each contact. The heat from the condenser of the heat pipe is dissipated by the water to ensure a temperature differential between the hot and cold sides of the TEG.

In this work, Design-Expert 9.0.3 was used to analyse the experimental design and perform statistical analysis. The effects of the heater temperature, T_H , and the volume of water, V_W , on the system responses (electrical power generation, P_{avg} , and the maximum hot water temperature at steady state, $T_{W(max)}$) were studied under the given conditions. All combinations of input parameter conditions and the corresponding experimental response values obtained are shown in Table 1. In the central composite design (CCD) method, only 13 experiments, including five experiment replications, are required. The total efficiency of the WHR system and contact resistances at typical positions were calculated. Finally, the thermal efficiency of the cooking stove, both with and without the WHR system, was determined.

3. Results and discussion

3.1. Empirical modelling and statistical analysis by RSM

The experimental design of the WHR system was tested by RSM to determine its response characteristics. The evolution of electri-

cal power (P) and water temperature (T_W) resulting from a range of heater temperatures (T_H) and volumes of water (V_W) is shown in Fig. 3(a) and (b), respectively. As shown in Fig. 3(a), the power generated initially increases as T_H increases above room temperature. The power then slightly decreases until reaching a constant power after approximately 2000 s. Constant power generation indicates a constant temperature difference between the hot and cold sides. In general, the generated electric power is proportional to the square of the temperature difference. This result indicates that the cooling system maintained a nearly constant temperature difference, especially at a heater temperature of 130 °C (experiment #5). For experiments #1, 5, 6, 9, and 13, the average temperature differences are 76, 63, 162, 121, and 119 °C, respectively. For experiment #6, the average and maximum generated power are approximately 4.34 and 5.0 W, respectively. The increase of T_H causes a larger temperature difference between the junctions of the thermoelectric module. This characteristic is consistent with the studies of Chen et al. [19]. Fig. 3(b) shows the hot water temperature as a function of time. The maximum water temperature ($T_{W(max)}$) was obtained in experiment #6, in which T_H and V_W were 71 °C and 7 L, respectively. It is interesting to note that the thermal mass of the water in the system is significantly higher than the thermal mass of the thermoelectric module. Therefore, the generated power reaches steady state (2000 s) more quickly than the hot water temperature (8000 s). Finally, the responses of experiments #9 and #13, which have the same input parameters, were nearly the same. This indicates that the results are reproducible.

Both F-test and P-value were used to determine a suitable model (linear, two factorial, quadratic, or cubic). Results indicated that a quadratic model most suitably described the relationship between T_H , V_W , and P_{avg} , and a linear model was established for $T_{W(max)}$. The analysis of variance (ANOVA) of the model for the P_{avg} is shown in Table 2. The model F-value of 652.94 implies that the model is significant. There is only a 0.01% chance that an F-value this large could be caused by noise. Values of “Prob > F” less than 0.0500 indicate model terms that are significant. In this case, parameters A (heater temperature, T_H), B (water volume, V_W), and A^2 are significant model terms. Model terms AB and B^2 were not significant. The efficiency of the model was investigated by comparing the performance of lack of fit. The lack of fit F-value of 2.45 implies the lack of fit is not significant relative to pure error. There is a 20.29% chance that an F-value this large could be caused by noise. A non-significant lack of fit is desirable. R^2 and the adjusted determination coefficient of R^2 are both greater than

Table 1
Experimental conditions and response measurements.

Experiment	Experimental conditions		Response measurements	
	T_H (°C)	V_W (L)	P_{avg} (W)	$T_{W(max)}$ (°C)
1	150	5	1.02	55.9
2	250	5	3.83	69.7
3	150	9	1.31	53.9
4	250	9	3.94	68.2
5	130	7	0.73	49.5
6	271	7	4.34	71.4
7	200	4.2	2.48	62.3
8	200	9.8	2.76	58.8
9	200	7	2.67	63.3
10	200	7	2.70	62.7
11	200	7	2.74	63.3
12	200	7	2.60	61.9
13	200	7	2.69	62.6

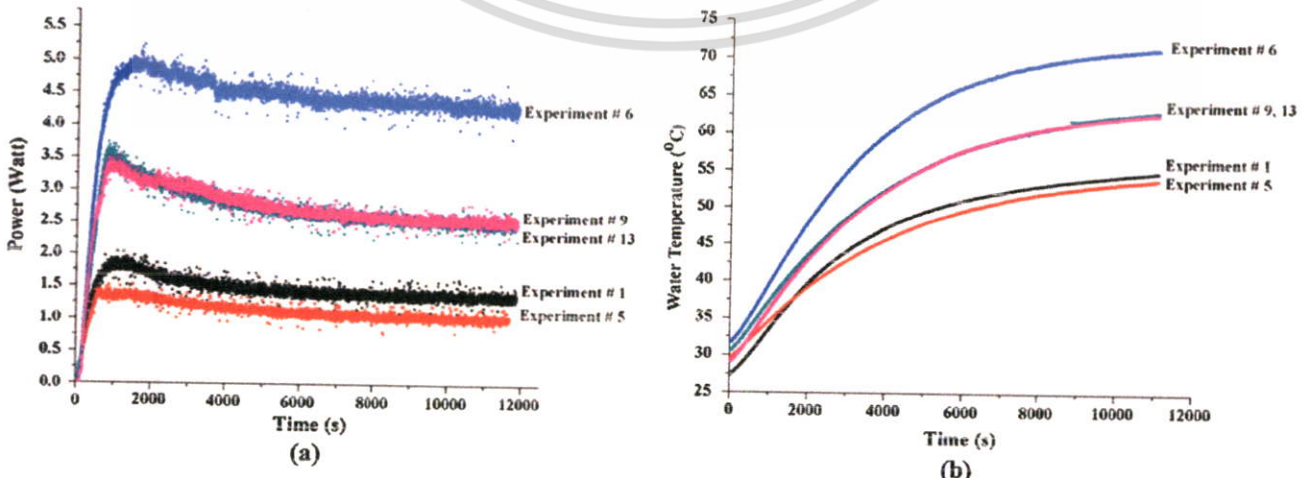


Fig. 3. Temporal distribution of (a) output power (P) and (b) water temperature (T_W) for experiments 1, 5, 6, 9, and 13.

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.9, indicating that this is a good statistical model [20]. Three-dimensional and contour plots showing the effects of the T_H and V_W on the P_{avg} are shown in Fig. 4(a) and (b), respectively. It was found that the T_H had a larger effect on the P_{avg} than the V_W .

Table 2
ANOVA of the model for the average output power (P_{avg}).

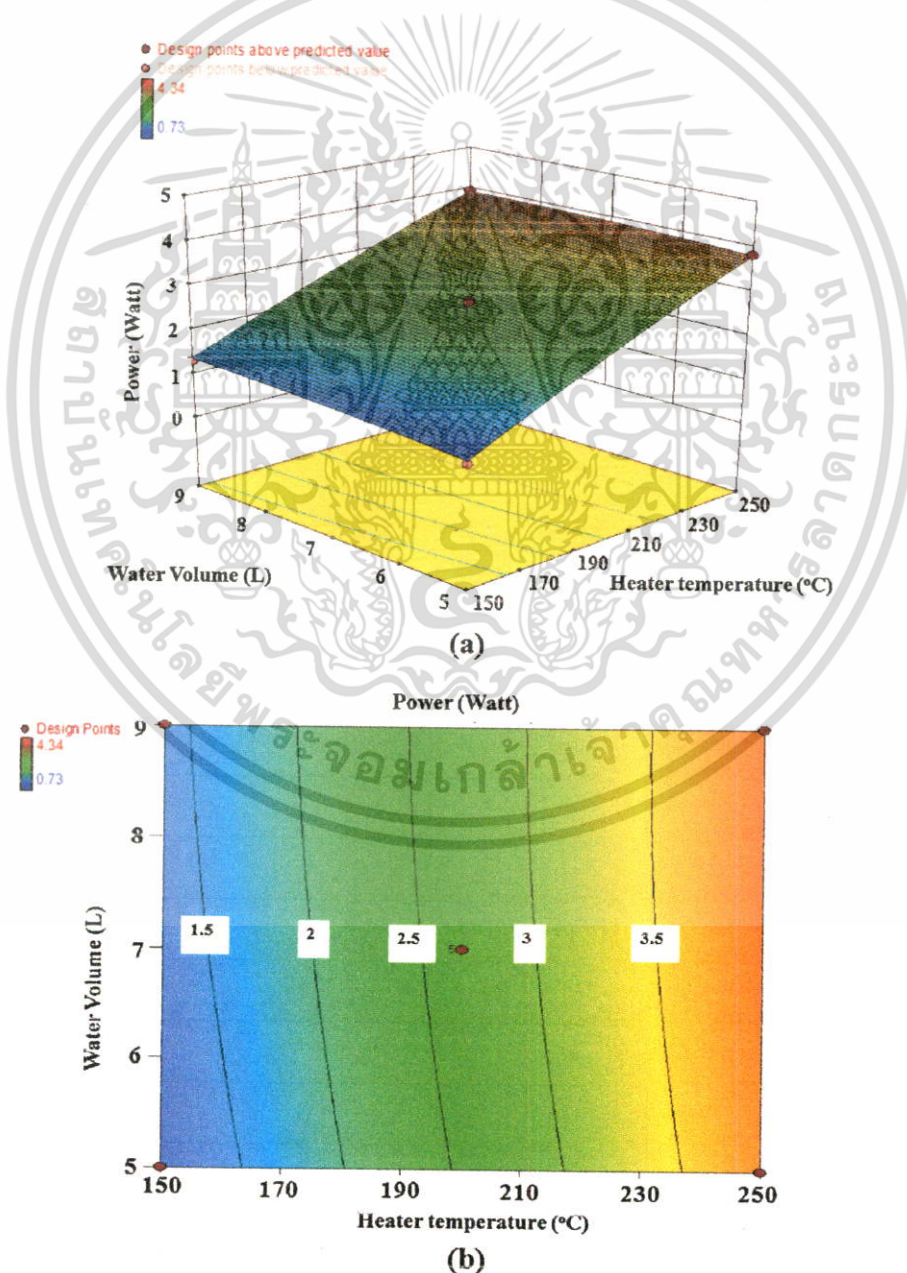
Source	Sum of squares	F-value	Prob > F
Model	14.05	652.94	<0.0001 significant
A-Hot side temperature	13.90	3230.88	<0.0001
B-Water volume	0.079	18.41	0.0036
AB	8.100E-003	1.88	0.2124
A ²	0.051	11.85	0.0108
B ²	0.013	3.01	0.1265
Lack of fit	0.020	2.45	0.2029 not significant

$R^2 = 0.9979$, adjusted $R^2 = 0.9963$.

The regression equation for the P_{avg} was fit using a second order polynomial model, as shown in Eq. (1):

$$P_{avg} = (-5.47) + (0.1432)T_H + (0.291)V_W - (4.50 \times 10^{-4})T_H V_W - (3.43 \times 10^{-5})T_H^2 - (0.0108)V_W^2 \quad (1)$$

The ANOVA for the model of maximum water temperature ($T_{W(max)}$) is shown in Table 3. The model F-value of 155.99 implies that the model is significant. Moreover, the lack of fit F-value was 5.80, implying that the lack of fit is not significant relative to pure error. The adjusted determination coefficient (adjusted $R^2 = 0.9627$) was also high, implying that the model has high significance. The regression model developed for the $T_{W(max)}$ can be plotted as response surface and contour plots, as shown in Fig. 5. It is clear that the $T_{W(max)}$ increases with increasing T_H . These results indicate that $T_{W(max)}$ is almost independent of the V_W . Note that $T_{W(max)}$ values will always stay under 100 °C because the water



เอกสารนี้เป็นเอกสาร... **Fig. 4.** (a) Surface curve and (b) contour plot of the output power of the WHR system. ไม่ใช่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

box system is open to the atmosphere. In addition, a $T_{W(max)}$ value of 80 °C is normally used for domestic applications [15]. To maintain the $T_{W(max)}$ at 80 °C, the hot side temperature of the TEG should be at 340 °C, using a water volume of 7 L. Based on the experimental results of CCD (Table 1) and regression analysis, a linear equation

was used to capture the relationship between the $T_{W(max)}$ and system parameters, as shown in Eq. (2):

$$T_{W(max)} = (35.9) + (0.148)T_H - (0.531)V_W \tag{2}$$

3.2. Rate of heat input to the system (q_h^*) and heat loss (UA_S)

Accurate measurement of the heat rate input to the system and heat loss is required to quantify system performance. Date et al. [15] used a variable voltage transformer with a digital voltmeter and an ammeter to measure the rate of energy input to the heater block, and they assumed that all the electrical energy was converted to thermal energy. Champier et al. [1] used a commercial finite element modelling software package to calculate the thermal conductivity of the thermoelectric module. The heat rate input to the thermoelectric module was calculated by measuring the

Table 3
ANOVA of the model for the maximum water temperature ($T_{W(max)}$).

Source	Sum of squares	F-value	Prob > F
Model	446.04	155.99	<0.0001 significant
A-Temperature	437.00	305.66	<0.0001
B-Volume	9.04	6.32	0.0307
Lack of fit	12.82	5.80	0.0553 not significant

$R^2 = 0.9689$, adjusted $R^2 = 0.9627$.

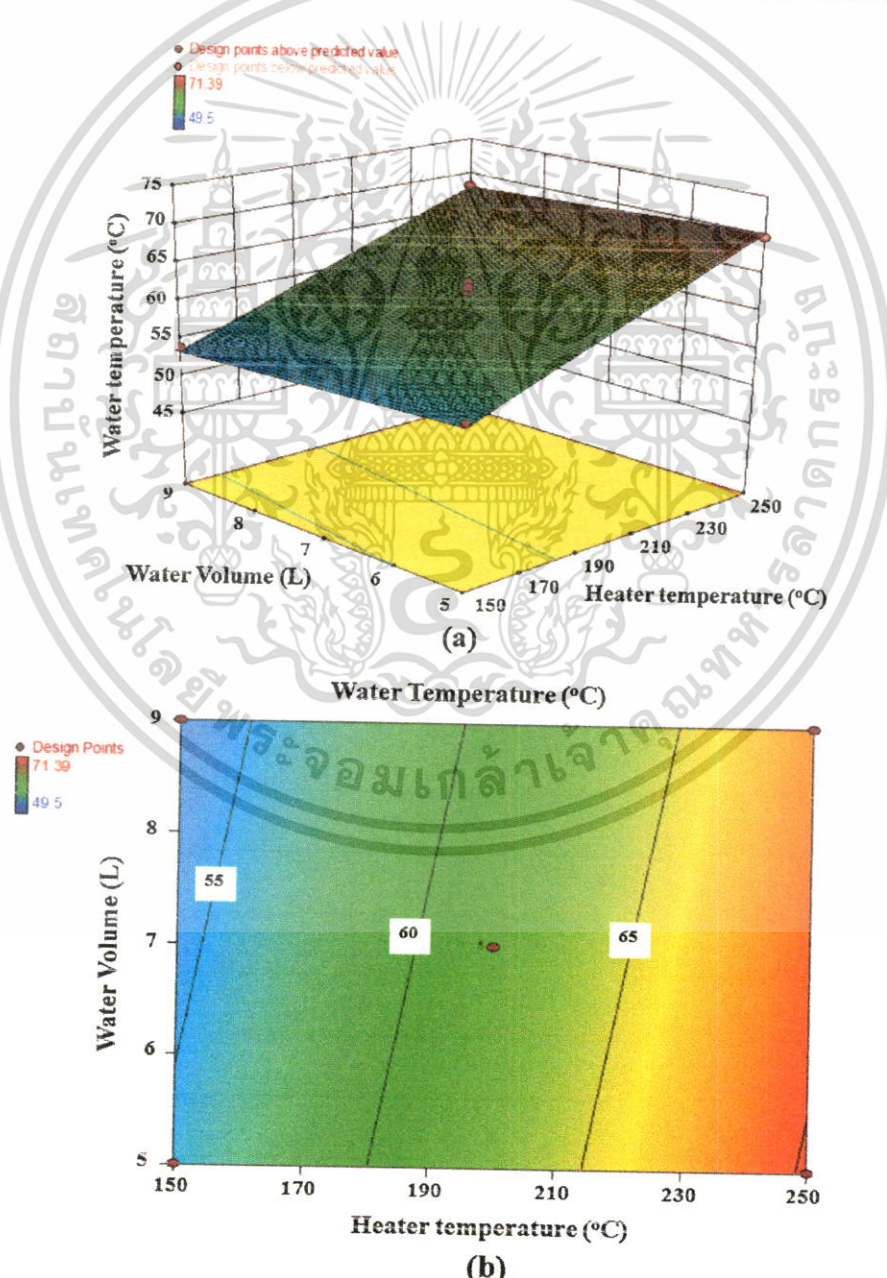


Fig. 5. (a) Surface curve and (b) contour plot of the maximum water temperature of the WHR system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

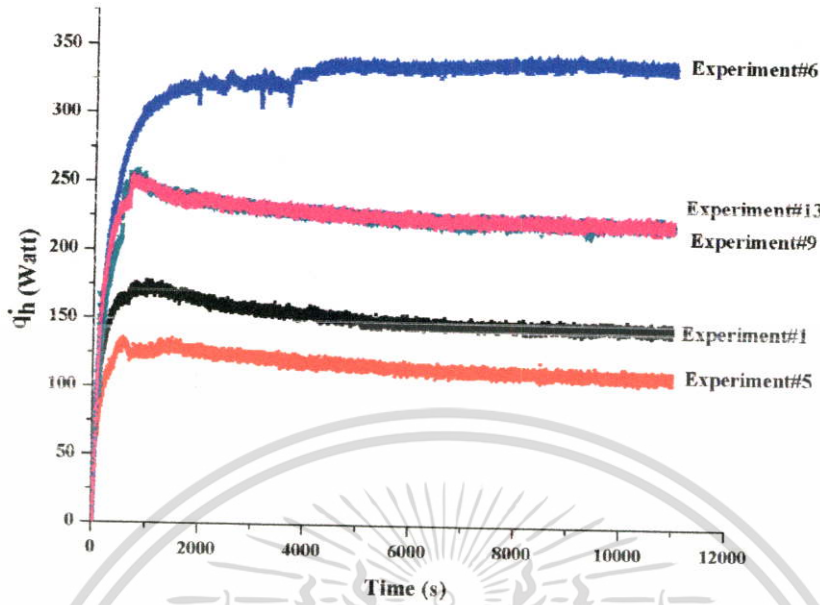


Fig. 6. Temporal distribution of the heat rate into the WHR system for experiments #1 ($T_H = 150^\circ\text{C}$), 5 ($T_H = 130^\circ\text{C}$), 6 ($T_H = 271^\circ\text{C}$), 9 ($T_H = 200^\circ\text{C}$), and 13 ($T_H = 200^\circ\text{C}$).

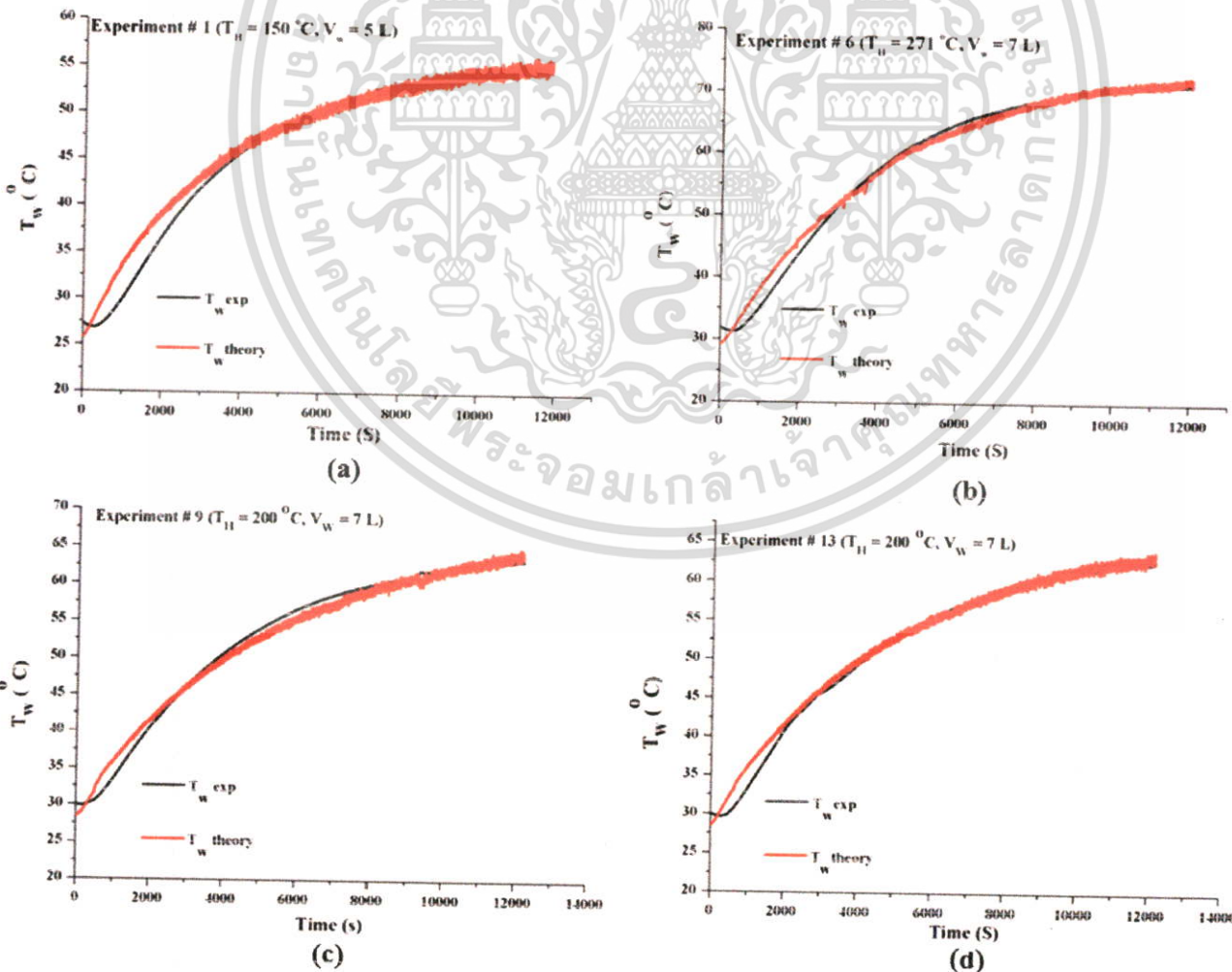


Fig. 7. Comparison of theoretical and measured hot water temperature profiles.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

temperature difference and thermal conductivity of the thermoelectric module. In our work, the heat flow through the WHR system was determined by measuring the temperatures at T_1 and T_2 , using type K thermocouples with diameters of 1 mm placed in holes in the copper block (Fig. 2). Assuming no heat loss from the copper block and heat transfer by conduction only, we can write the one-dimensional heat rate input equation as

$$q_h^* = \frac{k_{cu} A_{cu} (T_1 - T_2)}{x}, \quad (3)$$

where k_{cu} is the thermal conductivity of copper (401 W/(m K) [21]), A is the thermoelectric module area (31.36 cm²), and x is the distance between the T_1 and T_2 measurements (12.0 mm).

Using Eq. (3), the rate of heat input to the system (q_h^*) was obtained for each initial system condition. (q_h^* varies with the T_H , as seen in Fig. 6. The graph is similar to the output power shown in Fig. 3. The maximum value is reached at about 1000–2000 s, and it stabilises during the experimental process. Values of (q_h^* in experiments #1, 5, 6, 9, and 13 were 148, 110, 340, 225, and 225 W, respectively.

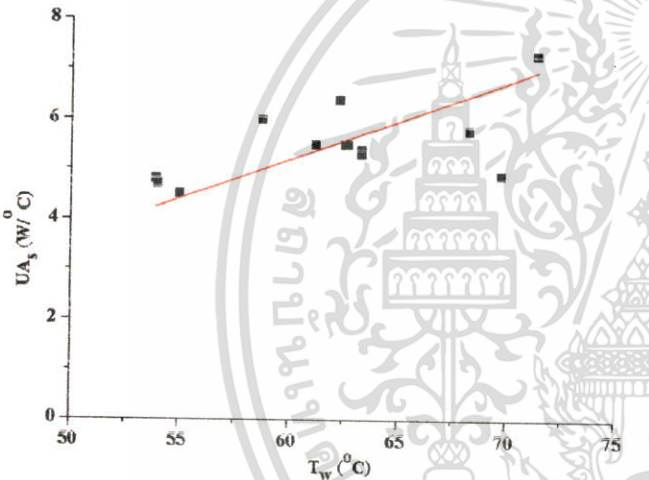


Fig. 8. Rate of heat loss from the water box (UA_s) for all experiments as a function of the maximum water temperature.

Date et al. [15] used the solution of a first-order non-homogeneous linear differential equation to predict the transient characteristics of the water temperature, given by Eq. (4)

$$T_w - \left[T_{wi} - \frac{q_h^* + UA_s T_a}{UA_s} \right] \exp \left[\frac{UA_s}{m \times c_p} t \right] + \left[\frac{q_h^* + UA_s T_a}{UA_s} \right] \quad (4)$$

where q_h^* is the heat rate into the system, T_w is the hot water temperature, T_{wi} is the initial water temperature, T_a is the air temperature, m is the mass of water, C_p is the heat capacity of water, and UA_s is the rate of heat loss from the water box per unit temperature difference (W/°C). By fitting our experimental data to the theoretical model of Eq. (4), UA_s values were adjusted to get matching results. In each experiment, UA_s is different and depends on q_h^* and T_w . Fig. 7 shows the comparison between the transient characteristics of the water temperature predicted by the model (red line) and experimental data for experiments #1, 6, 9, and 13 (black line). All the graphs illustrate agreement between the experimental data and the theoretical model, especially at steady state. Heat loss due to evaporation in the water box is neglected in the theoretical model, therefore UA_s depends only on the water temperature [15].

The UA_s values of all experiments are shown in Fig. 8. Results indicate that the heat loss increases with the temperature of the heating surface, and this result is consistent with Date et al. [15]. However, estimated UA_s values are about four to seven times higher than those reported by Date et al. [15] because the surface area of water box (A_s) in our work is about five to six times higher than is that of Date et al. [15]. This led to an increase in the heat loss into the environment. Note that we can reduce the loss by covering the box; however, that would increase the cold side temperature of the thermoelectric module and decrease the generating power.

3.3. Efficiency of the WHR system

Fig. 9 shows the energy balance model and thermal resistance circuit for the WHR system. The resistance circuit consists of the thermal contact resistance between the junctions (R_c and R_{chp}) and the thermal resistance of the thermoelectric module (R_{TE}), aluminium block (R_{Al}), and heat pipe (R_{hp}). The conservation of energy principle is applied to calculate the efficiency of the WHR system. We assume that the heat loss from the section of heat pipes outside

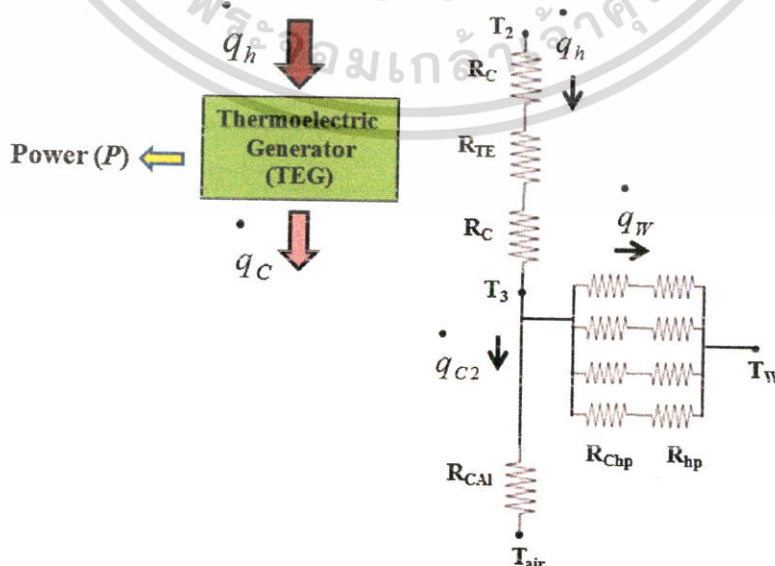


Fig. 9. Energy balance and thermal resistance model of the WHR system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the aluminium block and water box are negligible. The energy balance equation can be written as

$$q_h^* = P + q_c^* \tag{5}$$

with

$$q_c^* = q_w^* + q_l^* + q_{c2}^* \tag{6}$$

where P and q_c^* are the generating power and heat rate out of the thermoelectric module, respectively, q_w^* is the heat rate leaving the heat pipes and transferring to the water in the box, q_l^* is the heat loss rate from the water box, and q_{c2}^* is the heat rate leaving the thermoelectric module and transferring to the aluminium block.

Based on the above definitions, we can calculate the thermoelectric conversion efficiency (η_{TE}) by using the generating power (P) and heat rate into the WHR system (q_h^*) data shown in Figs. 3 (a) and 6. The equation is given by $\eta_{TE} = P/q_h^*$, and the results are shown in Fig. 10. The trend of the graph is approximately the same as in Fig. 3(a). The average generating powers for all experiments are shown in Table 1. η_{TE} is between 1% and 2%, which is similar to values reported by Date et al. [15].

The heat rate absorbed by the water in the box can be calculated by using the mass of water (m), the specific heat capacity of water

($C_p = 4200 \text{ J/kg K}$ [15]), and the rate of water temperature (T_w) rise. The relation is shown in Eq. (7).

$$q_w^* = mc_p \frac{dT_w}{dt} \tag{7}$$

When steady state has been reached, the water temperature is approximately constant and Eq. (7) cannot be used to calculate q_w^* . However, we can estimate q_w^* by assuming that the heat transfer from the hot water to the surroundings is approximately equal to the heat transferred from the heat pipe to the hot water, as shown in Eq. (8)

$$q_w^* = q_l^* = UA_s(T_{w(\max)} - T_a) \tag{8}$$

The efficiency of hot water heating (η_w) can be calculated from the ratio of q_w^* and q_h^* . The total efficiency is over 80% for all of the experiments, indicating a high efficiency WHR system under all operating conditions tested in this study (see Table 4).

3.4. Thermal resistance circuit

When two materials contact each other, thermal resistance occurs at the interface. The objective of this section is to calculate

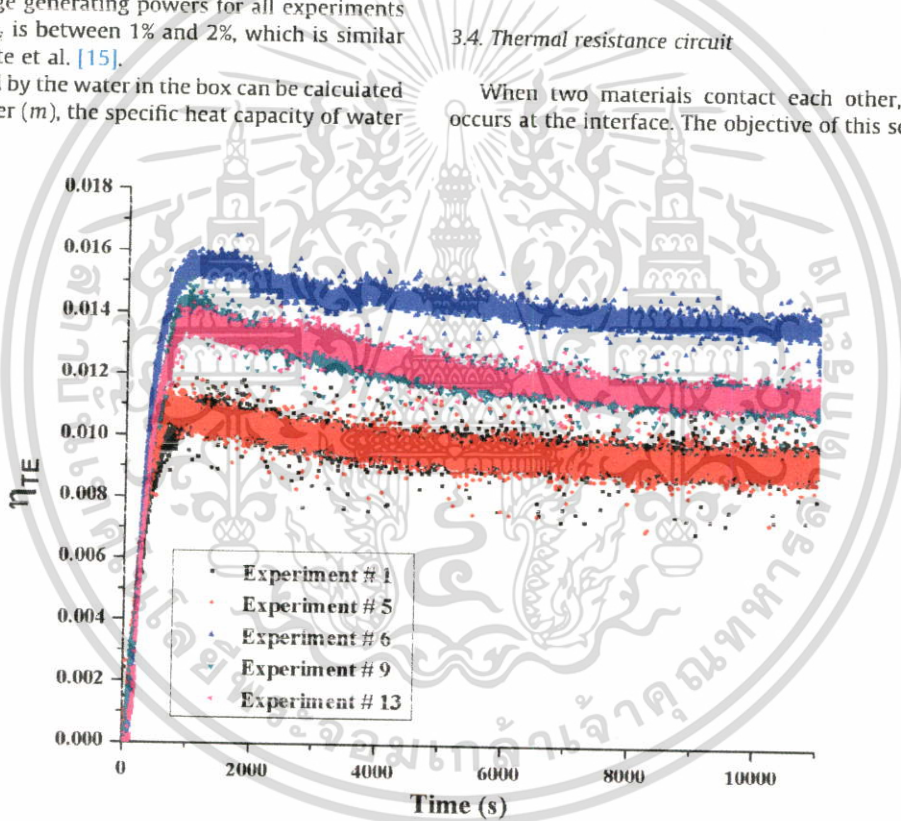


Fig. 10. Temporal distribution of the TEG efficiency for experiments #1, 5, 6, 9, and 13.

Table 4
Efficiency of hot water heating, thermoelectric generator, and total efficiency of the WHR system at steady state.

Exp.	q_h^* (W)	UA_s (W/°C)	q_w^* (W)	η_w	η_{TE}	η_{total}
1	148	4.5	116	0.78	0.012	0.80
2	185	4.9	170	0.92	0.020	0.94
3	145	4.8	115	0.79	0.015	0.81
4	255	5.8	222	0.87	0.016	0.87
5	110	4.7	92	0.83	0.010	0.84
6	340	7.3	302	0.89	0.013	0.90
7	230	6.4	207	0.90	0.010	0.91
8	222	6.0	175	0.79	0.011	0.80
9	225	5.4	180	0.80	0.011	0.81
10	225	5.5	180	0.80	0.011	0.81
11	220	5.3	177	0.80	0.012	0.81
12	220	5.5	175	0.80	0.011	0.81
13	225	5.5	180	0.80	0.012	0.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the thermal contact resistances, which will be used to improve the performance of the WHR system. These values are important indicators that quantify the behavior of a good contact [22]. Using the thermal resistance circuit shown in Fig. 9, the contact resistances between the thermoelectric module and apparatus occur at the copper block–module interface and the aluminium block–module interface. To calculate the contact resistance (R_c) at both interfaces, we measure the temperatures at the copper and aluminium blocks (T_2 and T_3), as seen in Fig. 2. Based on Fourier's law, the relationship between T_2 and T_3 can be derived as follows:

$$T_2 = T_3 + q_w^*(2R_c + R_{TE}) \quad (9)$$

where R_{TE} is the thermal resistance of the thermoelectric module (1.5 °C/W [15,22]). The calculated contact resistance values for all experiments are shown in Fig. 11(a). The results show that R_c is almost independent of T_H , and small variations of R_c in the range of 0.45–0.51 °C/W are observed.

Assuming lumped capacitance for the aluminium block, q_{C2}^* can be written in terms of T_3 , as follows:

$$q_{C2}^* = \frac{T_3 - T_a}{R_{Al}} \quad (10)$$

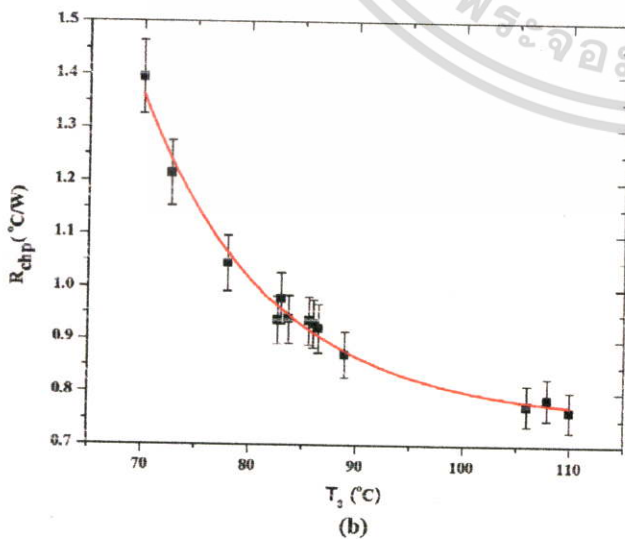
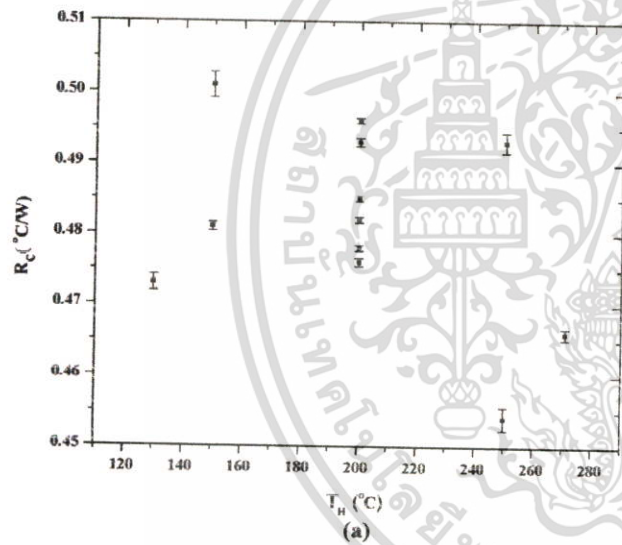


Fig. 11. (a) R_c as a function of the heater temperature and (b) R_{chp} as a function of the aluminium block temperature.

with

$$R_{Al} = d_{Al}/K_{Al}A_{Al} \quad (11)$$

where d_{Al} and A_{Al} are the thickness and area of the aluminium block, respectively, K_{Al} is the thermal conductivity of aluminium (237 W/m K [21]), and T_a is the air temperature. Substituting q_{C2}^* in Eq. (6), the value of $q_w^* + q_l^*$ is obtained. The thermal contact resistance between the heat pipe and aluminium block (R_{chp}) can be calculated from:

$$R_{chp} = 4 \left(\frac{T_3 - T_w}{q_w^* + q_l^*} \right) - R_{hp} \quad (12)$$

where T_w is the hot water temperature, R_{chp} is the thermal contact resistance between individual heat pipes and the aluminium block, and R_{hp} is the thermal resistance of individual heat pipes. R_{hp} is much smaller than are R_c and R_{TE} and can therefore be neglected in this analysis [22,23]. R_{chp} values are shown in Fig. 11(b).

As seen in Fig. 11(b), R_{chp} decreases with increasing aluminium block temperature. In addition, the relationship between R_{chp} and T_3 is quadratic. As the interface temperature increased from 70 °C to 110 °C, the interface thermal contact resistance decreased from 1.4 ± 0.8 °C/W to 0.77 ± 0.15 °C/W because of the decrease of gap thermal interface from a thermal expansion of heat pipe and aluminium block, which in turn leads to the increase of thermal conductivity. From the theoretical works of Zhu and Ertekin [24,25], they suggested that the effect of interfaces are sources of inelastic scattering and introduce harmonic modulation. The increasing interface density should result in reduced thermal conductivity. The highest value of R_{chp} was about five times higher than R_c . This result indicated imperfect contact between the two surfaces. In this work, the aluminium block was drilled with holes with a diameter 1 mm larger than the heat pipe diameter. Although thermal grease was used to reduce the thermal contact resistance between the aluminium block and the heat pipe, the small gap increased the thermal resistance between the heat pipes and the aluminium block. To solve this problem, the heat pipes should be embedded into an aluminium mould casting. Although the manufacturing cost of this method is relatively high, it would break even for mass production. The heat sink design is one of the key factors affecting the performance of the TEG. It is desirable to design a thermoelectric module with a minimum heat sink resistance in order to maximise the system efficiency.

3.5. Measuring the thermal efficiency of a combined WHR–cooking stove system

In this work, one disadvantage of the design was that the WHR system obstructed airflow into the cooking stove, potentially resulting in decreased combustion efficiency. Thermal efficiency, or an emission test, is commonly employed to quantify combustion efficiency [2]. The thermal efficiency of the cooking stove, η_{CS} , is given by the ratio of the thermal energy gained by the water in the pot to the energy content of the fuel consumed. The energy entering the pot raises the temperature of the water to the boiling point and then evaporates the water, as described by Eq. (13) [2].

$$\eta_{CS} = \frac{m_{wi}C_p(T_{we} - T_{wi}) + m_{i,evap}H_l}{m_fH_f} \quad (13)$$

where m_{wi} is the initial mass of the water in the pot, $m_{w,evap}$ is the mass of the evaporated water, m_f is the total mass of fuel used, T_{we} is the temperature of boiling water, T_{wi} is the initial temperature of the water in the pot, H_l is the latent heat of vaporisation at 373 K and 10^5 Pa, and H_f is the calorific value of the fuel (kJ kg^{-1}).

Schematics of the experimental setup of the cooking stove, both with and without the WHR system, are shown in Fig. 12(a) and (b),

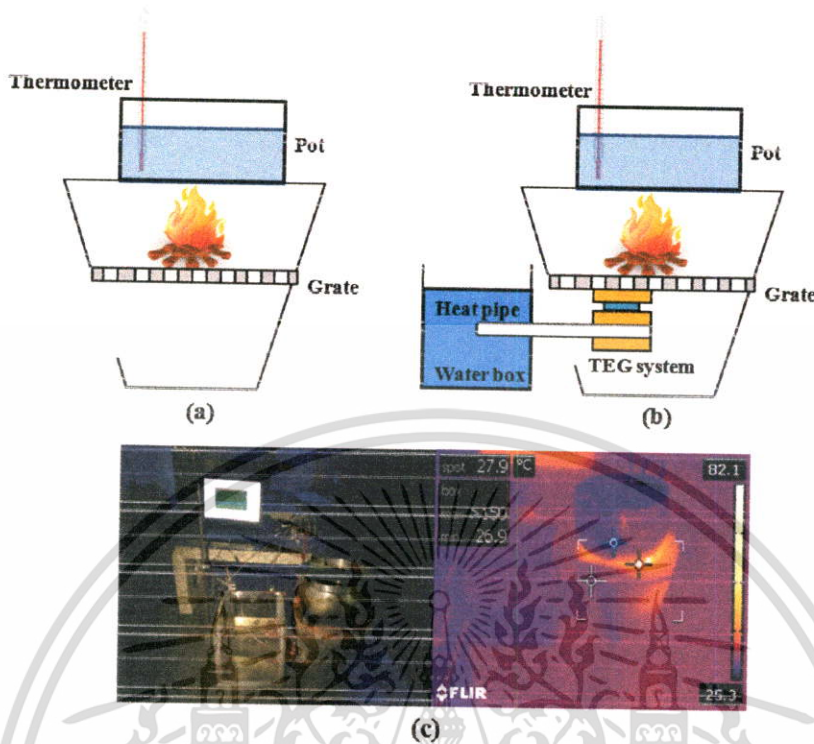


Fig. 12. Experimental setup of the cooking stove: (a) without the WHR system, (b) with the WHR system, and (c) with the WHR system installed in the cooking stove to test the system under realistic operating conditions.

respectively. Fig. 12(c) shows both the WHR system installed in the cooking stove and the data acquisition system used in the tests. Four litres of water and 400 g of charcoal were used in this experiment. The temperature profile of the setup was captured by an infrared radiation (IR) camera. The maximum hot side temperature of the TEG was in the range of 300–350 °C, while the combustion time was 1 h.

The mass of the water in the pot before and after the combustion process was measured. In Table 5, $m_{w, \text{evap}}$ from the cooking stove with the WHR system slightly decreased, compared with the cooking stove without the WHR system, in all three experiments. The ratio of the thermal efficiency of the cooking stove, both with and without the WHR system, was then calculated. The efficiency of the cooking stove with the WHR system decreased by less than 5%. The results indicate high performance of the WHR system when applied under realistic operating conditions.

Table 6 shows a comparison of generated TEG power using various cooling systems reported in the literature [1,7–11,26,27]. The output power is strongly dependent on the cooling system. Water-cooled forced convection is the most effective cooling method for the TEG system, followed by air-cooled forced convection. Our WHR system is compared with the water-cooled natural convec-

Table 6 Summary of the reported generating power as a function of cooling type.

Cooling type	Power (W)/module	Cooling type	Power (W)/module
Air natural convection	1.0 [7]	Water natural convection	2.3 [1]
	4.2 [8]		3.4 [27]
	3.4 [9]		8.0 (this work)
	2.4 [10]		5.7 [11]
Air force convection	5.3 [26]	Water force convection	7.9 [14]

tion method. In this work, the maximum TEG power (8.0 W at a temperature difference of 320–330 °C) is similar to that of water forced convection cooling systems. The maximum TEG power predicted from Eq. (1) is only 8.38% higher, at 8.7 W; therefore the model is acceptable for predicting the TEG power. However, the model of the water temperature is not consistent with the measured water temperature. The maximum measured water temperature of the WHR system is 58 °C, whereas the maximum predicted temperature from Eq. (2) is more than 80 °C. This is because the characteristics of the electrical heater and charcoal combustion heat sources are significantly different. The electrical heater provides a constant temperature and allows for a steady-state water temperature to be reached, while the charcoal combustion produces a short period of constant heating temperature (10 min), during which the water temperature cannot reach steady state.

4. Conclusions

We successfully designed a WHR system using a TEG with passive water cooling. The total conversion efficiency was more than 80%, producing both thermoelectric power and hot water for domestic applications. The system can be directly installed in a traditional cooking stove, and the thermal efficiency of the cooking

Table 5 Mass of evaporated water and ratio of thermal efficiency of the cooking stove, both with and without the WHR system.

Exp.	Cooking stove without the WHR system $m_{w, \text{evap}}$ (kg)	Cooking stove with the WHR system $m_{w, \text{evap}}$ (kg)	$\frac{\eta_{cs} \text{ with WHR}}{\eta_{cs} \text{ without WHR}}$
1	2.36	2.30	97.84%
2	2.36	2.26	96.30%
3	2.40	2.30	96.50%
Average	2.37	2.29	96.88%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ถูกต้องเท่านั้น ไม่ควรแก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

stove decreased by less than 5%. The empirical modelling by RSM is reliable, validates the experimental results, and can be effectively used to predict the generated TEG power. The efficiency of the WHR system can be improved by reducing the thermal contact resistance between the heat pipe and aluminium block. The results presented in this work can be applied to households in developing countries.

Acknowledgments

This work was supported by the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission (Grant number 2559A11862013).

References

- [1] Champier D, Bédécarrats JP, Rivaletto M, Strub F. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy* 2010;35:935–42.
- [2] Bhattacharya SC, Albina O, Abdul PS. Emission factors of wood and charcoal-fired cook stoves. *Biomass Bioenergy* 2002;23:453–69.
- [3] Fitriani, Ovik R, Long BD, Barma MC, Riaz M, Sabri MFM, et al. A review on nanostructures of high-temperature thermoelectric materials for waste heat recovery. *Renew Sust Energy Rev* 2016;64:635–59.
- [4] Gayner C, Kar KK. Recent advances in thermoelectric materials. *Prog Mater Sci* 2016;83:330–82.
- [5] Zhe Z, Wenbin L, Jiangming K, Daochun X. Theoretical and experimental analysis of a solar thermoelectric power generation device based on gravity-assisted heat pipes and solar irradiation. *Energy Convers Manage* 2016;127:301–11.
- [6] Kim TY, Negash AA, Cho G. Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Convers Manage* 2016;124:280–6.
- [7] Nuwayhid RY, Rowe DM, Min G. Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. *Renew Energy* 2003;28:205–22.
- [8] Nuwayhid RY, Shihadeh A, Ghaddar N. Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling. *Energy Convers Manage* 2005;46:1631–43.
- [9] Nuwayhid RY, Hamade R. Design and testing of a locally made loop-type thermosyphonic heat sink for stove-top thermoelectric generators. *Renew Energy* 2005;30:1101–16.
- [10] Lertsatirthanakorn C. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresour Technol* 2007;98:1670–4.
- [11] Rinalde GF, Juanico IG, Tagliavore E, Gortari S, Molina MG. Development of thermoelectric generators for electrification of isolated rural homes. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35:5818–22.
- [12] Min G, Rowe D. Symbiotic application of thermoelectric conversion for fluid preheating/power generation. *Energy Convers Manage* 2002;43:221–8.
- [13] Chen M, Lund H, Rosendahl LA, Condra TJ. Energy efficiency analysis and impact evaluation of the application of thermoelectric power cycle to today's CHP systems. *Appl Energy* 2010;87:1231–8.
- [14] Goudarzi AM, Mazandarani P, Panahi R, Behsaz H, Rezaia A, Rosendahl LA. Integration of thermoelectric generators and wood stove to produce heat, hot water, and electrical power. *J Electron Mater* 2013;42:2127–33.
- [15] Date A, Date A, Dixon C, Akbarzadeh A. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. *Sol Energy* 2014;105:656–68.
- [16] Fatma GBS, Isil IG, Osman O. Analysis of the polymer composite bipolar plate properties on the performance of PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cells) by RSM (response surface methodology). *Energy* 2013;55:1067–75.
- [17] Noshadi I, Amin NAS, Parnas RS. Continuous production of biodiesel from waste cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: optimization using response surface methodology (RSM). *Fuel* 2012;94:156–64.
- [18] Wu J, Wang JL, Li MH, Lin JP, Wei DZ. Optimization of immobilization for selective oxidation of benzyl alcohol by *Gluconobacter oxydans* using response surface methodology. *Bioresour Technol* 2010;101:8936–41.
- [19] Chen WH, Liao CY, Hung CI, Huang WL. Experimental study on thermoelectric for power generation at various operating conditions. *Energy* 2012;45(1):874–81.
- [20] Reddy LVA, Wee YJ, Yun JS, Ryu HW. Optimization of alkaline protease production by batch culture of *Bacillus* sp. RKY3 through Plackett-Burman and response surface methodological approaches. *Bioresour Technol* 2008;99:2242–9.
- [21] Mill AF. *Heat transfer*. New Jersey: Prentice Hall; 1999.
- [22] Remeli MF, Fan L, Date A, Singh B, Aliakbar A. Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy Convers Manage* 2015;91:110–9.
- [23] Chen J, Zuo L, Wu Y, Klein J. Modeling, experiment and optimization of an on-pipe thermoelectric generator. *Energy Convers Manage* 2016;122:298–309.
- [24] Zhu T, Ertekin E. Phonon transport on two-dimensional graphene/boron nitride superlattices. *Phys Rev B* 2014;90:195209.
- [25] Zhu T, Ertekin E. Phonons, localization, and thermal conductivity of diamond nanowires and amorphous graphene. *Nano Lett* 2016;16:4763–72.
- [26] Shaughnessy SMO, Deasy MJ, Kinsella CE, Doyle JV, Robinson AJ. Small scale electricity generation from a portable biomass cookstove: prototype design and preliminary results. *Appl Energy* 2013;102:374–85.
- [27] Juanico IE, Rinalde F, Tagliavore E, Molina M. Novel heat controller for thermogenerators working on uncontrolled stoves. *J Electron Mater* 2013;42(7):1776–80.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวอาภาภรณ์ สุกุลการะเวก

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Aparporn Sakulalavek

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ถนนจลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

4. ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ (เกียรตินิยมอันดับ 2)	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	2544
วทม	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2548
วทศ	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2553

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุนสาขาวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์ (วัสดุศาสตร์)

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

งานวิจัยเผยแพร่ระดับนานาชาติ

1. A. Sakulalavek and R. Sakdanuphab "Power factor improvement of delafossite CuAlO_2 by liquid-phase sintering with Ag_2O addition" Materials Science in Semiconductor Processing Vol.56 (2016) pp 313-323. ฐานข้อมูล ISI (IF= 2.264)

2.P. Nuthongkum, A. Sakulalavek and R. Sakdanuphab "RSM base study of the effect of argon gas flow rate and annealing temperature on the [Bi]:[Te] ratio and thermoelectric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- properties of flexible Bi-Te thin film" Journal of Electronic Material(Article in press DOI: 10.1007/s11664-016-5024-1) ฐานข้อมูล ISI (IF=1.491)
3. V. Siriwongrungson, **A. Sakulalavek** and R. Sakdanuphab"Optimum sintering temperature for the thermoelectric properties of $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ material" Journal of Materials Science: Materials in Electronics Vol.27 (2016) 11101-11109 ฐานข้อมูล ISI (IF= 1.798)
4. Journal of Electronic Material(Article in press DOI: 10.1007/s11664-016-5024-1) ฐานข้อมูล ISI (IF=1.491)
- 5.
6. **A. Sakulalavek** and R. Sakdanuphab, "Figures of Merit of Low-Cost $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ Thermoelectric Material Prepared at Different Solid State Reaction Sintering Temperatures" Key Engineering Materials Vol. 659 pp 185-189 (2015) ฐานข้อมูล Scopus
7. R. Sakdanuphab and **A. Sakulalavek** "Resistive Switching Behavior of Ti/ZnO/Mo Thin Film Structure for Nonvolatile Memory Applications" Key Engineering Materials Vol. 659 pp 588-592 (2015) ฐานข้อมูล Scopus
8. P. Nimnual, **A. Sakulalavek** and R. Sakdanuphab, "The influence of N_2 partial pressure on color, mechanical, and corrosion properties of TiN thin films deposited by dc reactive magnetron sputtering" Key Engineering Materials Vol. 659 pp 550-554 (2015) ฐานข้อมูล Scopus
9. W. Wongtanarasasin, R. Sakdanuphab, K. Suwansukho and **A. Sakulalavek** "Changes in structural, morphological, and corrosion properties of CrN thin film effected by varying N_2 pressure in the sputtering process" Key Engineering Materials Vol. 659 pp 555-559 (2015) ฐานข้อมูล Scopus
10. Chalernpol Rudradawong, Aree Wichainchai, **Aparporn Sakulalavek**, Yuttana Hongaromkid and Chesta Ruttanapun "Method of high active preparation and electrical properties of CuFeO 2delafossite-type" Advanced Materials Research Vol. 979 pp 302-306 (2014) ฐานข้อมูล Scopus

งานวิจัยเผยแพร่ระดับชาติ

1.กมลมาศ สิงคเสลิต, อาภาภรณ์ สกกุลการะเวก และ ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ “Effect of annealing temperature on thermoelectric properties of flexible Bi₂Te₃ thin film prepared by RF magnetron sputtering” Naresuan University Journal: Science and Technology Vol.24(2) pp.148-155 (2016)

ฐานข้อมูล TCI (กลุ่ม 1)

2. ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ และ อาภาภรณ์ สกกุลการะเวก “อิทธิพลของก๊าซอะเซทิลีนที่มีต่อการเกิดโครงสร้างอสัณฐานของคาร์บอนภายใต้กระบวนการเคลือบฟิล์ม TiC โดยวิธีรีเอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง” Burapha Science Journal Vol.20(2) pp.140-149 (2016) ฐานข้อมูล TCI (กลุ่ม 1)

3.เฉลิมพล รุจรดาวงศ์, อาภาภรณ์ สกกุลการะเวก, ยุทธนา หงษ์อารมณกิจ, เชษฐา รัตนพันธ์ และ อาเรียย์ วิเชียรฉาย “Thermoelectric Properties of CuFeO₂ Delafossite-type by doping on Al, Sn, Ti and Au” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9 วันที่ 8-10 พฤษภาคม 2556

4 .เจษฎา สุขสัมฤทธิ์, อาภาภรณ์ สกกุลการะเวก, วิทยา ปันสุวรรณ, กาจปัญญา สุวรรณสุข และชานกานต์ เพิ่มฉลาด “Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate with Supercritical Methanol” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 วันที่ 17 - 19 มิถุนายน 2558

5. อาภาภรณ์ สกกุลการะเวกและราชศักดิ์ ศักดานุภาพ “Design of a Thermoelectric Generator for Improving the Thermal Efficiency of Cooking Stove” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 วันที่ 17 - 19 มิถุนายน 2558

6. อาภาภรณ์ สกกุลการะเวก, และสมชายเกียรติกรมลชัย “The Effect of ϵ -FeSi and Si Content on the Physical and Thermoelectric Properties of FeSi₆ Compound” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 วันที่ 17 - 19 มิถุนายน 2558

7. กนกพรศรีกุล, อาภาภรณ์ สกกุลการะเวก, ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ “Improvement the Thermoelectric Properties of Delafossite CuAlO₂ by Liquid Phase Sintering Method” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 วันที่ 17 - 19 มิถุนายน 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงินทุนวิจัย

ลำดับ ที่	ชื่อโครงการ	สถานภาพ	ระยะเวลา ดำเนินการ	งบประมาณ (บาท)	แหล่งทุน
1	โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านการเคลือบผิวด้วยเทคนิค PVD แก่ภาคอุตสาหกรรม	ผู้ร่วม โครงการ	5 พฤษภาคม 2559 - 25 ธันวาคม 2559	412,000	สำนักงาน คณะกรรมการนโยบาย วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ นวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.)
2	การสร้างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์สำหรับการเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มให้เป็นพลังงานไฟฟ้า	หัวหน้า โครงการ	ตุลาคม 2558 - 30 กันยายน 2559	300,000	โครงการส่งเสริมการ วิจัยในอุดมศึกษา สำนักงาน คณะกรรมการการ อุดมศึกษา (สกอ)
3	การพัฒนาศักยภาพโพลีพลาสติกสำหรับประยุกต์ในงานต้นแบบผลิตภัณฑ์	ผู้ร่วม โครงการ	เมษายน 2559 - 30 มีนาคม 2560	1,276,000	บริษัท ไทยสตีลเคเบิล จำกัด
4	การพัฒนาระบบเลเซอร์ Marking สำหรับเขียนขึ้นงานพลาสติกประเภทต่าง ๆ	ผู้ร่วม โครงการ	เมษายน 2559 - 30 มีนาคม 2560	1,137,400	บริษัท ไทยสตีลเคเบิล จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5	การประยุกต์เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ลงบนเครื่องมือตัดสำหรับอุตสาหกรรมสับประดแปรรูป	หัวหน้าโครงการ	ตุลาคม 2558 - 30 กันยายน 2559	280,000	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
6	การสังเคราะห์และประดิษฐ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์ดมดูลจากสารประกอบเหล็ก-ซิลิกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเผาไหม้	หัวหน้าโครงการ	29 กย55- 30กย58	1,000,000	สสวท
7	การสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาสารสังเคราะห์หัวสตุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ CuGaO ₂ ด้วยการเจือ Fe	หัวหน้าโครงการ	1ตค56-30 กย57	452,660	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
8	การสังเคราะห์และปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์ CuGaO ₂ โดยการเจือ Pt	หัวหน้าโครงการ	1ตค55-30 กย57	240,000	สจล.
9	การออกแบบและการสร้างระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติสำหรับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์โมดูล	หัวหน้าโครงการ	1ตค56-30 กย57	50,000	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	ต้นแบบแผ่นนำแบตเตอรี่- เย็นจากเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล	หัวหน้า โครงการ	1ตค55-30 กย56	50,000	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
11	การศึกษาความเป็นไปได้ ในการเพิ่มประสิทธิภาพ ของเตาหุงต้มด้วยเทอร์ โมอิเล็กทริกโมดูล	หัวหน้า โครงการ	1ตค55-30 กย56	50,000	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
12	การออกแบบและการ สร้างระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ เพื่อใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุสารกึ่งตัวนำด้วย วิธีแวนเดอพาาและ ปรากฏการณ์ฮอลล์	หัวหน้า โครงการ	1ตค57-30 กย58	350,000	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
13	การศึกษาความเป็นไปได้ ในการใช้โซลาร์เซลล์ ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โมดูลเพื่อผลิตไฟฟ้า	หัวหน้า โครงการ	1ตค57-30 กย58	50,000	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

รางวัลระดับชาติหรือนานาชาติที่ได้รับ

1. The ITS Outstanding Poster Award ในการนำเสนอผลงานวิจัยหัวข้อเรื่อง RSM base study of the effect of argon gas flow rate and annealing temperature on the [Bi]:[Te] ratio and thermoelectric properties of flexible Bi-Te thin film ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 35th International Conference & 1st Asian Conference on Thermoelectric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้