

การออกแบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการนำ
ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มแบบดั้งเดิมเพื่อนำกลับมาใช้

DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING OF WASTE-HEAT
RECOVERY SYSTEM FROM TRADITIONAL COOKING STOVE



นายศุภศักดิ์ คนชื้อ
SUPHASAK KONSUE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2017-SC-M-030-021

การออกแบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการนำ
ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มแบบดั้งเดิมเพื่อนำกลับมาใช้

DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING OF WASTE-HEAT
RECOVERY SYSTEM FROM TRADITIONAL COOKING STOVE



นายศุภศักดิ์ คนชื่อ
SUPHASAK KONSUE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2017-SC-M-030-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING OF WASTE-HEAT
RECOVERY SYSTEM FROM TRADITIONAL COOKING STOVE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2017-SC-M-030-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การออกแบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการนำความร้อน
เหลือทิ้งจากเตาหุงต้มแบบดั้งเดิมเพื่อนำกลับมาใช้”
“DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING OF WASTE-HEAT RECOVERY
SYSTEM FROM TRADITIONAL COOKING STOVE”

ชื่อนักศึกษา นายศุภศักดิ์ คนชื่อ
รหัสประจำตัว 58605064
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์ ประธานกรรมการ ดร.กวางปัญญา สุวรรณสุขโช อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผศ.ดร.ปัญญา แชน้ำแก้ว ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	   อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ พหุสบัติที่ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 303 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยลักษณะ 1 ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตติย์ ฉันทะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่...!!...เดือน...!!...ปี...๒๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มแบบดั้งเดิมเพื่อนำกลับมาใช้
ชื่อนักศึกษา	นาย ศุภศักดิ์ คนชื่อ
รหัสประจำตัว	58605064
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

บทคัดย่อ

ปัญหาของผู้คนในชนบทของประเทศกำลังพัฒนาคือการขาดการเข้าถึงไฟฟ้า แนวทางที่ยั่งยืนในการแก้ปัญหาที่สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองโดยเฉพาะจากกิจกรรมประจำวัน เช่น การใช้เตาหุงต้ม งานวิจัยนี้จึงได้มีการออกแบบและจัดการกับระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat Recovery System - WHR) เพื่อใช้ประโยชน์จากเตาหุงต้ม ระบบความร้อนเหลือทิ้งได้รับการออกแบบโดยกำหนดเงื่อนไขสามประการ คือ การใช้ความร้อนเหลือทิ้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุด การระบายความร้อนเป็นแบบธรรมชาติและไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือทำลายโครงสร้างเตาหุงต้ม พลังงานความร้อนจากเตาหุงต้มถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้หลักการเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEG) และความร้อนเหลือทิ้งถูกนำไปใช้ในการผลิตน้ำร้อน ส่วนทางด้านเย็นของระบบ TEG ถูกระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแช่ในกล่องน้ำที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง นอกจากนี้ ความร้อนที่ไหลผ่านระบบสามารถผลิตน้ำร้อนมาใช้ในประเทศ ระบบทดลองประกอบด้วยเครื่องทำความร้อนซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ท่อความร้อน กล่องน้ำ และระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเคที่ทำการวัด ตัวแปรที่ใช้ คือ อุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรน้ำ อุณหภูมิของทางด้านร้อนอยู่ระหว่าง 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส และปริมาตรน้ำ 5-9 ลิตร ที่สภาวะสมดุล วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (RSM) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำในการผลิตไฟฟ้า และอุณหภูมิน้ำร้อน ผลการทดลองประสิทธิภาพของระบบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนมีความสำคัญมากกว่าปริมาตรของน้ำ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ WHR สูงกว่า 80% ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อได้รับการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงระบบ WHR ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ WHR ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มลดลงน้อยกว่า 5%

คำสำคัญ : พลังงานความร้อนเหลือทิ้ง เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING OF WASTE-HEAT RECOVERY SYSTEM ON TRADITIONAL COOKING STOVE
Student Name	Mr. Suphasak Konsue
Student ID	58605064
Degree	Master of Science
Department	Applied Physics
Year	2559
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Aparporn Sakulkalavek

Abstract

A serious problem of people in the rural areas of developing countries is lack of access to electricity. A sustainable approach to solving this problem is that people should be able to generate electrical power by themselves, preferably from activities they do routinely such as using a cooking stove. In this work, a waste-heat recovery (WHR) system was effectively designed and implemented for utilizing waste heat from a cooking stove. WHR system was designed base on three basic conditions, maximum utilizing thermal energy efficiency, passive cooling and non destructive cooking stove body. Thermal energy from cooking stove was converted into electrical energy by a thermoelectric generator (TEG) principle, and used in a waste-heat hot-water boiler. The cold side TEG is cooled by the heat pipe immersed in water box that offer high heat transfer rate. In addition, the heat through water heating can be used for domestic proposed. The experimental system consists of a heater as heat source, thermoelectric module, heat-pipe, water box, and data acquisition system for voltage, current and temperature measurements. K-type thermocouples were attached at interested locations. Dependent variables were a heater temperature and a volume of water. The heater temperature ranged between 150 to 250 °C and the 5-9 liters volumes of water were investigated. At equilibrium, a respond surface methodology (RSM) based on a central composite design (CCD) was used to mathematical modeling for explain the influence of the heater temperature and the volumes of water on the electrical power generation and the hot-water temperature. The experimental results of system efficiency are shown that the heater temperature is more important than the volumes of water. The total efficiency of WHR system was more than 80%. Thermal contact resistance will be analyzed and adopted to improve the WHR system for better performance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Finally, the thermal efficiency of cooking stove with and without WHR system were measured. The results show that the thermal efficiency of cooking stove decreases less than 5%.

.Keywords: Waste-Heat recovery, Thermoelectric generator, Respond Surface Methodology, Central composite design



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ ซึ่งมีบุคคลดังต่อไปนี้

ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและเป็นทั้งผู้ให้ความรู้ สอนให้รู้จักทักษะในการใช้ความคิด การเผชิญออกสู่โลกภายนอก จนกระทั่งได้วิธีการแก้ปัญหาการจัดทำบทความวิชาการและรูปเล่มวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์

ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและแนวทางในการแก้ปัญหา

ผศ.ดร.ภทธีรยา ดำรงค์ศักดิ์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ แนวทางในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ผศ.ดร.ปัญญา แชน้ำแก้ว อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากสาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ชี้แนะและแก้ไขเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ดร.กมลปัญญา สุวรรณสุข ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทุนสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นอย่างดีมาโดยตลอด สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้บิดา มารดา อาจารย์ที่เคารพ และพี่น้องทั้งหลาย ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดี หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขออภัยมา ณ ที่นี้

ศุภศักดิ์ คนชื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ประวัติและพัฒนาการของท่อความร้อน.....	5
2.1.1 วิธีการส่งของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหย (Principle of Fluid Return to Evaporator).....	5
2.1.2 ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่วไป (Conventional Heat Pipe).....	6
2.1.3 เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon).....	6
2.1.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของท่อความร้อน (Structures and Characteristics of Heat pipe).....	7
2.1.5 พัฒนาการของท่อความร้อน (Evolution of Heat Pipe).....	8
2.2 หลักการทำงานของท่อความร้อน (Principle Operation of Heat Pipe).....	9
2.2.1 ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่วไปและเทอร์โมไซฟอน (Conventional Heat Pipe and Thermosyphon).....	9
2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานหลักๆของท่อความร้อน.....	11
2.3.1 สารทำงาน (Working Fluid).....	11
2.3.2 วัสดุพรม (Wick Structure).....	13
2.3.2.1 โครงสร้างวัสดุพรมในคาพิลลารี (Capillary Wick Structures)...	13
2.3.2.1.1 วัสดุพรมแบบผงโลหะที่เผา (Sintered metal wick) ..	13
2.3.2.1.2 วัสดุพรมแบบร่องตามแนวแกน (Axial grooves wick)	14
2.3.2.1.3 วัสดุพรมแบบร่องตามแนวแกน (Axial grooves wick)	14
2.4 วิธีการเลือกท่อความร้อน.....	15
2.4.1 กำหนดและตรวจสอบตัวแปรที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	15
2.4.2 การเลือกวัสดุของท่อความร้อน โครงสร้างของท่อความร้อน.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 กำหนดขนาดของความยาวและรูปร่างของท่อความร้อน	15
2.5 การถ่ายเทความร้อน	16
2.5.1 สภาวะสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอ (Steady state and Unsteady state)	16
2.5.2 การนำความร้อน (Conduction heat transfer).....	17
2.5.3 การพาความร้อน (Convection heat transfer).....	20
2.5.3.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or free convection).....	21
2.5.3.2 การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection).....	22
2.5.3.3 การพาความร้อนภายนอก (External convection heat transfer)	22
2.5.3.4 การพาความร้อนโดยการไหลผ่านกลุ่มท่อ.....	26
2.5.4 การแผ่รังสี (Radiation).....	27
2.6 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response Surface Methodology)	29
2.6.1 การออกแบบประสมกลาง (Central Composite Design; CCD).....	31
2.7 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์และการประยุกต์.....	34
2.7.1 ทฤษฎีและหลักการทั่วไป	35
2.7.2 หลักการพื้นฐานของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	36
2.7.3 ทางเลือกสำหรับการออกแบบระบบระบายความร้อน	40
2.7.3.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติของอากาศ.....	40
2.7.3.2 การพาความร้อนแบบบังคับ.....	43
2.7.3.3 การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้น้ำระบายความร้อน	49
2.7.3.4 การพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้น้ำระบายความร้อน.....	51
2.7.4 การประเมินผลและการเลือกชิ้นส่วน.....	55
2.7.4.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	55
2.7.4.2 การแลกเปลี่ยนความร้อน	57
2.7.4.3 การจัดการระบบผลิตกำลังไฟฟ้า.....	59
2.7.5 การประเมินผลในทางเศรษฐกิจ	60
2.7.6 สรุปและการทำงานในอนาคต	61
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	63
3.1 การเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและโครงสร้างภายในของท่อความร้อน	63
3.2 การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน.....	65
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	65
3.2.1.1 ท่อความร้อน.....	65
3.2.1.2 แผ่นทองแดง.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.3 แผ่นอะลูมิเนียม	66
3.2.1.4 ฮีตเตอร์.....	66
3.2.1.5 Temperature Control.....	66
3.2.1.6 Thermocouple Type K.....	67
3.2.1.7 กล้องอะคริลิค.....	67
3.2.1.8 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติและคอมพิวเตอร์.....	68
3.2.1.9 เตาทุงต้ม	68
3.2.1.10 ถ่านดำ.....	69
3.2.1.11 กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal image camera)	69
3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบ	70
3.3 วิธีการทดลอง	71
3.3.1 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว.....	71
3.3.2 การทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการ	73
3.3.3 การทดสอบระบบโดยติดตั้งกับเตาทุงต้ม.....	74
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	76
4.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค CCD (Central Composite Design).....	76
4.1.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P).....	77
4.1.2 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h).....	78
4.1.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (Q_w).....	80
4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ.....	86
4.3 ประสิทธิภาพของระบบ	90
4.3.1 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE})	90
4.3.2 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (η_w)	94
4.4 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบ	96
4.4.1 การหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อ ทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก	97
4.4.2 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียม กับท่อความร้อน (Heat pipe).....	100
4.5 ผลการทดลองภาคสนาม.....	104
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
เอกสารอ้างอิง	109
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
2.1 วิธีการส่งของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนชนิดต่างๆ	5
2.2 สารทำงานสำหรับท่อความร้อน	11
2.3 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ (Kreith)	18
2.4 ค่าของ D และ P สำหรับใช้ในสมการที่ (2.17)	27
2.5 ตำแหน่งการทดลองและระดับค่า $\alpha = 2^{k/4}$ สำหรับการทดลองแบบส่วนประสมกลาง	32
2.6 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประเภทการระบายความร้อนที่นำไปใช้กับเตา	54
2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์และราคาของแต่ละบริษัท.....	56
2.8 การวิเคราะห์การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกกับเตาชีวมวลในทางเศรษฐกิจ.....	61
3.1 การเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาใช้ในงานวิจัย	63
3.2 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-12656-0.3 จากผู้ผลิต.....	64
3.3 การเลือกโครงสร้างภายในของท่อความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย	64
4.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) ทั้งหมด 13 การทดลอง	78
4.2 ความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1-T_2 (°C) และการคำนวณอัตราการไหล ของความร้อนที่เข้ามาในระบบ ทั้งหมด 13 การทดลอง.....	80
4.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง.....	84
4.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเมื่ออุณหภูมิของน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ทั้งหมด 13 การทดลอง.....	86
4.5 ผลการทดลองในเบื้องต้นทั้งหมด 13 การทดลอง โดยใช้ออกแบบการทดลองแบบ ประสมกลาง (CCD) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำ ตามเงื่อนไขต่างๆ	87
4.6(ก) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของกำลังไฟฟ้า	88
4.6(ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของอุณหภูมิน้ำ.....	88
4.7 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง	93
4.8 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทั้งหมด 13 การทดลอง	94
4.9 ประสิทธิภาพรวมของระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า และการผลิตน้ำร้อน	95
4.10 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง	98
4.11 ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) เฉลี่ยและอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง	102
4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้ง.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้ม ไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน	1
2.1 ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่วไป	6
2.2 เทอร์โมไซฟอน	7
2.3 ส่วนที่สำคัญของท่อความร้อน	7
2.4 หลักการทำงานของท่อความร้อน	10
2.5 ลักษณะการวางของท่อความร้อน	11
2.6 ค่า Merit number ของสารทำงานต่างๆ	12
2.7 วัสดุพูนแบบผงโลหะ	13
2.8 วัสดุพูนแบบร่องตามแนวแกน	14
2.9 วัสดุพูนพูนชนิด Composite	15
2.10 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี	16
2.11 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังราบชั้นเดียว.....	19
2.12 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นต่อแบบอนุกรม	20
2.13 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ.....	21
2.14 การพาความร้อนโดยการบังคับ	22
2.15 การไหลขนานกับผนังราบ	23
2.16 การไหลตั้งฉากกับท่อกลม	25
2.17 การเรียงท่อแบบแนวเดียวและการเรียงแบบสลับ	26
2.18 กราฟ 3 มิติ ของวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว	30
2.19 ส่วนประกอบของ CCD และจุดการออกแบบ 9 จุด สำหรับปัจจัย 2 ตัวแปร.....	31
2.20 แผนผังแสดงการไหลของระบบ	35
2.21 แผนผังระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์	37
2.22 อุปกรณ์ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แบบโมดูลเดียว	41
2.23 ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ที่ใช้สำหรับเตาตั้งพื้น	42
2.24 การติดตั้งระบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	43
2.25 การระบายความร้อนด้วยระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ โดยการพาความร้อนแบบบังคับ	43
2.26 เตาฟิลิปส์	45
2.27 เตาสำหรับการพกพา	45
2.28 (a) เตา Envirofit ที่ใช้ในเชิงการค้า	47
(b) ตัวอย่างการออกแบบเตาที่ใช้ในเชิงการค้า	47
2.29 ส่วนประกอบของเตา chitetezo mbaula	48
2.30 ระบบหม้อไอน้ำภายในและภายนอก	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 การระบายความร้อนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์กับเตาโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติด้วยน้ำ.....	49
2.32 การออกแบบระบบระบายความร้อนของเตา “Planete Bois”	50
2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางด้านร้อนกับกระแสเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิทางด้านร้อนและอุณหภูมิทางด้านเย็น	51
2.34 ศูนย์กลางการระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก	52
2.35 วงจรความต้านทานเชิงความร้อน	58
2.36 รูปแบบการจัดการพลังงาน	59
3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-12656-0.3.....	63
3.2 ท่อความร้อน	65
3.3 แผ่นทองแดง	65
3.4 แผ่นอะลูมิเนียม	66
3.5 ฮีตเตอร์	66
3.6 Temperature Control	67
3.7 Thermocouple Type K	67
3.8 กล้องอะคริลิก.....	68
3.9 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ.....	68
3.10 คอมพิวเตอร์.....	68
3.11 เตาหุงต้ม	69
3.12 ถ่านดำ	69
3.13 กล้องถ่ายภาพความร้อน	70
3.14 (ก) การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อนในห้องปฏิบัติการ	70
(ข) การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อนในภาคสนาม	71
3.15 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง	72
3.16 การทดสอบระบบในห้องปฏิบัติโดยใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติทำการวัดอุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า.....	74
3.17 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มโดยที่ระบบไม่ติดตั้งกับเตาหุงต้ม.....	75
4.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13 ตามลำดับ	77
4.2(ก) ความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_1-T_2) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3 , 5 , 6 , 9 และ 13ตามลำดับ	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2(ข) อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13 ตามลำดับ	79
4.3 อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ช่วงที่ 1) และอุณหภูมิน้ำค้างที่ (ช่วงที่ 2) ตามการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13 ตามลำดับ	81
4.4(ก) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 3	82
4.4(ข) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 4	82
4.4(ค) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 6	83
4.4(ง) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 9	83
4.4(จ) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 13	84
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำค้างที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง	85
4.6(ก) ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า (P)	89
4.6(ข) ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิน้ำ (T_w)	90
4.7(ก) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 3	91
4.7(ข) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 4	91
4.7(ค) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 6	92
4.7(ง) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 9	92
4.7(จ) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 13	93
4.8 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน	96
4.9 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก	97
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเฉลี่ย (R_c) กับ อุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) ทั้งหมด 13 การทดลอง	99
4.11 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)	100
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_s) ทั้งหมด 13 การทดลอง	103
4.13(ก) (ข) (ค) และ (ง) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบและแสดงรายละเอียดของอุณหภูมิซึ่งถูกจับโดยกล้องถ่ายภาพความร้อน	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่อระบบติดตั้งกับเตาหุงต้ม ครั้งที่ 1	106
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่อระบบติดตั้งกับเตาหุงต้ม ครั้งที่ 2	106
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่อระบบติดตั้งกับเตาหุงต้ม ครั้งที่ 3	107
ก.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 1	118
ก.2 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 1	118
ก.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 1	119
ก.4 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1	119
ก.5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 2	120
ก.6 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 2	120
ก.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 2	121
ก.8 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 2	121
ก.9 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 5	122
ก.10 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 5	122
ก.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 5	123
ก.12 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 5	123
ก.13 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 7	124
ก.14 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 7	124
ก.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 7	125
ก.16 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 7	125
ก.17 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 8	126
ก.18 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 8	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.19 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 8.....	127
ก.20 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 8	127
ก.21 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 10	128
ก.22 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 10	128
ก.23 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 10	129
ก.24 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 10	129
ก.25 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 11	130
ก.26 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 11	130
ก.27 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 11	131
ก.28 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 11	131
ก.29 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 12	132
ก.30 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 12	132
ก.31 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 12	133
ก.32 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 12	133
ข.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับ เทอร์โมอิเล็กทริก (R_C) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1.....	134
ข.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียม กับต่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1	134
ข.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับ เทอร์โมอิเล็กทริก (R_C) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 2.....	135
ข.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียม กับต่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 2	135
ข.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับ เทอร์โมอิเล็กทริก (R_C) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 3.....	136
ข.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียม กับต่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 3	136
ข.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับ เทอร์โมอิเล็กทริก (R_C) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 4.....	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับ เทอร์โมอิเล็กทริก (R_C) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 13.....	146
ข.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียม กับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 13.....	146
ข.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลา การทดลองครั้งที่ 1.....	147
ข.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตาหุงต้มกับเวลา การทดลองครั้งที่ 1.....	147
ข.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบ กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1.....	148
ข.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลา การทดลองครั้งที่ 2.....	148
ข.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตาหุงต้มกับเวลา การทดลองครั้งที่ 2.....	149
ข.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบ กับเวลา การทดลองครั้งที่ 2.....	149
ข.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลา การทดลองครั้งที่ 3.....	150
ข.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตาหุงต้มกับเวลา การทดลองครั้งที่ 3.....	150
ข.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบ กับเวลา การทดลองครั้งที่ 3.....	151

บทที่ 1

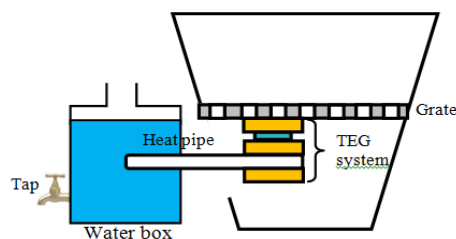
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาที่สำคัญของประชาชนในชนบทของประเทศกำลังพัฒนา คือ การขาดการเข้าถึงของระบบสายส่งไฟฟ้า [50,111] ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตของคนในชนบทเป็นอย่างมาก ดังนั้นหน่วยงานในภาครัฐและเอกชนจึงได้มีวิธีการที่จะพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทดแทน เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล เป็นต้น [28,67,77] แต่อย่างไรก็ตามในพื้นที่ชนบท เต่าหุงต้มเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในเกือบทุกครัวเรือน เนื่องจากนำมาใช้ในการประกอบอาหารเป็นประจำทุกวันและความร้อนที่เกิดจากการประกอบอาหารยังสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module) งานวิจัยหลายงานวิจัยศึกษาการนำความร้อนจากเต่าหุงต้มไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า [62,77,114] โดยที่ระบบมีการระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกจะมี 2 แบบ คือ การระบายความร้อนโดยใช้กลไกและการพึ่งพาเทคโนโลยี (active cooling) และวิธีธรรมชาติ (passive cooling) พบว่าจุดเด่นของการระบายความร้อนแบบแรก คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกสูงกว่าแบบธรรมชาติ แต่มีจุดด้อย คือ ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนระบบจึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้น้อยลง จากงานวิจัย Lertsatitthanakorn มีการใช้ความร้อนจากเต่าหุงต้มเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยนำระบบที่ออกแบบไปติดตั้งทางด้านข้างของผนังเต่า และมีการนำผนังเต่าบางส่วนออกไปผลการทดลองพบว่าได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2.4 วัตต์ เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ 150 °C [51] และจากงานวิจัย Rowe มีการทดสอบอุณหภูมิของเต่าหุงต้มพบว่าอยู่ในช่วง 150-300 °C เพื่อให้สามารถเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาใช้งานได้ [13] และประสิทธิภาพที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกไม่เกิน 5 % [24,35,65,91,112] จากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำความร้อนจากเต่าหุงต้มมาผลิตพลังงานไฟฟ้า แต่ประสิทธิภาพที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกยังค่อนข้างน้อย เนื่องจากความร้อนจากเต่าหุงต้มถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนได้

งานวิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเต่าหุงต้มไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 โดยมีเงื่อนไขและจุดประสงค์ในการออกแบบระบบ ได้แก่

1. การระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแบบธรรมชาติ
2. ระบบที่ออกแบบสามารถติดตั้งร่วมกับเต่าหุงต้มโดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของเต่า
3. พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด



เอกสารนี้รูปที่ 1.1 การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเต่าหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.1 แสดงแนวคิดในการออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน โดยจะนำระบบที่ออกแบบได้ดีที่ติดตั้งของเตาหุงต้ม จากนั้นเมื่อให้ความร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนมายังเทอร์โมอิเล็กทริกและระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนและน้ำ ซึ่งในการศึกษามีตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน 150-250 °C และปริมาตรของน้ำ 5-9 ลิตร ตัวแปรตาม คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และอุณหภูมิของน้ำ ดังนั้นในการทดสอบระบบจะใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology) ซึ่งวิธีการนี้เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการตรวจสอบตัวแปรที่ต้องการสนใจเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบมาประยุกต์ใช้กับเตาหุงต้ม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบโดยนำพลังงานเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มมาใช้ให้เกิดประโยชน์
2. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางด้านร้อน ปริมาตรของน้ำ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และอุณหภูมิของน้ำ
3. เพื่อหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ อุณหภูมิของน้ำ และประสิทธิภาพของระบบ
4. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบที่ออกแบบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน โดยใช้โปรแกรม Solid Work
2. ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค central composite design (CCD) โดยกำหนดเงื่อนไขอุณหภูมิทางด้านร้อนตั้งแต่ 150-250 °C และปริมาตรของน้ำ 5-9 ลิตร
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิคด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ทำการศึกษา
4. คำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบและประสิทธิภาพของระบบ
5. การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งระบบ
6. เปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน
- ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน
- ขั้นตอนที่ 3 สั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์สำหรับการสร้างระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนที่ 4 สร้างระบบที่ทำการออกแบบและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำ ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology)
- ขั้นตอนที่ 5 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยทำการวัดอุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ด้วยระบบจัดเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ
- ขั้นตอนที่ 6 วิเคราะห์อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพรวมของระบบ และความต้านทานระหว่างรอยต่อของแผงกับเทอร์โมอิเล็กทริก และอะลูมิเนียมกับฮีตไปป์
- ขั้นตอนที่ 7 ทดสอบการทำงานของระบบที่ติดกับเตาหุงต้ม
- ขั้นตอนที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบ
- ขั้นตอนที่ 9 สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน	ระยะปีที่ 1											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
1	←			→								
2				←			→					
3								←		→		
4											←	→
ขั้นตอน	ระยะปีที่ 2											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
5	←		→									
6			←		→							
7					←		→					
8							←		→			
9										←		→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบระบบระบายความร้อนได้และนำมาประยุกต์ใช้กับเตาหุงต้มได้
2. การนำระบบที่ออกแบบมาประยุกต์ใช้กับวิธีการทางสถิติเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ทำการศึกษา
3. ระบบที่ออกแบบสามารถนำไปใช้ในพื้นที่ชุมชนชนบท จึงทำให้งานวิจัยที่ออกแบบขึ้นเพื่อต้องการผลิตให้คนที่ไม่มีการใช้ไฟฟ้าและยังสามารถนำน้ำร้อนที่ได้จากระบบมาใช้ในครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมพื้นบ้าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้อธิบายท่อความร้อน การถ่ายเทความร้อน ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกและการประยุกต์ และการทบทวนวรรณกรรม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ประวัติและพัฒนาการของท่อความร้อน

การใช้งานของท่อความร้อน (Heat Pipe) จะต้องเข้าใจถึงลักษณะเฉพาะก่อน โดยเมื่อหลายสิบปีมาแล้วได้มีการสร้างและศึกษาท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่วไป (Conventional Heat Pipe) ซึ่งใช้วัสดุพอรุนเป็นอุปกรณ์ช่วยในการส่งของเหลวจากส่วนควบแน่นกลับสู่ส่วนทำระเหยและเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ซึ่งใช้แรงโน้มถ่วงของโลกช่วยในการส่งของเหลวจากส่วนควบแน่นกลับสู่ส่วนทำระเหย โดยท่อความร้อน 2 ชนิดนี้ถือว่าเป็นท่อความร้อนพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาและอ้างอิงกับท่อความร้อนชนิดต่างๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่องจนถึงยุคปัจจุบัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จากท่อความร้อนได้อย่างหลากหลาย และหากมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับท่อความร้อน 2 ชนิดนี้ก็จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการศึกษาท่อความร้อนชนิดอื่นๆ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาในยุคปัจจุบันนี้อย่างมากมายหลายชนิด เช่น ท่อความร้อนแบบหมุน ท่อความร้อนที่ใช้สนามไฟฟ้า ท่อความร้อนที่ใช้สนามแม่เหล็ก ท่อความร้อนแบบออสโมซิส และท่อความร้อนแบบสัน เป็นต้น

2.1.1 วิธีการส่งของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหย (Principle of Fluid Return to Evaporator)

ท่อความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่มีการนำความร้อนสูงมาก R.S. Gaugler (1942) เป็นคนแรกที่เสนอความคิดเกี่ยวกับท่อความร้อนและเป็นผู้ประดิษฐ์ท่อความร้อนจนนำมาใช้จริงได้ คือ G.M. Grover (1963) ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาคุณสมบัติอันโดดเด่นของท่อความร้อนก็เป็นที่รู้จักกันทั่วไปและได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้ ยังมีท่อความร้อนชนิดอื่นๆ อีกที่ของเหลวควบแน่นไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยวิธีอื่นๆ เช่น แรงคาพิลลารี แรงดึงดูด เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงวิธีที่จะทำให้ของเหลวไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยได้ ซึ่งถูกเรียบเรียงไว้โดยคณะของ Robert และอธิบายโดย Reay Jeyadeven และ Maydanik [36]

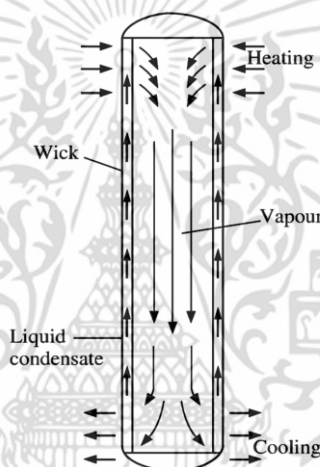
ตารางที่ 2.1 วิธีการส่งของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนชนิดต่างๆ

วิธีการส่งของเหลว	ชนิดของท่อความร้อน
แรงคาพิลลารี	ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่ว ๆ ไป
แรงดึงดูด	เทอร์โมไซฟอน

โดยท่อความร้อนชนิดต่างๆ ที่เสนอไว้ในตารางที่ 2.1 ได้อธิบายข้อดีและข้อเสียของท่อความร้อนชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1.2 ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่วไป (Conventional Heat Pipe)

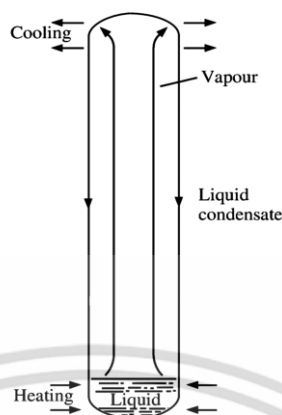
การทำงานของท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่วไป เติมสารทำงานจำนวนหนึ่งเข้าไปในท่อที่ได้มีการดูดเอาอากาศออกและปิดผนึกท่อไว้เป็นอย่างดี ให้ความร้อนที่ปลายด้านล่างของท่อจนของเหลวเดือดและระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปที่ยอดด้านบนที่เย็นกว่าและจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว ของเหลวควบแน่นจะไหลกลับสู่ปลายด้านล่างด้วยแรงคาพิลลารี (Capillary force) ที่เกิดจากวัสดุพรุน (Wick) เป็นตัวดึงให้ของเหลวไหลกลับสู่ด้านล่างร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ข้อดีของท่อความร้อนชนิดนี้ สามารถทำงานได้ในทุกตำแหน่ง เนื่องจากตำแหน่งของส่วนทำระเหยไม่ถูกจำกัดจะอยู่ในตำแหน่งใดก็ได้ หากอยู่ที่ตำแหน่งต่ำสุด แรงดึงดูดของโลกก็จะเป็นตัวเสริมแรงคาพิลลารี ข้อเสีย คือ เนื่องจากท่อความร้อนชนิดนี้ใช้แรงคาพิลลารีที่เกิดจากวัสดุพรุนช่วยส่งของเหลวในการควบแน่นกลับลงมาที่ส่วนทำระเหย จึงทำให้เกิดขีดจำกัดคาพิลลารีขึ้น



รูปที่ 2.1 ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทั่วไป (Reay and Kew, 2006) [37]

2.1.3 เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

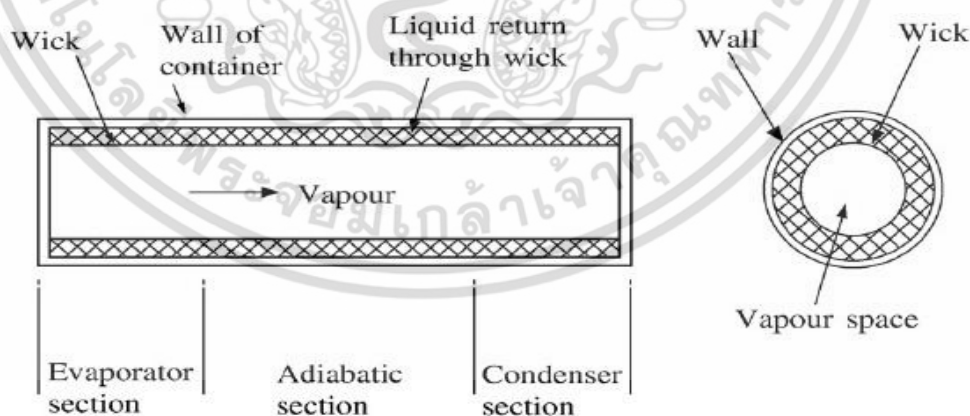
การทำงานของเทอร์โมไซฟอน เติมสารทำงานจำนวนหนึ่งเข้าไปในท่อที่ได้มีการดูดเอาอากาศออกและปิดผนึกท่อไว้เป็นอย่างดี ให้ความร้อนที่ปลายด้านล่างของท่อจนของเหลวเดือดและระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปที่ยอดด้านบนที่เย็นกว่า และจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว ของเหลวควบแน่นจะไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงดึงดูดของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ข้อดีของท่อความร้อนชนิดนี้ คือ สามารถส่งถ่ายความร้อนปริมาณมากจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย มีค่าการนำความร้อนสูงมาก สร้างง่าย (ในอดีตเทอร์โมไซฟอนจะถูกเรียกทั่วไปว่าท่อ Perkins) ไม่มีผลจากขีดจำกัดคาพิลลารี เนื่องจากท่อความร้อนชนิดนี้ไม่มีวัสดุพรุน ข้อเสีย คือ ไม่สามารถทำงานได้ในทุกตำแหน่ง เพราะของเหลวควบแน่นจะไหลกลับไปที่ยอดด้านบนได้ด้วยน้ำหนักของโลก ดังนั้นส่วนทำระเหยต้องอยู่ด้านล่างเท่านั้น



รูปที่ 2.2 เทอร์โมไซฟอน (Reay and Kew, 2006) [66]

2.1.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของท่อความร้อน (Structures and Characteristics of Heat pipe)

รูปที่ 2.3 แสดงรายละเอียดส่วนต่างๆ ที่สำคัญของท่อความร้อน พิจารณาในทิศทางตามความยาวแล้วท่อความร้อนจะประกอบด้วยส่วนทำระเหย (Evaporator) และส่วนควบแน่น (Condenser) บางครั้งอาจมีส่วนเพิ่มเติม ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนกันความร้อน (Adiabatic) โดยจะอยู่ระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ภาคตัดของท่อความร้อนดังรูปที่ 2.3(ข) จะประกอบด้วยผนังท่อบรรจุ (Container wall) วัสดุพรุนและช่องไอ (Vapor space) สมรรถนะของท่อความร้อนจะแสดงในพจน์ของค่าการนำความร้อนเทียบเท่า (Equivalent thermal conductivity) ท่อความร้อนที่เป็นทรงกระบอกดังรูปที่ 2.3(ก) ใช้ได้ในหลายกรณี แต่สำหรับในกรณีพิเศษก็สามารถสร้างท่อความร้อนรูปทรงอื่นๆ ได้เช่นกัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 ส่วนที่สำคัญของท่อความร้อน (Reay and Kew, 2006) [93]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 พัฒนาการของท่อความร้อน (Evolution of Heat Pipe)

Grover (1966) ได้สนใจที่จะปรับปรุงท่อความร้อนอุณหภูมิสูงที่ใช้โลหะเหลวเป็นสารทำงาน ซึ่งจะระบายความร้อนออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอุณหภูมิสูง เมื่อเขาตีพิมพ์งานนี้ออกมาแล้วก็ได้มีการพัฒนาท่อความร้อนที่ใช้โลหะเหลวเป็นสารทำงานมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหลังจากนั้นก็มีการพัฒนาท่อความร้อนสำหรับใช้สารทำงานที่เป็น อากาศ น้ำ แอมโมเนีย อะซิโตน แอลกอฮอล์ ไนโตรเจน และฮีเลียม ในเวลาเดียวกันก็มีการเผยแพร่ทฤษฎีของท่อความร้อนอย่างกว้างขวางมากขึ้น จากการสนับสนุนของ Cotter (1965) มีการนำท่อความร้อนไปใช้งานเพิ่มมากขึ้นเห็นได้จากจำนวนผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนที่มีจำนวนมาก โดยผลงานของ Cheung (1960) ถูกอ้างอิงจำนวน 80 ครั้ง ผลงานของ Chisholm (1971) ถูกอ้างอิงจากหนังสือจำนวน 149 ครั้ง จากนั้นก็เริ่มมีการจัดงานสัมมนาทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนขึ้นมา ซึ่งพอสรุปได้ ดังนี้

ค.ศ. 1976 มีการจัดงานสัมมนาทางวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนครั้งที่ 2 ขึ้น มีผลงานที่ถูกนำไปอ้างอิงทั้งหมดจำนวนเกิน 1000 ครั้ง

ค.ศ. 1978 การประชุมเสนอผลงานเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Palo California โดยมีผู้สนับสนุนคือ American Institute ซึ่งมีผลงานตีพิมพ์ 64 เรื่อง ผลงานที่น่าสนใจคือ ท่อความร้อนที่อาศัยแรงช่วยการทำงานจากแรงดึงดูด ซึ่งได้รับการสนใจอย่างมาก โดยการทำงานส่วนที่ระเหยจะอยู่ข้างล่างส่วนควบแน่น แต่จะยังคงโครงสร้างของวัสดุพรุนไว้อยู่ เรียกท่อความร้อนชนิดนี้ว่า Strictly Thermosyphon ที่ไม่อาศัยแรงคาพิลลารี

ค.ศ. 1981 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ London มีผลงานเข้าร่วม 70 เรื่อง ผลงานที่พิเศษคือ ท่อความร้อนที่ประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการนำไปใช้อนุรักษ์พลังงาน การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Stuttgart (1973 .1977) มีการสร้างอุปกรณ์มากมายที่นำเอาท่อความร้อนไปประยุกต์ใช้และนำไปใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในยานอวกาศ

ค.ศ. 1992 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ประเทศจีน ซึ่งประสบผลสำเร็จเป็นอย่างดี

ค.ศ. 1997 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Stuttgart มีการนำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับท่อความร้อนอย่างมากมาย

ค.ศ. 2002 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Moscow มีการนำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับท่อความร้อนอย่างมากมาย โดยมีผลงานเด่นเกี่ยวกับท่อความร้อนที่มีขนาดเล็ก

ค.ศ. 2003 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่เชียงใหม่ ซึ่งเป็นครั้งแรกของการจัดประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนของประเทศไทย โดยมีผลงานวิจัยที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน คือ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับท่อความร้อนชนิดสั้น

ค.ศ. 2004 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Shanghai China โดยมีผลงานวิจัยที่พัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนอย่างหลากหลายรูปแบบ

ค.ศ. 2006 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Kumamoto Japan โดยมีผลงานวิจัยที่พัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน คือ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารทำงานระดับอนุภาคนาโน

ค.ศ. 2008 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Malaysia โดยมีผลงานวิจัยที่พัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน คือ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานท่อความร้อนทุกชนิดกับงานทางด้านระบายความร้อนให้กับคอมพิวเตอร์และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ อย่างมากมาย

ค.ศ. 2011 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Taiwan โดยมีผลงานวิจัยที่ส่งเข้าร่วมงานสัมมนาครั้งนี้ 50 เรื่อง ในภาพรวมมีการพัฒนาท่อความร้อนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการประหยัดพลังงานและป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

ค.ศ. 2012 การประชุมสัมมนาวิชาการเกี่ยวกับท่อความร้อนที่ Beijing China มีการแบ่งกลุ่มงานวิจัยออกเป็น 8 กลุ่มย่อยโดยมีกลุ่มวิจัยย่อยที่เพิ่มขึ้นมาจากงานสัมมนาในปี ก่อนๆ คือกลุ่มวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบและประยุกต์ใช้งานท่อความร้อนสำหรับยานอวกาศ เช่น การควบคุมความร้อนในยานอวกาศ การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องบินความเร็วเหนือเสียง (temperature control of supersonic flights) เป็นต้น

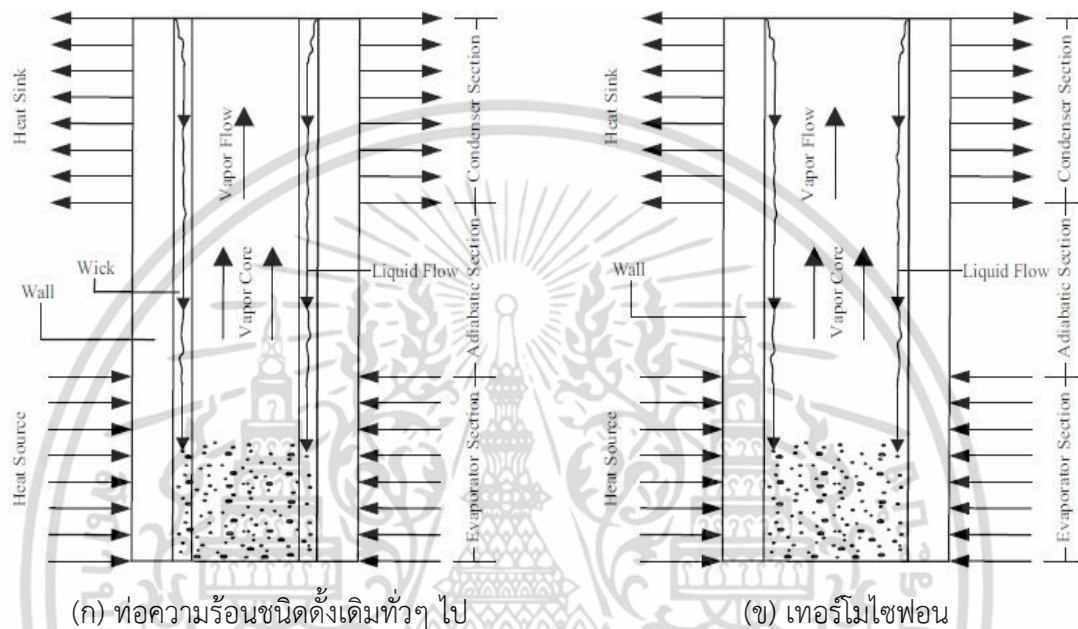
จากพัฒนาการของท่อความร้อนตามที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าการมุ่งเน้นวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีท่อความร้อนอยู่ 2 ด้าน คือ การวิจัยในด้านทฤษฎีพื้นฐานและในด้านประยุกต์ใช้งานท่อความร้อน โดยเน้นการวิจัยสำหรับท่อความร้อน 2 ชนิด คือ ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมต่างๆไป และเทอร์โมไซฟอน เพื่อนำหลักการทำงานของท่อความร้อนไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2 หลักการทำงานของท่อความร้อน (Principle Operation of Heat Pipe)

2.2.1 ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมต่างๆ ไปและเทอร์โมไซฟอน (Conventional Heat Pipe and Thermosyphon)

ท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมต่างๆ ไป เป็นอุปกรณ์ที่สามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการทำงานของท่อความร้อน แสดงไว้ในรูปที่ 2.4(ก) โดยท่อความร้อนจะถ่ายเทความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงานภายในท่อ โดยท่อความร้อนมีลักษณะเป็นท่อปลายปิดทั้งสองข้าง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator Section) เป็นส่วนที่สารทำงานได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อน (Heat Source) จากนั้นสารทำงานเกิดการเดือดแล้วระเหยกลายเป็นไอเคลื่อนที่ผ่านส่วนกันความร้อน (Adiabatic Section) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีกรถ่ายเทความร้อน จากนั้นไอจะเคลื่อนที่ต่อไปยังส่วนควบแน่น (Condenser Section) ซึ่งเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิไอทำให้ไอเกิดการควบแน่นและจะส่งถ่ายความร้อนแฝงจากการควบแน่นของไอให้กับแหล่งรับความร้อน (Heat Sink) จากนั้นของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นของไอจะไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยโดยผ่านบริเวณผนังท่อที่มีวัสดุพอรัน (Wick) ด้วยแรงคาพิลลารี ซึ่งแรงคาพิลลารี คือ แรงดึงชนิดหนึ่งที่ทำให้สารทำงานเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น โดยที่สารทำงานบางส่วนจะกลายเป็นไอเพื่อระบายความร้อน และไอความร้อนอีกส่วนจะควบแน่นเป็นของเหลว ของเหลวก็จะไปรับเอาความร้อน

จากแหล่งให้ความร้อนอีกครั้ง การทำงานของท่อความร้อนก็จะต่อเนื่องอย่างนี้ไปเรื่อยๆ หาได้จากสมการ (2.1) ส่วนการทำงานของเทอร์โมไซฟอนจะแตกต่างจากท่อความร้อนชนิดดั้งเดิมทุกๆ ไป คือ ของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นของไอจะไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง แสดงในรูปที่ 2.4(ข) ดังนั้นเทอร์โมไซฟอนจะไม่มีส่วนประกอบที่เป็นวัสดุพอรุนและส่วนทำระเหยจะต้องติดตั้งอยู่ด้านบนของส่วนควบแน่นเท่านั้น



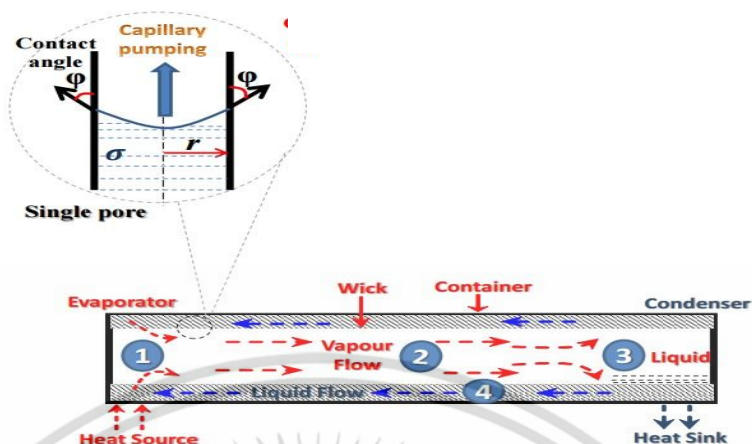
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของท่อความร้อน [38]

$$\text{แรงคาพิลลารี (Capillary force)} = \left(\frac{2\sigma \cos \varphi}{r} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ σ คือ แรงตึงผิว

φ คือ มุมที่วางท่อความร้อน

r คือ รัศมีของท่อความร้อน



รูปที่ 2.5 ลักษณะการวางของท่อความร้อน [25]

จากหลักการทำงานของท่อความร้อนที่กล่าวมาจะอธิบายเกี่ยวกับส่วนประกอบหลักๆ ของท่อความร้อนและวัสดุที่นำมาทำท่อความร้อน ซึ่งส่วนประกอบและวัสดุของท่อความร้อนเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง ถึงแม้ว่ามีการทดสอบพบว่าอายุการใช้งานของท่อความร้อนมีอายุการใช้งานสูงถึง 10 ปี ดังนั้นในการออกแบบและกรรมวิธีการผลิตท่อความร้อนจะมีวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นท่อบรรจุโดยมีส่วนประกอบพื้นฐานหลักๆของท่อความร้อน คือ สารทำงาน วัสดุพอร์ซ และวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นท่อบรรจุ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานหลักๆของท่อความร้อน

2.3.1 สารทำงาน (Working Fluid)

การเลือกใช้สารทำงานจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 โดยดูจากอุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนซึ่งอาจจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหลายๆอย่าง เช่น วัสดุที่ใช้ผลิตเป็นท่อบรรจุ ความร้อนที่สม่ำเสมอ ความดันไอที่ไม่ได้สูงหรือต่ำกว่าช่วงของอุณหภูมิทำงาน ค่าความร้อนแฝง ค่าการนำความร้อน ค่าความหนืดของของเหลว ค่าความหนืดของไอ ค่าความตึงผิว และจุดเยือกแข็งหรือจุดติดไฟ เป็นต้น

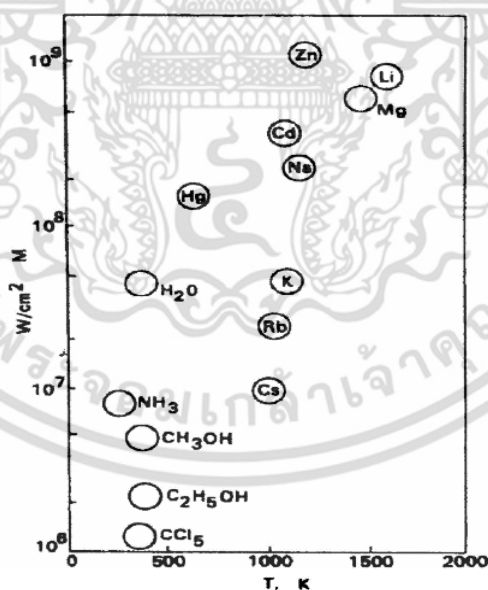
ตารางที่ 2.2 สารทำงานสำหรับท่อความร้อน [26]

สารทำงาน	จุดหลอมละลาย (°C)	จุดเดือดที่ความดันบรรยากาศ (°C)	ช่วงการใช้งาน (°C)
ฮีเลียม	-371	-361	-371 ถึง -369
ไนโตรเจน	-310	-196	-303 ถึง -160
แอมโมเนีย	-78	-33	-60 ถึง 100
เพนเทน	-130	38	-30 ถึง 130
อะซิโตน	-95	57	0 ถึง 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำงาน	จุดหลอมละลาย (°C)	จุดเดือดที่ความดันบรรยากาศ (°C)	ช่วงการใช้งาน (°C)
เอทานอล	-113	78	0 ถึง 130
เฮปเทน	-90	98	0 ถึง 150
น้ำ	0	100	30 ถึง 300
โทลูอีน	-95	110	50 ถึง 300
ปรอท	-39	361	350 ถึง 650
ซีเซียม	39	670	450 ถึง 900
โพแทสเซียม	63	774	500 ถึง 1000
โซเดียม	98	893	600 ถึง 1300
ลิเทียม	179	1340	1000 ถึง 1800

ในการเลือกสารทำงานนั้นจะอยู่ที่ค่าใช้จ่าย ความเหมาะสม และจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งนอกจากนี้ยังมีข้อมูลจากกราฟและตารางเพื่อใช้ประกอบการเลือกสารทำงานที่อยู่ในช่วงการทำงานปกติของ Merit number ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และสมการที่ (2.2) โดยค่าของ Merit number ที่สูงๆ ไม่ได้ใช้เป็นค่าในการเลือกสารทำงานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่อาจจะมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น ในด้านของค่าใช้จ่าย



รูปที่ 2.6 ค่า Merit number ของสารทำงานต่างๆ (David Reay and Peter Kew, 2006) [27]

$$M = \frac{\rho_l \sigma_l L}{\mu_l} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ p_c คือ ความหนาแน่นของสารทำงานที่อยู่ในสถานะของเหลว
 σ_c คือ แรงตึงผิว
 L คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
 μ_c คือ ความหนืดของสารทำงานที่อยู่ในสถานะของเหลวและค่า M ของสารทำงานต่างๆ จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

2.3.2 วัสดุพอรุน (Wick Structure)

2.3.2.1 โครงสร้างวัสดุพอรุนในคาพิลลารี (Capillary Wick Structures)

โครงสร้างวัสดุพอรุนในคาพิลลารีภายในท่อความร้อนจะทำหน้าที่เป็นเส้นทางให้ของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นไหลย้อนกลับจากส่วนควบแน่นไปยังส่วนทำระเหย เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนให้ได้มากที่สุด จะต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้แก่ รูปทรงเรขาคณิตของวัสดุพอรุนต้องมีความเหมาะสม รูของวัสดุพอรุนต้องมีขนาดเล็กพอ ส่วนมากวัสดุพอรุนจะครอบคลุมอยู่ภายในเส้นรอบวงของท่อความร้อนทุกส่วน ดังนั้นความร้อนจะผ่านเข้าไปยังท่อความร้อนได้ด้วยการนำความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนโดยความร้อนต้องไหลผ่านวัสดุพอรุนเข้าไปหาสารทำงานในแนวนอน เมื่อความร้อนไหลผ่านวัสดุพอรุน อุณหภูมิในแนวนอนจะต้องลดลงเล็กน้อยถึงจะทำให้สารทำงานเกิดการเดือดได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นวัสดุพอรุนต้องมีความบางและมีค่าการนำความร้อนสูง จากการพิจารณาี้รูของวัสดุพอรุนจะต้องเล็กลงมาก ดังนั้นกระบวนการออกแบบท่อความร้อนแบบมีวัสดุพอรุนจึงมีความยุ่งยากมาก เนื่องจากมีตัวแปรจำนวนมาก ซึ่งทั้งหมดจะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบให้เกิดความเหมาะสมที่สุด และวัสดุพอรุนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีดังต่อไปนี้

2.3.2.1.1 วัสดุพอรุนแบบผงโลหะที่เผา (Sintered metal wick)

เป็นวัสดุพอรุนที่ทำมาจากการเผาผงโลหะภายในผนังของท่อความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งผลของจุดเชื่อมต่อที่ใกล้กันระหว่างวัสดุพอรุน-ผนัง ทำให้มีแรงคาพิลลารีที่สูง แต่สารทำงานเข้าไปภายในวัสดุพอรุนแบบผงโลหะที่เผาได้น้อยจึงทำให้ระบายความร้อนได้ต่ำ (การซึมผ่านต่ำ) ส่งผลให้ของเหลวหรือสารทำงานเคลื่อนที่จากส่วนควบแน่นกลับมาทางส่วนทำระเหยได้มากขึ้น



รูปที่ 2.7 วัสดุพอรุนแบบผงโลหะ [3]

2.3.2.1.2 วัสดุพอรุนแบบร่องตามแนวแกน (Axial grooves wick)

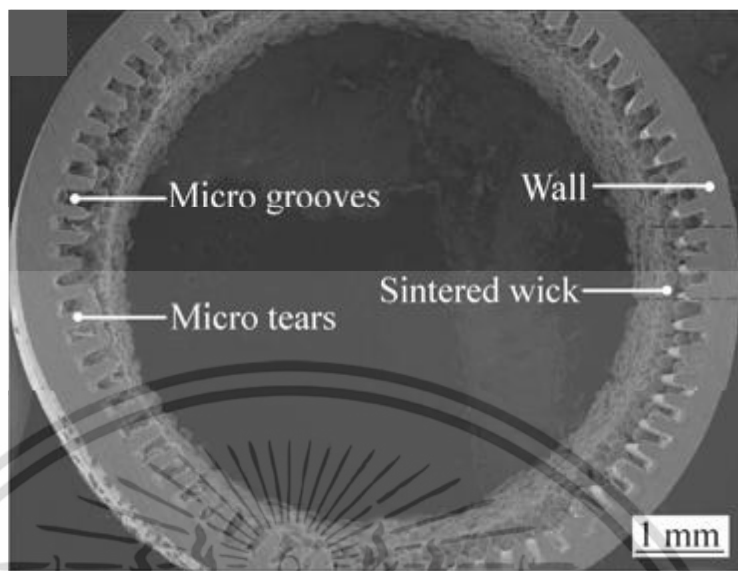
วัสดุพอรุนแบบร่องตามแนวแกนจะมีความสามารถในการซึมผ่านได้สูงมาก แล้วร่องยังทำหน้าที่เหมือนครีบบนการเชื่อมต่อโดยตรงกับการควบแน่น ดังนั้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุพอรุนแบบร่องตามแนวแกน ได้แก่ ปฏิกริยาของของเหลวกับไอและแรงคาพิลลารีที่ต่ำ ซึ่งเป็นผลให้ไม่สามารถทำงานร่วมกับแรงโน้มถ่วงได้ ดังนั้นค่าความจุของการส่งถ่ายความร้อนจะลดลง ความสามารถในการเคลื่อนที่ของวัสดุพอรุนแบบร่องตามแนวแกนจะมีน้อย เนื่องจากขนาดความกว้างของร่องมีขนาดค่อนข้างใหญ่ และความต้านทานในสนามแรงโน้มถ่วงจะทำให้สมรรถนะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนที่มีวัสดุพอรุนแบบร่องลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแรงคาพิลลารีต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วัสดุพอรุนแบบร่องตามแนวแกน [39]

2.3.2.1.3 วัสดุพอรุนแบบผงโลหะ-ร่องตามแนวแกน (grooved-sintered wick)

ในงานวิจัย [28] ได้มีการนำเสนอท่อความร้อนที่มีผงทองแดงเผาในร่องขนาดเล็กเพื่อปรับปรุงสมบัติของท่อความร้อนแบบผงโลหะและแก้ปัญหาดังกล่าวในหัวข้อ 2.3.2.1.1-2.3.2.1.2 ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นความแข็งแรงของพันธะระหว่างผนังด้านในและผงโลหะเนื่องจากวัสดุพอรุนแบบร่องตามแนวแกนสามารถเพิ่มพื้นที่ติดต่อกับพันธะได้ นอกจากนี้ วัสดุพอรุนแบบผงโลหะ-ร่องตามแนวแกนสามารถลดความต้านทานความร้อนได้เมื่อเทียบกับท่อความร้อนที่ผ่านการเผาโดยทั่วไปเมื่อน้ำตาหยดแทรกเข้าไปในไส้ตะเกียง



รูปที่ 2.9 วัสดุพูนแบบผงโลหะ-ร่องตามแนวแกน [4]

2.4 วิธีการเลือกท่อความร้อน

2.4.1 กำหนดและตรวจสอบตัวแปรที่ใช้ในการดำเนินงาน

2.4.1.1 ภาระทางความร้อน (heat load) และรูปทรงของแหล่งจ่ายความร้อน

2.4.1.2 ในการวางตัวระบายความร้อนจะเกี่ยวกับระยะทางและแนวในการวางจะเทียบกับตัวแหล่งจ่ายความร้อน

2.4.1.3 ข้อมูลของอุณหภูมิที่จ่ายให้กับแหล่งความร้อนและตัวระบายความร้อน

2.4.2 การเลือกวัสดุของท่อความร้อน โครงสร้างของท่อความร้อน

โครงสร้างของท่อความร้อนจะมีโครงสร้างที่เรียกว่าวิกและสารทำงาน ในการผลิตท่อความร้อนนั้นเป็นนักวิศวกรชื่อ Enertron ซึ่งเป็นต้นฉบับในการเลือกท่อความร้อนมาใช้งาน [53]

2.4.2.1 ตรวจสอบสารทำงานที่ใช้ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

2.4.2.2 เลือกวัสดุท่อความร้อนให้เข้ากับสารทำงาน

2.4.2.3 เลือกโครงสร้างของวิกและการวางแนวของท่อความร้อนที่ใช้ในการดำเนินงาน

2.4.2.4 มีการป้องกันที่มีสารเคลือบผิว

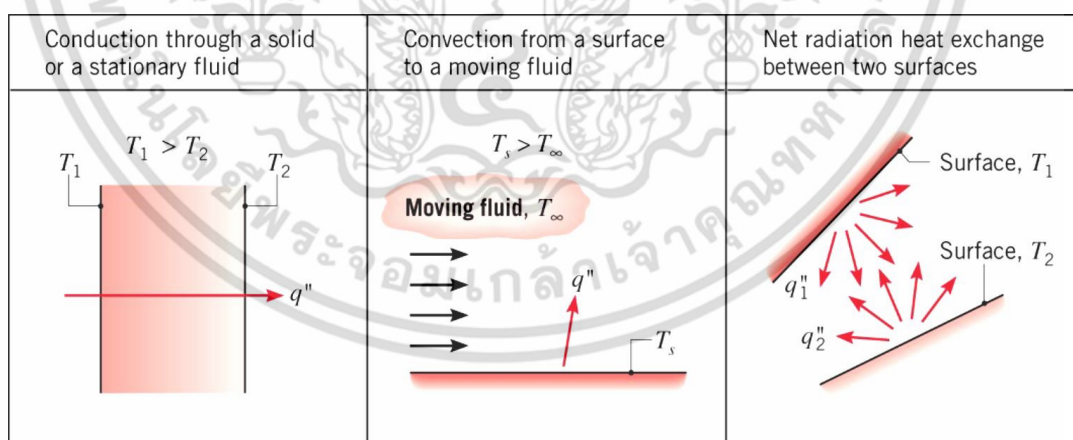
2.4.3 กำหนดขนาดของความยาวและรูปร่างของท่อความร้อน

2.5 การถ่ายเทความร้อน [30]

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้น พื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนคือ “ความแตกต่างของอุณหภูมิ” (Temperature different) ถ้าตัวกลางสองตัวมีอุณหภูมิเท่ากันจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิจึงเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) เพื่อให้เกิดการถ่ายเทนั่นเอง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ความลาดชันของอุณหภูมิ หมายถึง ความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว หรืออัตราการลดลงของอุณหภูมินั่นเอง สมการพื้นฐานสำหรับกระบวนการถ่ายโอนต่าง ๆ คือ

$$\text{Rate of a transfer process} = \text{Driving force} / \text{Resistance} \quad (2.3)$$

รูปที่ 2.10 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ เมื่อมีเกรเดียนต์อุณหภูมิ (Temperature Gradient) เกิดขึ้นในตัวกลางที่อยู่นิ่ง เช่น ของแข็ง หรือของไหล เหมอมของการนำความร้อน (Conduction) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อน (Convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสภาวะที่ปราศจากตัวกลางใดๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้ ดังนั้นการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่สมบูรณ์แบบ จำเป็นจะต้องทราบถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในลำดับต่อไป



รูปที่ 2.10 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี [5]

2.5.1 สภาวะสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอ (Steady state and Unsteady state)

สภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) หมายความว่า อุณหภูมิที่จุดๆ หนึ่งในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา หรืออาจเขียนอยู่ในรูปสมการได้ว่า $\partial T / \partial t$ สภาวะสม่ำเสมอจะเกิดขึ้นในกรณีที่วัตถุได้รับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายเทความร้อนมาเป็นเวลานานพอสมควร จนอุณหภูมิในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าเราจะถ่ายเทความร้อนให้วัตถุไปอีกนานเท่าใด

สภาวะสม่ำเสมอ ซึ่งมีความหมายว่าอุณหภูมิที่จุดหนึ่งจุดใดในตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เมื่อพิจารณาให้ดีจะเห็นว่า หากเกิดสภาวะสม่ำเสมอแล้วอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนที่จุดใดๆ ในทิศทางของการเคลื่อนที่จะมีค่าเท่ากัน แสดงว่า ถ้าความร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางของ X อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนจะไม่เปลี่ยนแปลงกับ X ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ปริมาตรควบคุม (Control volume) ที่บางมากที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน สมมติว่าจุดที่พิจารณาอยู่ในปริมาตรควบคุมนี้ หากจุดๆ นั้นมีอุณหภูมิคงที่ก็หมายความว่า ปริมาตรควบคุมไม่ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น แสดงว่า ความร้อนที่เคลื่อนที่เข้าปริมาตรควบคุมจะเท่ากับความร้อนที่ออกจากปริมาตรควบคุม หากพิจารณาอย่างเดียวกันนี้กับปริมาตรควบคุมอื่นที่วางเรียงต่อเนื่องกันในทิศทาง X แสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนนี้ไม่เปลี่ยนแปลงกับ X

สภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady state หรือ Transient state) หมายความว่า อุณหภูมิที่จุด ๆ หนึ่งในวัตถุยังเปลี่ยนแปลงอยู่ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป หรืออาจเขียนในรูปสมการ $\partial T / \partial t \neq 0$ สภาวะไม่สม่ำเสมอเกิดเมื่อตอนที่เราริเริ่มถ่ายเทความร้อนให้แก่วัตถุ อุณหภูมิของวัตถุยังไม่คงที่ ยังคงเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

2.5.2 การนำความร้อน (Conduction heat transfer) [30]

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่เนื่องจากการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและแก๊ส แต่สำหรับในของแข็งทึบแสงจะไม่มี การเคลื่อนไหวภายในวัสดุจะมีแต่การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) dT/dx คูณกับพื้นที่ A ที่ความร้อนไหลผ่าน ดังสมการ (2.4), (2.5) และ (2.6)

$$\text{Rate of conduction} = (\text{area}) \times (\text{Temperature difference}) / (\text{Thickness}) \quad (2.4)$$

$$q_{\text{cond}} \propto A \times \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ q_{cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Wall or J/s)

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)

T คือ อุณหภูมิ (K)

X คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

ความสามารถในการนำความร้อนของสารวัดด้วยปริมาณที่เรียกว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือใช้ตัวอักษรย่อว่า k มีหน่วยเป็น $W/m \cdot K$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_{\text{cond}} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) คือ กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางขวามือของสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่า ความร้อนสำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อนไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิจะต้องลดลงเมื่อระยะทาง X เพิ่มมากขึ้น จึงมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกหรือมีค่าเป็นบวก จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวาของสมการ สมการ (2.6) เป็นสมการที่ใช้สำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อน (k) อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง ความหนา และวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง

ค่าการนำความร้อน k เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของเหลว ของแข็ง และแก๊ส ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำๆ ของแก๊สไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัสดุจะแปรตามอุณหภูมิ แต่การนำไปใช้งานในด้านการปฏิบัตินั้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิจำเพาะ สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่า k สูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารอโลหะ ก็จะมีค่า k ต่ำ ค่า k จึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมากในการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้น สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของสารต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบจากค่า k ของสารเหล่านั้น โดยสารที่มีค่า k สูง จะเรียกว่า สารตัวนำ (conductor) และสารที่มีค่า k ต่ำ จะเรียกว่า ฉนวน (insulator) ตัวอย่างค่า k ของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ สำหรับค่าการนำความร้อนของวัสดุและของแก๊สอื่น ๆ

ตารางที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ (Kreith) [5]

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)
โลหะบริสุทธิ์	35-430
โลหะผสม	20-200
โลหะเหลว	9-90
วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)
ของเหลว (อโลหะ)	0.2-2.0
ของแข็ง (อโลหะ)	0.02-20
ฉนวน	0.02-0.40
ก๊าซ	0.002-0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนในผนังราบ (Conduction in plane walls)

จากสมการดุลพลังงานทั่วไป เขียนได้ดังสมการที่ (2.7)

$$q_{in} - q_{out} + q_{gen} = \left(\frac{dE_{wall}}{dt} \right) \quad (2.7)$$

- สภาวะสม่ำเสมอ : $(dE_{wall} / dt) = 0$
- สภาวะชั่วคราว , ไม่มีความร้อน : $q_{gen} = 0$
- สภาวะสม่ำเสมอ , ไม่มีความร้อน : $q_{in} = q_{out} = q_{cond}$

สำหรับการนำความร้อนมิติเดียวที่สภาวะ Steady state จะใช้ Fourier's law ในการอธิบาย ดังสมการ (2.8)



รูปที่ 2.11 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังราบชั้นเดียว

$$q_{cond,wall} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.8)$$

สมการการนำความร้อนผ่านผนังราบชั้นเดียวเมื่อคิดว่า k และ A เป็นค่าคงที่ และมีเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) คือ $T = T_1$ ที่ $X = 0$ และ $T = T_2$ ที่ $X = L$ เป็นดังนี้

$$\int_{x=0}^L q_{cond,wall} dx = - \int_{T_1}^{T_2} kAdT$$

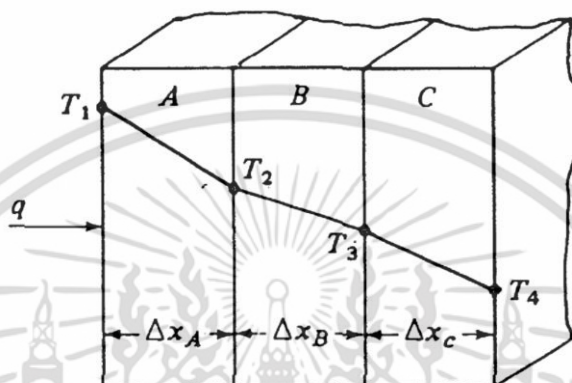
$$q_{cond,wall} = kA / \Delta x (T_1 - T_2) = (T_1 - T_2) kA / \Delta x \quad (2.9)$$

เมื่อ $R = \Delta x / kA$ มีหน่วยเป็น K/W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนผ่านผนังราบที่ต่อแบบอนุกรม (plane wall in series)

ความร้อนไหลผ่านผนังที่ซ้อนกันหลายชั้นโดยการนำความร้อนดังรูปที่ 2.12 เช่น ผนังของอาคาร บ้านเรือน การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนก็จะยากยิ่งขึ้น ในกรณีที่สภาวะต่าง ๆ คงที่ อัตราความร้อนที่ไหลผ่านแต่ละชั้นของผนังจะมีค่าเท่ากัน ทั่วทั้งที่ความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน ในกรณีนั้นอัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นเป็นดังสมการที่ (2.10)



รูปที่ 2.12 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นต่อแบบอนุกรม

$$q_{\text{cond,wall}} = -\frac{k_A A (T_2 - T_1)}{\Delta x_A} = -\frac{k_B A (T_3 - T_2)}{\Delta x_B} = -k_C A (T_4 - T_3) / \Delta x_C \quad (2.10)$$

รวมสมการทั้งสามเข้าด้วยกัน และกำจัด T_2 และ T_3 จะได้ตามสมการที่ (2.11)

$$q_{\text{cond,wall}} = (T_1 - T_4) / (\Delta x_A / k_A A) + (\Delta x_B / k_B A) + (\Delta x_C / k_C A) = (T_1 - T_4) / (R_A + R_B + R_C) \quad (2.11)$$

เมื่อ $R_A = \Delta x_A / k_A A$, $R_B = \Delta x_B / k_B A$ และ $R_C = \Delta x_C / k_C A$

2.5.3 การพาความร้อน (Convection heat transfer) [31]

การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือการพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาความร้อนได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล การพาความร้อนยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) และการพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ (2.12) ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

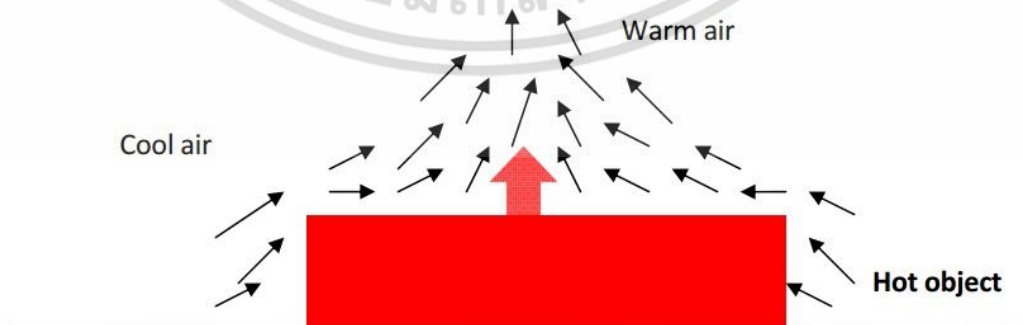
$$q = h(T_h - T_c) \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) เป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนในกรณีทั่วไป ปริมาณที่สำคัญที่สุดในสมการนี้ คือ h (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน)

ค่าของ h จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ จะเห็นว่า มีปริมาณต่างๆมากมายที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อน เช่น ลักษณะการวางตัวของพื้นผิว ความเร็วของของไหล (ในกรณีการพาความร้อนโดยการบังคับ) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวและของไหล (ในกรณีของการพาความร้อนตามธรรมชาติ) เพราะปริมาณนี้จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลขึ้น คุณสมบัติต่างๆของของไหล เช่น ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) ค่าการนำความร้อน (k) ความร้อนจำเพาะ (C_p) เป็นต้น การจะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ จะต้องรู้ในแต่ละปริมาณที่กล่าวมา มีอิทธิพลต่อค่า h อย่างไร ซึ่งวิธีการคำนวณค่า h จึงเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน การจะหาสมการต่างๆไป สำหรับคำนวณ h ให้ใช้ได้ทุกกรณีจึงทำได้ จุดมุ่งหมายสำคัญของการศึกษาเรื่องการพาความร้อนสำหรับวิศวกร คือ การหาวิธีที่จะคำนวณค่า h ในกรณีที่สำคัญๆ ซึ่งพบกันบ่อยๆในทางวิศวกรรมศาสตร์

2.5.3.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or free convection) [6]

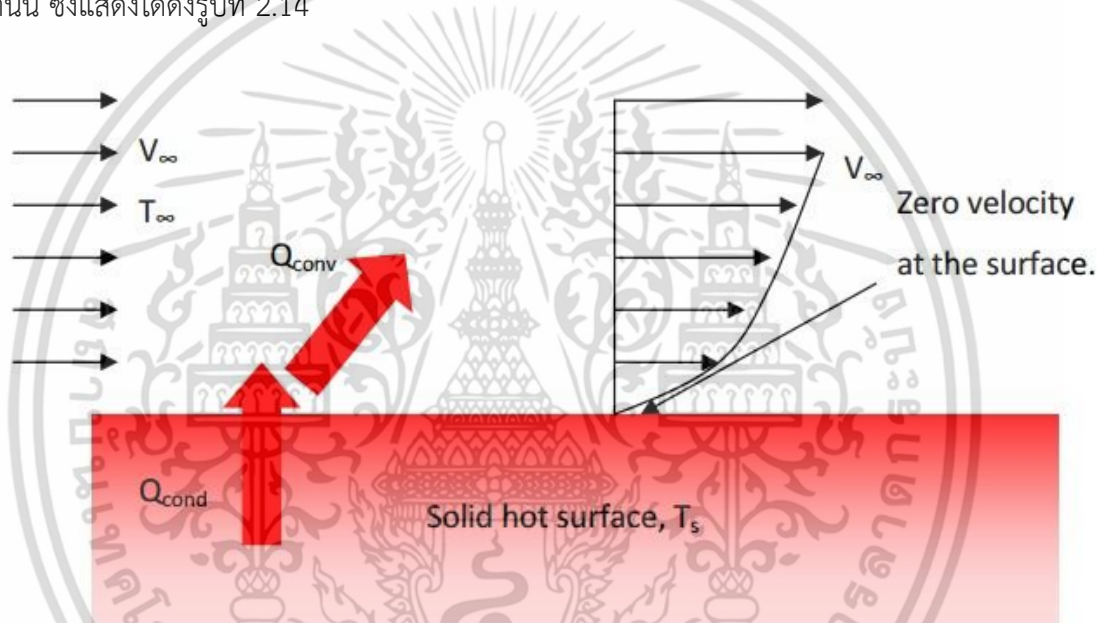
คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอกวัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่หนึ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่ชิดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ชิดผนังต่ำลงซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้นของไหลที่อยู่ต่ำกว่าก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณต่างๆหลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่างๆของของไหล ขนาดและลักษณะของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสารก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย ถ้าจะหาสมการมาใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่ยากมาก และทำได้ในกรณีง่ายๆ บางกรณีเท่านั้น สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการพาตามธรรมชาติส่วนมากแล้วได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ [6]

2.5.3.2 การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) [6]

เกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือสูบน้ำ เมื่อของไหลมีความเร็ว เราจะต้องทราบกลไกในการเคลื่อนที่ของของไหลก่อน โดยปกติเราจะแบ่งการไหลของของไหลเป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งของไหลไหลเป็นชั้นๆ ขนานกับความเร็วยังคงเท่ากัน การถ่ายเทความร้อนจะถ่ายเทจากผิวของของแข็ง โดยการนำ และถ่ายเทต่อ ๆ กันไปในของไหลโดยการนำผ่านชั้นของของไหล ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีการเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหล ด้วย การเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่ จะเกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อนมาแล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น ดังนั้นยิ่งการไหลแบบปั่นป่วนมากเท่าใด การเคลื่อนที่ของความร้อนจะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การพาความร้อนโดยการบังคับ [6]

2.5.3.3 การพาความร้อนภายนอก (External convection heat transfer) [6]

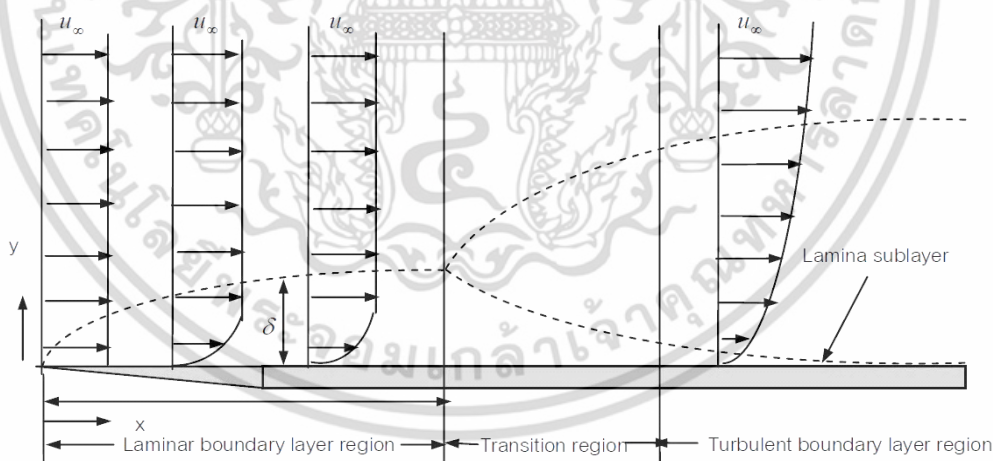
การพาความร้อนภายนอกเกิดจากของไหลเป็นสารตัวกลาง โดยของไหลไม่ได้ถูกจำกัดให้ไหลในบริเวณที่กำหนด แต่เป็นการไหลผ่านผิวนอกของของแข็ง เช่นการไหลผ่านผนังราบ การไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอก การไหลของของไหลมากระทบกับของแข็งรูปร่างลักษณะต่างๆ ในทิศทางใดก็ได้ การพิจารณาไหลของของไหลผ่านผนังราบดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า การที่มีผนังอยู่ในของไหลทำให้ความเร็วของของไหลส่วนที่อยู่ใกล้กับผนังเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาแล้วอาจจะแบ่งของไหลออกเป็นสองบริเวณ บริเวณแรกอยู่ใกล้กับผนัง เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการที่ผนังราบมาอยู่ในของไหล ทำให้ความเร็วของของไหลในบริเวณนี้เปลี่ยนแปลงไป บริเวณที่สองเป็นบริเวณที่ของไหลไม่ได้รับอิทธิพลจากผนังราบ

ของไหลบริเวณแรกซึ่งได้รับอิทธิพลจากผนังนั้น เรียกกันว่า บาวดารีแลเยอร์ (Boundary layer) จะเห็นจากรูปที่ 2.15 ว่าความเร็วของของไหลที่ผิวของผนังนี้มีค่าเป็นศูนย์ แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับความเร็วของของไหลภายนอก บาวดารีแลเยอร์ (u_∞) หรือที่เรียกว่า ความเร็วของฟรีสตรีม (Free-stream velocity) จะเห็นได้ว่า บาวดารีแลเยอร์เกิดขึ้น ที่ปลายของผนังแล้วค่อยๆ มีความหนาเพิ่มขึ้นไปตามทิศทางของการไหลของของไหล ในช่วงแรก บาวดารีแลเยอร์จะเป็นแบบลามินาร์ เมื่อบาวดารีแลเยอร์มีความหนาเพิ่มขึ้น ถึงจุดๆหนึ่ง การไหลจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนและบาวดารีแลเยอร์จะค่อยๆเปลี่ยนไปเป็นเทอร์บูเลนต์บาวดารีแลเยอร์ (Turbulent boundary layer) การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป ในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้การไหลจะเป็นแบบราบเรียบและปั่นป่วนผสมกันบริเวณนี้เรียกว่า ทรานซิชันโซน (Transition zone) ถึงแม้ว่าการไหลจะเปลี่ยนจากราบเรียบเป็นปั่นป่วนแล้ว การไหลในชั้นบางๆ ของของไหลส่วนที่อยู่ติดกับผนังก็ยังเป็นแบบราบเรียบอยู่ บริเวณนี้มีชื่อเรียกว่า ลามินาร์ซับแลเยอร์ (Laminar sublayer)

ในเชิงของความเร็วจึงกล่าวได้ว่า บาวดารีแลเยอร์ คือบริเวณของของไหลที่ค่าของ du/dy ไม่เท่ากับศูนย์ ในกรณีนี้ ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) หรือแรงที่ของไหลกระทำที่ผิวของผนังต่อหน่วยพื้นที่ ในกรณีนี้การไหลในบาวดารีแลเยอร์เป็นแบบราบเรียบ ให้ได้โดยสมการ (2.13)

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \text{ เมื่อ } y = 0 \quad (2.13)$$

โดยที่ μ คือ ความหนืด (Dynamic viscosity) ของของไหล



รูปที่ 2.15 การไหลขนานกับผนังราบ [31]

เนื่องจากการไหลแบบราบเรียบคือการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่เป็นชั้นๆ ไม่มีการเคลื่อนไหวของอนุภาคของไหลในทิศทางอื่นนอกจากทิศทางของการไหลๆ การถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของบาวดารีแลเยอร์ และตั้งฉากกับผนังในกรณีของลามินาร์บาวดารีแลเยอร์ จึงเป็นการเคลื่อนที่แบบการนำความร้อน ซึ่งเขียนได้ดังสมการ (2.14)

$$Q = Q / A = -k(dT / dy) \quad (2.14)$$

จะเห็นได้ว่า เมื่อการไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบ ความเค้นและอัตราการถ่ายเทความร้อนคำนวณได้จากสมการที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในสมการที่ (2.13) และ (2.14) เมื่อการไหลของของไหลเปลี่ยนไปเป็นแบบปั่นป่วนแล้ว จะมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในทิศทางอื่นนอกจากทิศทางของการไหล การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น และสมการที่ (2.14) จะใช้ในการคำนวณค่าของการถ่ายเทความร้อนไม่ได้ เพราะการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ไม่ได้เป็นไปโดยวิธีการนำความร้อนอย่างเดียว ในทำนองเดียวกัน ความเค้นก็ไม่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13) เช่นเดียวกัน หากการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ถึงแม้ว่าตัวแปรจะเปลี่ยนจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน แต่ของไหลชั้นบางๆ ที่อยู่ติดกับผนังซึ่งเรียกว่า ลามินาร์สับแลเยอร์นั้น ยังมีลักษณะชั้นเป็นแบบลามินาร์บาวดาร์แลเยอร์อยู่ ดังนั้น สำหรับชั้นบางๆนี้ (2.13) และ (2.14) ยังใช้คำนวณค่าความเค้นและการถ่ายเทความร้อนได้จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่า มีบาวดาร์แลเยอร์อยู่สามแบบ คือ แบบลามินาร์ เทอร์บูแลนต์ และ ทรานซิชั่น ปริมาณที่มีความสำคัญมากในการที่จะกำหนดว่า บาวดาร์แลเยอร์จะเป็นแบบไหน คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.15) ดังต่อไปนี้

$$Re = u_{\infty} x / \nu \quad (2.15)$$

โดยที่ x คือ ระยะทางที่วัดจากปลายของผนังไปตามทิศทางการไหลของของไหลได้มีการกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับบาวดาร์แลเยอร์แบบต่างๆ ในกรณีของการไหลขนานกับผนังราบไว้ดังนี้

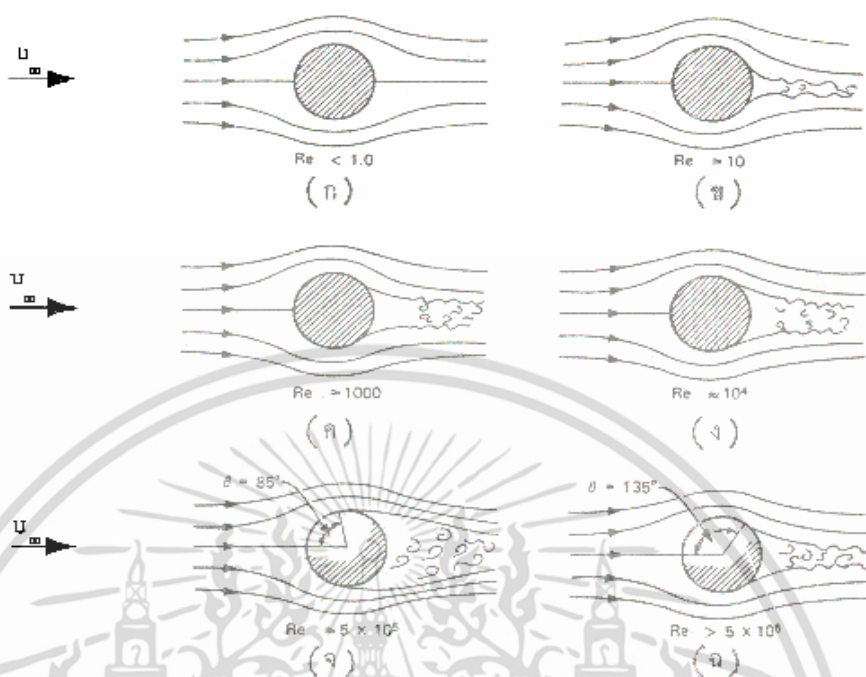
$$\text{บาวดาร์แลเยอร์แบบลามินาร์ } 0 < Re < 5 \times 10^5$$

$$\text{บาวดาร์แลเยอร์แบบทรานซิชั่น } 5 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$$

$$\text{บาวดาร์แลเยอร์แบบเทอร์บูแลนต์ } Re > 5 \times 10^6$$

หากผิวของผนังหยาบมาก บาวดาร์แลเยอร์แบบลามินาร์จะเริ่มเปลี่ยนเป็นแบบทรานซิชั่นที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำกว่า 5×10^5 และบางครั้งบาวดาร์แลเยอร์หยุดเป็นแบบลามินาร์ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำลงถึง 10^5

ในกรณีของการไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอก ในรูปที่ 2.16 นั้น จะเห็นได้ว่า วัตถุมีอิทธิพลต่อการไหลของของไหลค่อนข้างมาก ลักษณะการไหลของของไหลขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลหรือค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งคำนวณโดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อเป็นความยาวดังสมการที่ (2.16)



รูปที่ 2.16 การไหลตั้งฉากกับท่อกลม (นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย, [7])

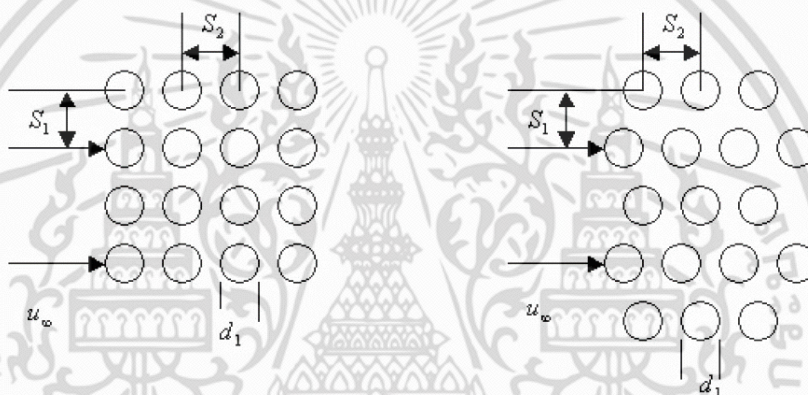
$$Re = U_{\infty} d_0 / \nu \quad (2.16)$$

จะเห็นได้ว่า ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำมากๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) ของไหลเกาะผิวของผนังท่อโดยรอบจุดหน้าสุดของวงกลมที่สัมผัสกับของไหลเป็นจุดที่ของไหลหยุดนิ่ง (Stagnation point) จุดที่อยู่ตรงกันข้ามกับจุดๆนี้ ซึ่งอยู่ด้านหลังก็เป็นจุดซึ่งของไหลนิ่งเช่นเดียวกัน เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้น บาวดาร์แลเยอร์เริ่มแยกตัวออกจากผิวของท่อที่บริเวณจุดที่ของไหลหยุดนิ่งทางด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข) และแยกตัวมากขึ้นเรื่อยๆ และบริเวณที่ของไหลแยกตัวเริ่มเคลื่อนที่มาทางด้านหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ค) และ (ง) ในกรณีนี้การไหลที่แยกตัวออกการไหลเป็นแบบปั่นป่วนบริเวณที่ของไหลแยกตัวออกนี้ อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ทิศทางต่างๆกันและผสมกันอย่างรุนแรงบริเวณนี้มีชื่อเรียกว่า เทอร์บูเลนต์ เวค (Turbulent wake) บริเวณการแยกตัวจะใหญ่ขึ้น และเคลื่อนที่มาข้างหน้าเรื่อยๆ ในขณะที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น บริเวณนี้จะใหญ่ที่สุดเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า 5×10^5 และหลังจากนั้นก็จะมีขนาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (จ) และ (ฉ)

สำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้น ได้พบว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวของท่อกับของไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงความเร็วของของไหลที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้ก็เพราะว่า เมื่อลักษณะการไหลของของไหลเป็นแบบปั่นป่วน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจะมีค่าสูงกว่า เมื่อการไหลเป็นแบบราบเรียบ เพราะอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไปในทิศต่างๆ และผสมกันอย่างรุนแรง

2.5.3.4 การพาความร้อนโดยการไหลผ่านกลุ่มท่อ [54]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนมากจะประกอบด้วยท่อหลายท่อวางเรียงกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเรียกกันว่ากลุ่มท่อ การเรียงท่อจะมีอยู่สองแบบ คือ การเรียงท่อที่อยู่ในแนวเดียวกัน และการเรียงสลับ แสดงดังรูปที่ 2.17 สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีนี้ นั้น จะใช้สมการที่หามาได้สำหรับท่อเดี่ยวไม่ได้เพราะ การไหลของของไหลซึ่งมีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้น แตกต่างไปจากกรณีของการไหลผ่านท่อเดี่ยวมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งท่อที่อยู่ในแถวหลังๆ จากการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนของท่อที่อยู่ในแถวท้ายๆ จะมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนในแถวต้นๆ ทั้งนี้เพราะความปั่นป่วน (Degree of turbulence) ของของไหลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อของไหลยิ่งไหลผ่านท่อมากแถวขึ้น และความปั่นป่วนนี้มีส่วนในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน



รูปที่ 2.17 การเรียงท่อแบบแนวเดียว และการเรียงแบบสลับ [54]

สำหรับสมการที่จะใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้น จากการทดลองได้พบว่ามีสมการในรูปต่อไปนี้ ใช้ได้ผลคือ สมการที่เสนอโดย Grimson ซึ่งให้ไว้ใน Incropera and Dewitt [54] ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\overline{N_u} = 1.13 D Re_{max}^P Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

ค่าของ D และ P ในสมการที่ (2.17) จะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางท่อ และเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (S_1 , S_2 และ d) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ของ D และ P ให้ไว้ในตารางที่ 2.4 โดยที่

\overline{Nu} คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเบอร์

D คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองสำหรับใช้กับสมการที่ (2.17)

P คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองสำหรับใช้กับสมการที่ (2.17)

S_1 คือ ค่าระยะห่างของท่อในแนวตั้ง, m

S_2 คือ ค่าระยะห่างของท่อในแนวนอน, m

d คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.17) ใช้ได้ในกรณีที่กลุ่มท่อมีมากกว่า 10 แถว หากกลุ่มท่อน้อยกว่า 10 แถว ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยเฉลี่ย จะมีค่าต่ำกว่าที่ให้ในสมการที่ (2.17) หากกลุ่มท่อมี 4 แถว ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ให้ประมาณ 12 % โดยที่แถวแรกจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนเท่ากับในกรณีของท่อเดี่ยว จากการศึกษพบว่า ในกรณีของการเรียงสลับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นจนถึงแถวที่ 5 หรือ 6 แล้วจะมีค่าคงที่การคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของกลุ่มท่อกับของไหล เราอาจทำได้โดยใช้สมการที่ (2.18) ซึ่งเสนอโดย Jakob and Hawkins [55] ซึ่งให้ค่าโดยประมาณ

$$\overline{N_u} = 0.33 \text{Re}_{\max}^{0.6} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (2.18)$$

ในสมการที่ (2.18) ค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์คำนวณได้โดยใช้ความเร็วของของไหล ตอนที่ผ่านพื้นที่ระหว่างท่อที่มีค่าต่ำสุด (ก็คือความเร็วสูงสุด) สำหรับคุณลักษณะของของไหลนั้น หาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผนังท่อ และอุณหภูมิของของไหล

ตารางที่ 2.4 ค่าของ D และ P สำหรับใช้ในสมการที่ (2.17) (Ozisik, [68])

การจัดท่อ	s_2/d	S_2/d							
		1.25		1.50		2.0		3.0	
		P	D	P	D	P	D	P	D
เรียงในแนวเดียวกัน (Inline)	1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
	1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.202	0.0678	0.744
	2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.1980	0.648
	3.00	0.290	0.610	0.357	0.584	0.374	0.581	0.2860	0.608
เรียงสลับ (Staggered)	0.6	-	-	-	-	-	-	0.213	0.636
	0.9	-	-	-	-	0.446	0.571	0.401	0.521
	1.0	-	-	0.497	0.558	-	-	-	-
	1.12	-	-	-	-	0.478	0.565	0.518	0.560
	5	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
	1.5	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
	2.00	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
	2.50	0.310	0.592	0.756	0.580	0.442	0.562	0.421	0.574
3.00									

2.5.4 การแผ่รังสี (Radiation) [5]

การแผ่รังสีความร้อน คือการที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน โดยวัตถุนั้นอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ก็ได้ พลังงานของสนามการแผ่รังสีมีการถ่ายเทโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่า โฟตอน (Photons) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาความร้อนจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท แต่การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลางใดๆ และจะเกิดการถ่ายเทได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ สำหรับวิศวกรวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่โดยการแผ่รังสี อาจไม่มีความสำคัญเท่ากับที่จะรู้วิธีการคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการแผ่รังสี ในปี 1884 สตีเฟน และ โบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุดโดยการแผ่รังสีจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิ T ดังสมการที่ (2.19)

$$q_r = \sigma AT^4 \quad (2.19)$$

โดยที่ q_r คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (W) , σ คือ ค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ในระบบ SI , A คือ พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (m^2) และ T คือ อุณหภูมิของผิวที่แผ่รังสีความร้อน (K) สมการ (2.19) นี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือต่าง ๆ ได้วัตถุที่ให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงสุดตามสมการที่ (2.19) เรียกว่า วัตถุในอุดมคติหรือวัตถุดำ (black body) วัตถุที่มีอยู่ทั่วไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุดำ การแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุโดยทั่วไปที่มีอุณหภูมิ T และพื้นที่ A จะเขียนได้ดังสมการที่ (2.20)

$$q_r = \sigma \epsilon AT^4 \quad (2.20)$$

โดยที่ ϵ คือ คุณสมบัติทางการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุซึ่งเรียกว่า ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุด ϵ จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

การที่จะหาอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันนั้นยุ่งยากมาก หากพิจารณากรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิว A และค่าการแผ่รังสีความร้อนกับวัตถุใหญ่ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กอยู่ โดยที่วัตถุเล็กมีอุณหภูมิ T_h และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ T_c เราสามารถเขียนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ดังสมการที่ (2.21)

$$q_r = \sigma A(T_h^4 - T_c^4) \quad (2.21)$$

นอกจากรูปแบบสมการ แล้วรูปสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณการแผ่รังสีจะเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.22)

$$q_r = h_r A(T_h - T_c) \quad (2.22)$$

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

$$h_r = \sigma (T_h + T_c)(T_h^2 - T_c^2) \quad (2.23)$$

2.6 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response Surface Methodology ; RSM)

ปัจจุบันได้รับความสนใจในการออกแบบเพื่อหาความสอดคล้องกับพื้นที่ของการตอบสนองและประเมินความเหมาะสมในสถานะของการทดลอง วิธีการและการออกแบบผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวหรือที่เรียกว่า Response Method and Designs และการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาคำตอบของการทดลองที่ประกอบด้วยจำนวนปัจจัยร่วมการทดลองหลายปัจจัย ซึ่งนำไปสู่การค้นพบการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (maximum) หรือการตอบสนองต่ำสุด (minimum) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการ [8]

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว เป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และสามารถหาจุดที่เหมาะสม (optimization) จากความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านั้นได้ [69] เช่น การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (input variable) หรือปัจจัยเชิงปริมาณกับค่าการตอบสนอง (response variable) เป็นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง เมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง และการหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (optimum value) ที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด หรือสามารถเลือกจุดที่เหมาะสมได้จากผลตอบสนองหลายๆค่าได้ [9] โดยรวมแล้วเทคนิคดังกล่าวนี้ได้ใช้เพื่อให้คำตอบต่างๆ เช่น ค่าตอบสนองได้รับผลกระทบจากชุดสิ่งที่ทำการทดลองบนพื้นที่เฉพาะที่น่าสนใจบางอย่างได้อย่างไร ถ้าจำเป็นชุดของสิ่งทดลองอะไรที่จะให้ผลิตภัณฑ์หนึ่งเป็นที่น่าพอใจตรงตามข้อกำหนด และพื้นที่การตอบสนองอะไรที่ใกล้กับค่าสูงสุดนี้ได้ [8]

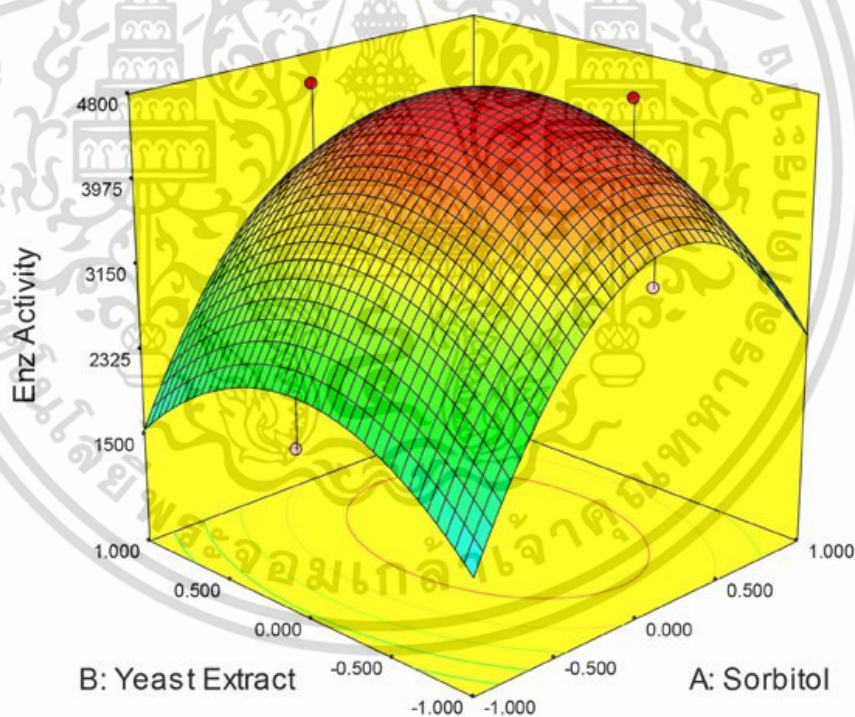
หลักการที่สำคัญของการทำพื้นผิวตอบสนองเพื่อนำเสนอผลการวิจัย คือ การที่จะนำเสนอแบบพื้นผิวตอบสนอง ต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสมอย่างน้อยต้องมีปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไป และต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ โดยมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวแปรขึ้นไป และที่สำคัญต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณด้วย ดังนั้นแผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นผิวตอบสนองได้ คือ Factorial Design , Mixture Design , Central Composite Design (CCD) และ Plackett & Burman Design นอกจากนี้ระดับของตัวแปรอิสระที่ผันแปรไปนั้นจะต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X_i) ที่สัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y_i) สร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (model) [10] และนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการคาดคะเน (prediction) หรือปรับกระบวนการให้เหมาะสม (process optimization) ซึ่งโดยทั่วไปตัวแปรตามแต่ละตัวแปรหรือผลการตอบสนอง (response) จะขึ้นกับตัวแปรอิสระ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้สามารถอธิบายโดยแบบพหุนามคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า สมการรีเกรสชัน (สมการถดถอย; regression equation) เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.24) [69]

$$Y = f(X_1, X_2) + \epsilon \quad (2.24)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยเหล่านั้นแทนค่าด้วย X และ ε คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในค่าสังเกต Y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(Y) = f(X_1, X_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวตอบสนองได้ดังสมการที่ (2.25)

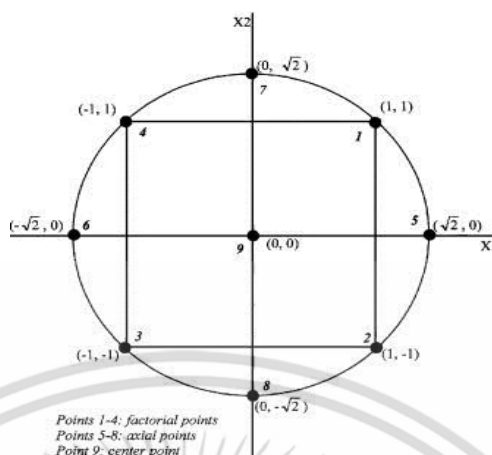
$$\eta = f(X_1, X_2) \quad (2.25)$$

ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวตอบสนอง (response surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.18 อย่างไรก็ตามในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวนั้น จำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามค่าตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่างๆ เป็นลำดับแรก การค้นหาฟังก์ชันต่างๆ เหล่านี้ใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (polynomial) เป็นลำดับต้นๆ เช่น ลำดับหนึ่งหรือกำลังหนึ่ง (first order) ลำดับสองหรือกำลังสอง (second order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันจะประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่ง เป็นไปตามสมการที่ (2.26) ดังนี้ [69]



รูปที่ 2.18 กราฟ 3 มิติ ของวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของ CCD และจุดการออกแบบ 9 จุด สำหรับปัจจัย 2 ตัวแปร [10]

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.26)$$

สำหรับระบบที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง (quadratic regression relationship) ต้องใช้โพลีโนเมียลที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสองหรือกำลังสอง ซึ่งมีแบบดังสมการที่ (2.27) ดังนี้ [11]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j \neq i}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.27)$$

2.6.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาพื้นผิวตอบสนอง แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง ซึ่งมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยสุด (least square) การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (first-order model) และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง (second-order model) ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลอง quadratic ของผลตอบสนอง โดยมีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีการ คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกวิธีการออกแบบส่วนประสมกลางมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 3 ส่วน ต่อไปนี้

1. ตำแหน่งการทดลองของ 2^n factorial (ถ้า k ในที่นี้ คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย 2 ตัว) ดังนั้น 2^2 จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง $(-1,-1)$ $(+1,-1)$ $(+1,+1)$ $(-1,+1)$

2. ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่เป็นแนว $+\alpha$ หรือ $-\alpha$ ในแนวแกนที่เรียกว่า star point $(+\alpha,0)$ $(-\alpha,0)$ $(0,+\alpha)$ $(0,-\alpha)$
3. ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 ตำแหน่ง ที่เรียกว่า central point (ตำแหน่ง $0,0$) แสดงได้ดังรูปที่ 2.19

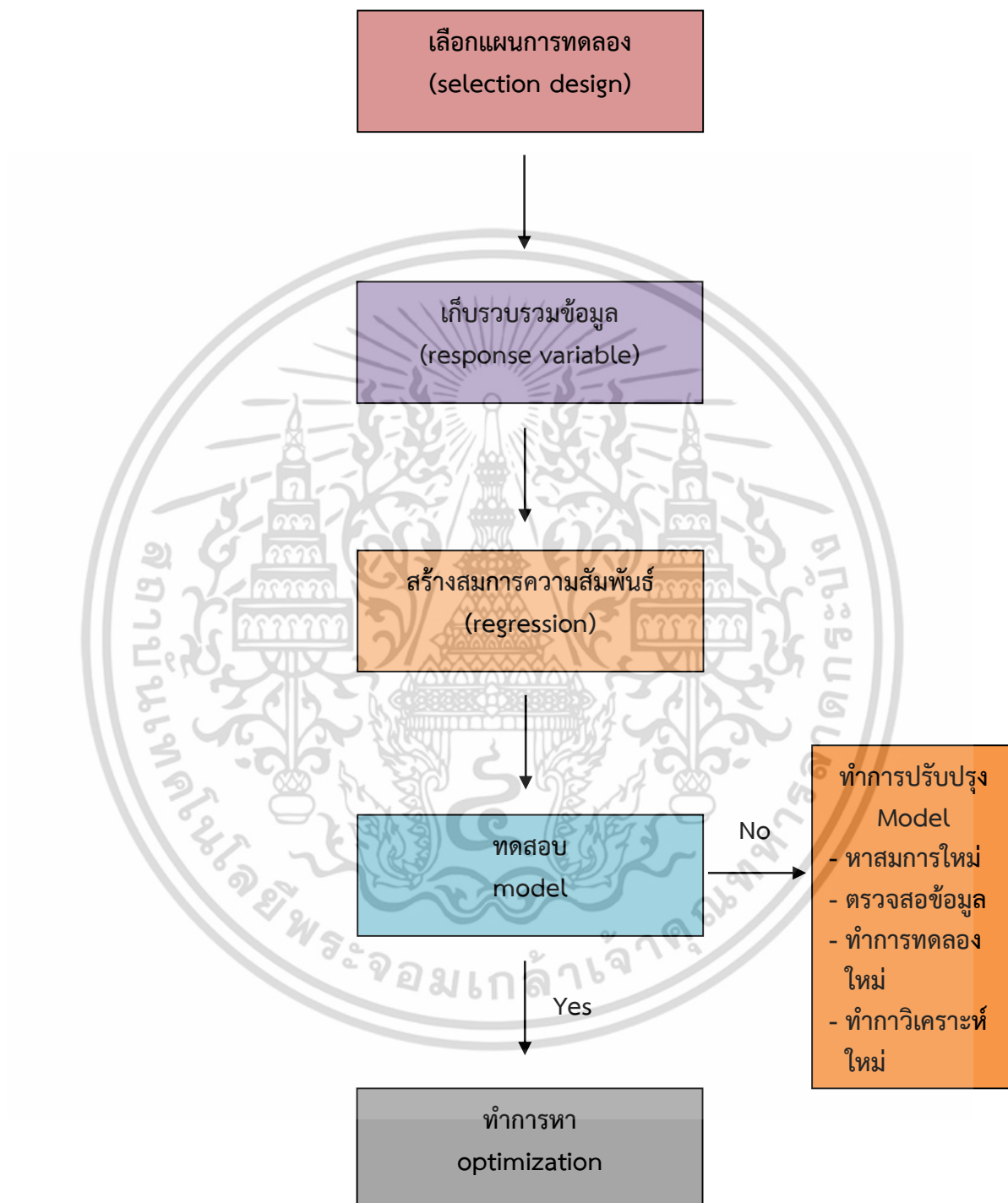
การทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีตำแหน่งเพิ่มขึ้นจาก 2^2 factorial design อีก 5 ตำแหน่ง $(2k+1)$ คือ $(+\alpha,0)$ $(-\alpha,0)$ $(0,+\alpha)$ $(0,-\alpha)$ และ $(0,0)$ เพื่อให้จุดหนึ่งของการเพิ่มเป็นจุดกึ่งกลาง และจุดที่เหลือ $2k$ เป็นจุดห่าง α รวมทั้งหมดเป็น 9 การทดลอง สำหรับจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัว ($k = 3$) จะทำให้การออกแบบ 2^k factorial designs + $(2k+1)$ มี 15 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ทำให้การทดลองแบบนี้สามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา [10] ดังนั้นการทดลองแบบ CCD สามารถกำหนดตำแหน่งของการทดลองได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตำแหน่งการทดลองและระดับค่า $\alpha = 2^{k/4}$ สำหรับการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

จำนวนปัจจัย (X_i) = k	2	3	4	5
จำนวนตำแหน่งการทดลองทั้งหมดใน CCD	9	15	25	43
ระดับของค่า $\alpha = 2^{k/4}$	1.4142	1.6818	2	2.3784

จากตารางที่ 2.5 จะเห็นว่าในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง จุดของการออกแบบการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อ k ถูกเพิ่ม ตัวอย่างเช่น สำหรับ $k=4$ และ 5 แล้วการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางจะมีจำนวนตำแหน่งการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 25 และ 43 จุด การทดลอง ตามลำดับ ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่ต้องการ คือ 2^k factorial designs ที่ถูกแทนที่ด้วย fractional ที่ทำซ้ำของ 2^k เพื่อเป็นไปตามมุ่งหมายของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งในการทำ fraction replication ควรจะถูกออกแบบเพื่อให้เกิดการประมาณค่าทั้งหมดของผลเชิงเส้นตรง ผลเชิงเส้นโค้ง และผลของปฏิสัมพันธ์บางส่วนในรูปแบบกำลังสอง เพื่อให้สามารถทำ fraction replication composite design โดยปกติมีความเป็นไปได้ในการประมาณค่า β_0 ผลในเชิงเส้นตรงทั้งหมด (β_i) และผลในเชิงเส้นโค้งทั้งหมด (β_{ii}) [8]

ขั้นตอนการทำวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

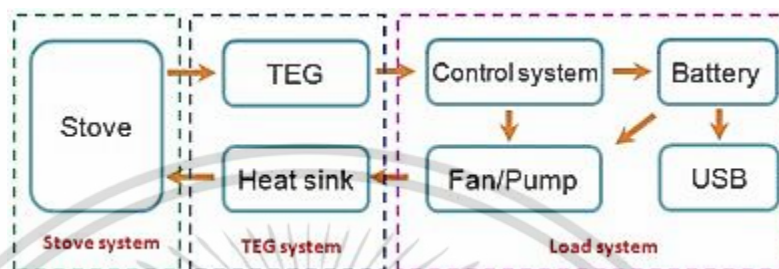
- กำหนดแผนการทดลองที่จะใช้และการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างที่เหมาะสมที่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอในการสร้าง contour plot โดยกำหนดปัจจัยที่สำคัญ 2 หรือ 3 ปัจจัย กำหนดระดับปัจจัยที่จะศึกษา
- เก็บรวบรวมข้อมูลและนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ regression ที่ดีที่สุด โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ เช่น SAS , SPSS , Statistix และ Design Expert เป็นต้น

2.7 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์และการประยุกต์

จากผู้คนทั่วโลกมากกว่าสามล้านคนใช้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง โดยเฉพาะเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น การทำอาหาร ความร้อน และแสง ในการใช้งานเตาชีวมวลนิยมกันอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มีมลพิษทางอากาศภายในและมลพิษที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้เป็นอันตราย ในการศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุและการแพร่เชื้อโรคในประชากรที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ามลพิษทางอากาศที่อยู่ภายในมีส่วนผสมที่ซับซ้อนของอนุภาคของแข็ง หยตของเหลว และก๊าซ ซึ่งนำไปสู่โรกระบบทางเดินหายใจและการเสียชีวิต [82] ตามที่องค์การอนามัยโลกในปี 2009 [113] ซึ่งทุกปีผู้คนประมาณสองล้านคนตายก่อนเวลาวัยอันควร เกิดจากการที่ประเทศที่กำลังพัฒนามีการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง สำหรับการใช้ในครัวเรือน จึงทำให้มีมลพิษทางอากาศเกิดขึ้น เกิดจากการใช้งานของเตาที่เรียบง่าย เช่น การใช้หินและไฟเป็นวิธีแบบดั้งเดิม การสร้างเตาหรือเตาโคลนที่ประเทศอินเดีย [70] ซึ่งในทวีปแอฟริกา อเมริกากลาง และอเมริกาใต้ [19,94] ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้เมฆยังเป็นมลพิษซึ่งมีแหล่งมาจากทางตอนเหนือของมหาสมุทรอินเดีย ส่วนใหญ่จะมีเขม่าหรืออนุภาคของคาร์บอนสีดำเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ไฟในการประกอบอาหาร ซึ่งก่อให้เกิดการละลายน้ำแข็งในเทือกเขาหิมาลัยและเป็นสัญญาณในการละลายน้ำแข็งในทะเลอาร์กติก [71] โดยระบบของเตานั้นจะขับเคลื่อนโดยใช้พัดลมทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลง เเต่นั้นจะไม่มีกรบังคับการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งมีการเพิ่มเติมอีกอย่างก็คือการจ่ายพลังงานจากภายนอกเข้าไปในระบบนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก สำหรับเตาบางชนิดก็จะใช้พัดลมเข้าไปขับเคลื่อนให้กับระบบ อย่างไรก็ตาม ในประเทศที่กำลังพัฒนามีพื้นที่ป่าไม้เพื่อทำการจัดหาวัสดุทางไฟฟ้าบางส่วนเนื่องมาจากการขาดแคลนอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับโรงไฟฟ้าทั่วไป ทำให้งานทางด้านวิศวกรรมและการบำรุงรักษาไม่ดีอีกด้วยและในบางกรณีมีการสูญเสียระบบการส่งผ่านพลังงานทำให้ไฟฟ้าดับบางส่วนแล้วอาจจะเกิดภัยธรรมชาติได้ เช่น แผ่นดินไหว พายุหิมะ และอื่นๆ นอกจากนี้ประเทศที่กำลังพัฒนามีเพียงไม่กี่ร้อยครอบครัวที่อาศัยอยู่ในระบบการส่งผ่านทางไฟฟ้าจะไม่สามารถทำได้ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น เช่น ในทางภาคเหนือของสวีเดน ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEGs) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ข้อดีของระบบนี้ คือ ชิ้นส่วนไม่มีการเคลื่อนไหว ในการดำเนินงานที่ก่อให้เกิดเสียงและการบำรุงรักษาต่อน้อยที่สุด ตามผู้ที่ทบทวนวรรณกรรมก่อนหน้านี้ [15,40-41,56-57,95-99] ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการเก็บเกี่ยวและการกักเก็บความร้อนที่ระดับต่ำจากพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานความร้อนในมหาสมุทร, ความร้อนใต้พิภพ และเกี่ยวกับเครื่องยนต์ และโรงงานเหล็กเป็นพลังงานไฟฟ้า

ดังนั้นวิธีที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตานั้นเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งในการผลิตไฟฟ้าซึ่งใช้พัดลมเป็นตัวป้อนพลังงาน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย คือ ระบบเตา ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และภาระของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนผังแสดงการไหลของระบบ

รูปที่ 2.20 แสดงระบบย่อยต่างๆและการไหลของพลังงานระหว่างระบบ ในขณะที่เชื้อเพลิงชีวมวลเผาไหม้อยู่ในเตา ทำให้พลังงานบางส่วนไหลเข้ามาในระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า จากนั้นกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ระบบควบคุม โดยที่ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ถูกออกแบบมาเพื่อเก็บกำลังไฟฟ้าสูงสุด ขั้นต่อไป พลังงานที่ได้จะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ยังสามารถให้พลังงานไปยังอุปกรณ์ที่เรียกว่า USB นอกจากนี้การผลิตไฟฟ้าที่ผลิตโดยระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สามารถใช้พัดลมเป็นพลังงาน ซึ่งมีการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาโดยอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ เพื่อปรับปรุงการปล่อยความร้อนและลดการปล่อยก๊าซ เขม่าควัน และฝุ่นละออง นอกจากนี้การผลิตไฟฟ้ายังสามารถให้ผู้ใช้มีความสามารถในการใช้พลังงานทางแสงหรือวิทยุ เช่น ชาร์จโทรศัพท์มือถือหรืออื่นๆที่ตอบสนองความต้องการของประเทศที่กำลังพัฒนา ในหลายๆสถาบันและนักวิทยาศาสตร์ได้ร่วมกันศึกษาการปรับปรุงเตาชีวมวลที่ใช้ในการประกอบอาหาร การออกแบบด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้เอาชนะข้อจำกัดในการทำงานและได้รับการยอมรับจากผู้ใช้วิธีการก่อนหน้านี้ การทบทวนวรรณกรรมนี้ได้มีการนำเสนอการสำรวจของคนเพียงคนเดียวที่ใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตา ทำให้มีการตรวจสอบข้อเท็จจริงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบชิ้นส่วนและการประเมินผลในทางเศรษฐกิจที่ถูกต้อง

2.7.1 ทฤษฎีและหลักการทั่วไป

ประสิทธิภาพของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้มขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ประสิทธิภาพของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกและความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายทั้งสองข้าง โดยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ ระดับของอุณหภูมิและอัตราการนำความร้อนผ่านระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ซึ่งในส่วนถัดไปจะเป็นการอธิบายทฤษฎีและหลักการ

2.7.2 หลักการพื้นฐานของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

การศึกษาผลของเทอร์โมอิเล็กทริกถูกค้นพบครั้งแรกใน ค.ศ. 1822 โดยซีเบค เราจะสังเกตเห็นได้ว่า แรงดันไฟฟ้าอาจเกิดจากวงจรที่ทำจากตัวนำไฟฟ้า 2 ตัวที่แตกต่างกัน เมื่อบริเวณรอยต่อหนึ่งถูกความร้อน โดยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 รอยต่อถูกสร้างขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้อยู่ระหว่างปลายทั้งสองข้าง ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิและค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์ซีเบค สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.28)

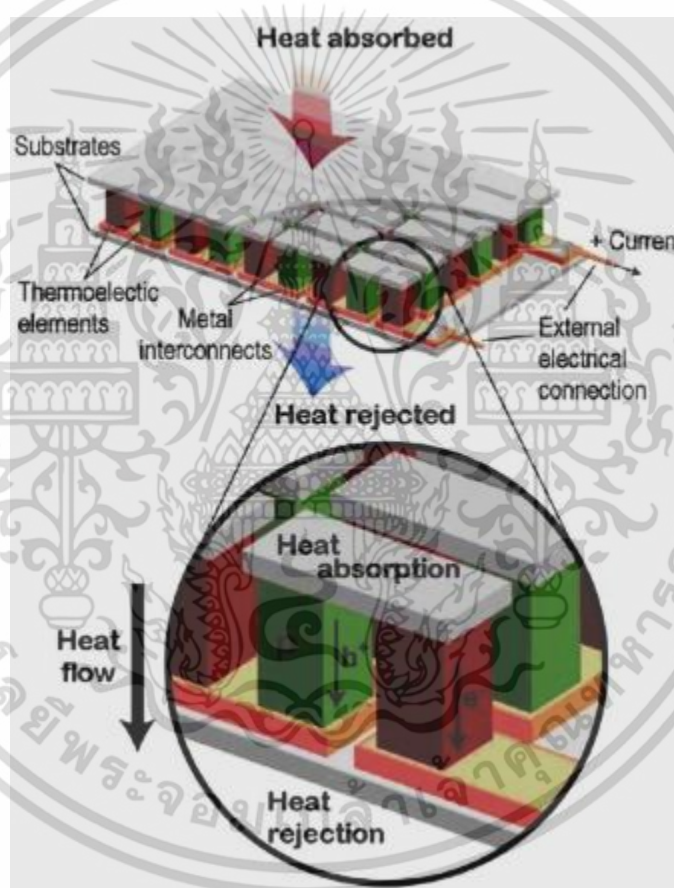
$$v = \alpha(T_h - T_c) \quad (2.28)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค สัมประสิทธิ์ซีเบคคู่ได้จากคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและ T_h กับ T_c คือ รอยต่อของอุณหภูมิทางด้านร้อนกับทางด้านเย็น ตามลำดับ โดยสัมประสิทธิ์ซีเบคคือการเปลี่ยนแปลงความแตกต่างของอุณหภูมิให้เป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะอธิบายโดย Rowe [100], Rowe [101] อธิบายประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก Z ซึ่งมักจะแสดงในรูปตัวแปรเป็น ZT เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.29)

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \quad (2.29)$$

เมื่อ λ คือ ค่าการนำความร้อน, σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า และ ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า. ซึ่งในการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะพิจารณาจากสมการ (2.28) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับผลกระทบโดยตรง จากค่าการนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค แต่การนำความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับผลกระทบในทางตรงกันข้าม ทำให้ค่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ตามมาอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำมาเป็นเวลาหลายปี อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่ปลายปี 1990 มีวิธีการใหม่ๆ ในการเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ซีเบค และการลดค่าการนำความร้อน จากนั้นได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยนำจำนวนโหนดที่ต่อเพื่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้านั้นใช้เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนหลายๆคู่ ซึ่งแต่ละคู่จะประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด n (n -type) และ p (p -type) โดยมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าแบบอนุกรมและมีการเชื่อมต่อทางความร้อนแบบขนาน จากนั้นประกบการเชื่อมต่อระหว่างทั้งสอง เพื่อให้ทั้งสองมีการนำความร้อนที่สูง แต่แบบของโมดูลที่เป็นแผ่นเซรามิคจะมีการนำไฟฟ้าต่ำ (รูปที่ 2.21) [102] เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีการยึดติดระหว่างอุณหภูมิทางด้านร้อนโดยที่ทางด้านร้อนจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนอุณหภูมิทางด้านเย็นจะมีการระบายความร้อนโดยใช้แผงระบายความร้อน พบว่าที่อุณหภูมิสูงจะมีการดูดซับความร้อนและที่อุณหภูมิต่ำกว่าสภาพแวดล้อม ทำให้สูญเสียความร้อนในขณะที่มีการผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิจากทางด้านร้อนของแผงระบายความร้อนสูง ทำให้ประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูง ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา บิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3), เลทเทลลูไรด์ (PbTe), ซิลิคอน-เจอร์เมเนียม (SiGe) เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการทำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ซึ่งมีการศึกษาอย่างมากในช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิ สอดคล้องตาม Rowe [101], ประสิทธิภาพของ

บิสมีทเทลลูไรด์ที่อยู่ในระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเนออร์เรเตอร์จะสูง แต่ถูกจำกัดอุณหภูมิในการทำงานสูงสุด ช่วง 250-300 องศาเซลเซียส ตรงกันข้ามกับเลทเทลลูไรด์ (PbTe) และ ซิลิคอน-เจอร์เมเนียม (SiGe) คือ มีการใช้งานในอุณหภูมิสูง (สำหรับเลทเทลลูไรด์ (PbTe) ประมาณ 600 องศาเซลเซียส และซิลิคอน-เจอร์เมเนียม (SiGe) ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส) แต่ประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสองค่อนข้างต่ำเมื่อเร็ว ๆ นี้ มีการค้นพบวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชั้นสูงที่มีลักษณะโดดเด่น เช่น (โครงสร้างนาโน , ฟิล์มบางชนิดซูเปอร์แลตทิซ และวัสดุที่เป็นควอนตัมเวลล์) ประสิทธิภาพของวัสดุที่กล่าวมา มากกว่า 2 ทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถนำไปใช้งานเฉพาะมากขึ้น ถ้าค่าประสิทธิภาพของวัสดุสูงกว่า 3 ทำให้เครื่องกำเนิดระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเนออร์เรเตอร์สามารถแข่งกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้



รูปที่ 2.21 แผนผังระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเนออร์เรเตอร์

2.6.3 ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างง่าย

สมการที่ควบคุมอัตราการไหลของความร้อนเข้าและออกนั้น ได้จากสมดุลพลังงานที่บริเวณรอยต่อของอุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็น ตามลำดับ [42,72] ซึ่งสมการซีเบค ฟุริเยร์ และผลกระทบบของจูล สมการที่ (2.30) และ (2.31) จะใช้ในการจำลองคุณสมบัติของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเนออร์เรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{in} = 2\alpha IT_H + \frac{2\lambda A}{L}(\Delta T) - \frac{1}{2}I^2 \frac{2\rho L}{A} \quad (2.30)$$

$$Q_{out} = 2\alpha IT_C + \frac{2\lambda A}{L}(\Delta T) + \frac{1}{2}I^2 \frac{2\rho L}{A} \quad (2.31)$$

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และความแตกต่างอุณหภูมิทางด้านร้อนและด้านเย็นแสดงดังสมการที่ (2.32) ซึ่งนำไปสู่สมการสมดุลพลังงานได้เมื่อ $P = Q_{in} - Q_{out}$

$$P = 2(\alpha I \Delta T - I^2 \frac{\rho L}{A}) \quad (2.32)$$

เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิคือ อุณหภูมิทางด้านร้อน-อุณหภูมิทางด้านเย็น และ A, L, λ, ρ , และ I คือ พื้นที่, ความยาว, การนำความร้อน, สภาพการนำไฟฟ้า และ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าตามลำดับ เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตโดยระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์คือ เมื่อปลายของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์มีการเปิด ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดแสดงดังสมการที่ (2.33)

$$V_{oc} = (\alpha_p - \alpha_n)(T_H - T_C) \quad (2.33)$$

แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเป็นส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ($T_H - T_C$) ที่อยู่ระหว่างอุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด P และ n ปัจจัยที่สองคือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ค่าการนำความร้อนและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p สมมติให้เป็นแบบเดียวกัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าสามารถเขียนได้จากสมการที่ (2.34) และ (2.35)

$$V_{oc} = 2\alpha \Delta T \quad (2.34)$$

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{\rho L(1+m)} \quad (2.35)$$

เมื่อ $m = \frac{R_L}{R}$ คือ อัตราส่วนต่อโหลด และ R_L คือ ความต้านทานที่โหลดภายนอก

กำลังไฟฟ้าที่ไหลออกได้มาจากการนำกระแสไฟฟ้าเข้าไป แสดงในสมการที่ (2.32) ซึ่งในการทำงานของวัสดุและคุณสมบัติทางเรขาคณิตขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิที่กำหนด โดยสามารถแสดงดังสมการที่ (2.36)

$$P_{max} = 2 \frac{m}{(1+m)^2} \frac{\alpha^2 A}{\rho L} \Delta T^2 \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น คือ มีการจำกัดสภาวะวงจรเปิด สภาวะลัดวงจรและในกรณีที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด สามารถทำได้ในขณะที่ความต้านทานของโหลดภายใน R มีความสอดคล้องกับความต้านทานของโหลด R_L ภายนอก โดยพิจารณาว่าเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีจำนวน N คู่ จะได้ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.37) , (2.38) , (2.39) , (2.40) และ (2.41)

$$V_{oc} = 2\alpha\Delta T \quad (2.37)$$

$$V_{mp} = \frac{V_{oc}}{2} = \alpha N \Delta T \quad (2.38)$$

$$I_{sc} = \frac{\alpha A}{\rho L} \Delta T \quad (2.39)$$

$$I_{mp} = \frac{1}{2} \frac{\alpha A}{\rho L} \Delta T \quad (2.40)$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 NA}{\rho L} \Delta T^2 \quad (2.41)$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ได้ขึ้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในการทำงาน , รูปทรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (N , A , L) และคุณสมบัติของวัสดุ (α และ ρ) และที่สำคัญของสมการนี้ก็คือ กำลังไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิกำลังสอง โดยกำลังไฟฟ้าที่อุณหภูมิอื่นๆ สามารถประเมินได้จากสมการที่ (2.42) จึงทำให้ผู้ผลิตมีการกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกและความแตกต่างของอุณหภูมิที่แน่นอน

$$P = \frac{P_{ref}}{\Delta T_{ref}^2} \Delta T^2 \quad (2.42)$$

กำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดความยาวของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ซึ่งหมายความว่า โมดูลที่มีกำลังไฟฟ้าสูงต้องใช้วัสดุที่น้อยกว่าโมดูลที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า เมื่อแรงดันขาออกที่มีจำนวน N คู่ สามารถวัดอุณหภูมิในการทำงานได้ ซึ่งกำหนดโดย

$$V_m = \frac{\alpha N (T_H - T_C)}{1 + 2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \left(\frac{L_c}{L} \right)} \quad (2.43)$$

สมการที่ (2.43) แสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต่อกันและความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยทั่วไปอุปกรณ์ไฟฟ้าจำนวนมากจำเป็นต้องมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าโมดูล ดังนั้น โมดูลที่มีอุณหภูมิสูงเป็นที่ต้องการมากกว่าโมดูลที่พบเห็นบ่อยๆ เนื่องมาจากมีความ

ต้องการเพิ่มขึ้น ทำให้อิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพของโมดูล กำหนดโดย Rowe [43] ดังสมการที่ (2.44)

$$\eta = \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \left\{ \left(1 + \frac{2rL_c}{L} \right)^2 \left[2 - 0.5 \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) + \frac{4}{ZT} \left(\frac{L + n}{L + 2rL_c} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (2.44)$$

เมื่อผ่านการดำเนินงาน ตัวแปรคุณสมบัติของโมดูลเป็นค่าคงที่, ทำให้กำลังไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ สมการ (2.44) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของโมดูลเป็น $\frac{T_H - T_C}{T_H}$ หมายความว่า ประสิทธิภาพของโมดูลได้รับผลกระทบโดยตรงจากความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่จะแปรผกผันกับอุณหภูมิทางด้านร้อน เมื่อได้รับกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพสูง ทำให้ทางด้านร้อนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์มีการรักษาอุณหภูมิสูงและในขณะที่ด้านเย็นมีการรักษาอุณหภูมิต่ำ

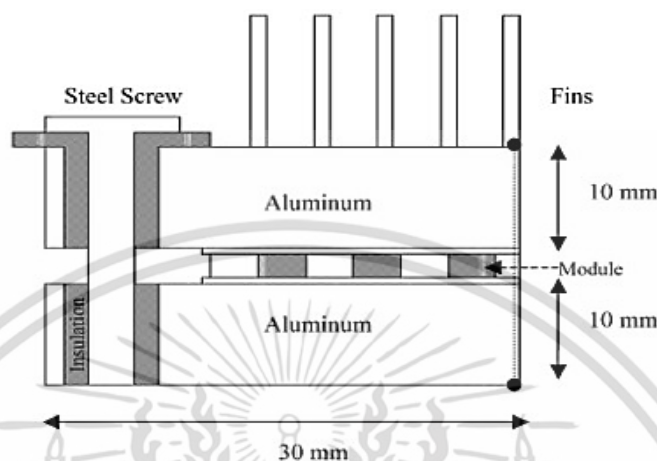
2.7.3 ทางเลือกสำหรับการออกแบบระบบระบายความร้อน

ในสมการที่ (2.40) และ (2.44) กำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทางด้านร้อน, อุณหภูมิทางด้านเย็นและความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันทั้งสอง ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นควรจะสูงและอุณหภูมิทางด้านเย็นควรจะต่ำที่สุด โมดูลที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพสูงสุด 5-6% ในขณะที่วัสดุใหม่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า 10% ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังสามารถดูประสิทธิภาพได้จากอุณหภูมิและการไหลของความร้อน เมื่อพลั๊กความร้อนบางส่วนไหลผ่านระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นการออกแบบระบบระบายความร้อนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้มที่เหมาะสม จะต้องมีการออกแบบระบบระบายความร้อนที่สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยดูจากคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก, ความแตกต่างของอุณหภูมิ, ประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ แนวคิดการออกแบบระบบระบายความร้อนมีอยู่ 4 อย่าง ที่ใช้สำหรับการระบายความร้อนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้มมีดังต่อไปนี้ คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ การพาความร้อนแบบบังคับ การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน และการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน

2.7.3.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติของอากาศ

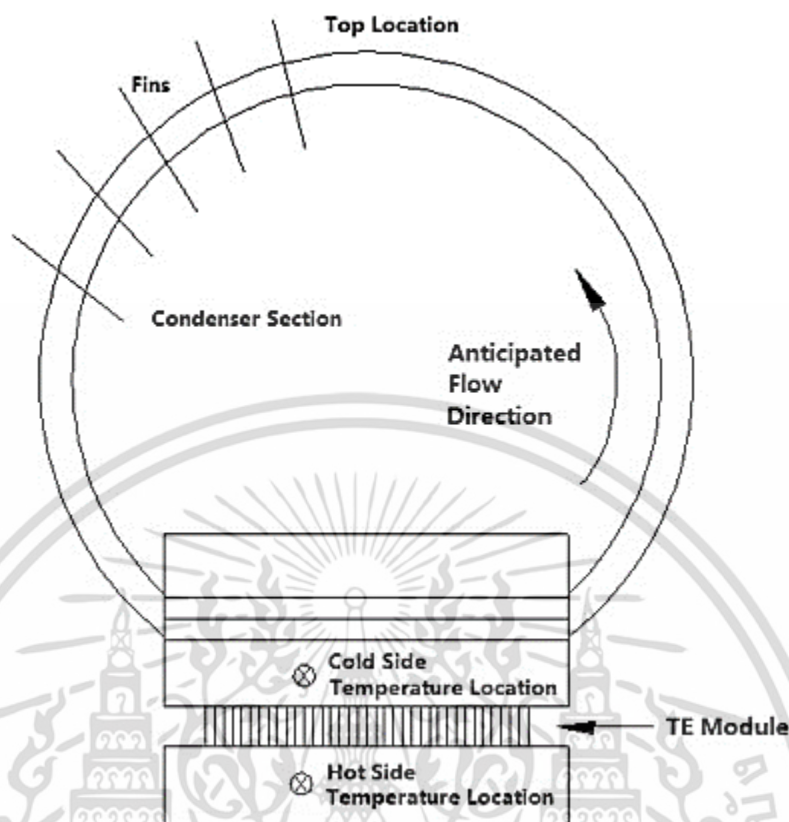
การพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ใช้อากาศจะขับเคลื่อนระบบโดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศส่งผลให้แรงลอยตัวที่อยู่ภายในชุดระบบระบายความร้อนมีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำมาก

Nuwayhid et al, [77] แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย โดยใช้การถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 อุปกรณ์ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แบบโมดูลเดียว

กำลังไฟฟ้าของโมดูลเป็นที่ย่ำมาก (1 วัตต์) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ลดลงและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในการพาความร้อนแบบที่ใช้อากาศบนแผงระบายความร้อนนั้นไม่ดี จึงได้กำหนดช่องว่างเพื่อให้ระบายความร้อนเพื่อนำไปสู่อุณหภูมิด้านเย็นที่สูงขึ้น ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับการวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์อินฟราเรด จากงานวิจัยของนิวเวย์ฮิด [62] ได้ทำการติดตั้งระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ฝังตรงกันข้ามกับเตา เมื่อมีอุณหภูมิสูงสุด โดยที่ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ติดตั้งอยู่ที่ตรงกลางของแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งมีการระบายความร้อนเป็นแบบธรรมชาติและพื้นที่ผิวมีการขยายตัวสูง ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดที่ 4.2 วัตต์ เมื่อมีเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการระบายความร้อนและแหล่งให้ความร้อน จากงานวิจัยของนิวเวย์ฮิดและฮามเมท [77] จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถดูได้จากการระบายความร้อนซึ่งใช้ท่อความร้อนชนิด thermosyphonic เช้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ใช้สำหรับเตาตั้งพื้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.23 โดยที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดอยู่ที่ 3.4 วัตต์ และไม่มีพัดลมช่วยในการระบายความร้อน ปรากฏว่าความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่ 70-80 องศาเซลเซียส จากท่อความร้อนชนิด thermosyphonic จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อส่วนทำระเหยมีอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส และเทอร์โมไซฟอนกับความร้อนแฝงจะสามารถระบายความร้อนได้ เมื่อส่วนทำระเหยมีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



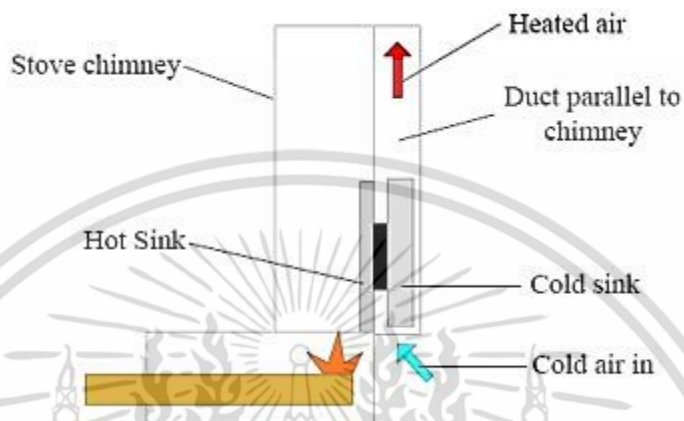
รูปที่ 2.23 ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ใช้สำหรับเตาดังพื้น

จากงานวิจัยของ lertsatitthanakorn [51] ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ามาติดตั้งที่ผนังทางด้านข้างของเตาและมีการสร้างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาชีวมวล โดยระบบที่ออกแบบจะใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มประกอบไปด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งมีแผ่นโลหะด้านใดด้านหนึ่งทำหน้าที่เป็นด้านร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกและเมื่อมีการพาความร้อนของอากาศจะระบายความร้อนผ่านทางครีป (ทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก) ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 2.4 วัตต์ เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อนโดยใช้การพาความร้อนแบบธรรมชาติเพียงอย่างเดียว เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งได้รับการพิจารณาจากงานวิจัยของ Mastbergen and Willson [67] โดยทำการออกแบบแสดงดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะออกแบบโดยให้อากาศเดินทางขึ้นไปตามปล่องควันก็ต่อเมื่อผ่านตัวระบายความร้อนและรับความร้อนที่ได้ไปที่ปล่องควันเมื่อมีอากาศเพิ่มมากขึ้นจะช่วยระบายความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ซึ่งระบายความร้อนโดยใช้การพาความร้อนแบบธรรมชาติแต่ยังไม่เพียงพอเนื่องจากขนาดของระบบใหญ่เกินไป

การระบายความร้อนโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติแบบเดียวไม่เพียงพอสำหรับขนาดของระบบ ถึงแม้จะมีการอัดขึ้นรูปให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้ระบบสามารถระบายความร้อนได้ก็ตาม แต่ก็ทำให้ความต้านทานเชิงความร้อนสูงเกินไปและพลังงานสูงตรงตามต้องการ ซึ่งได้มีการเพิ่มโดยใช้เตาหุงต้มและ

ท่อความร้อนชนิด thermosyphonic จะสามารถช่วยลดความต้านทานเชิงความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ แต่ก็คงไม่เพียงพอในการนำพลังงานไปใช้ตามที่ต้องการ

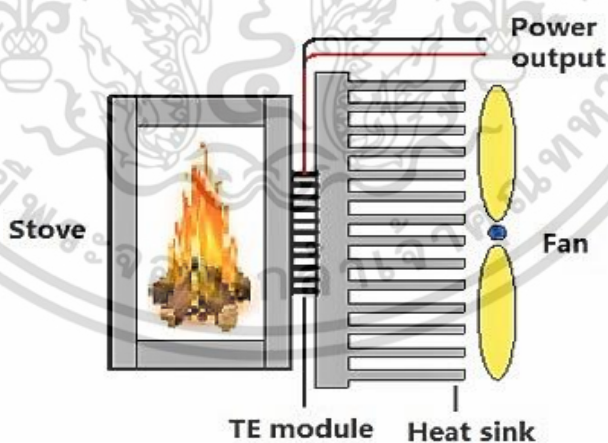
อย่างไรก็ตามการพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้อากาศไม่จำเป็นต้องมีการเคลื่อนไหว และมีการทำงานที่เงียบ ซึ่งในอนาคตอาจจะเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการออกแบบระบบโดยใช้พลังงานต่ำ



รูปที่ 2.24 การติดตั้งระบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

2.7.3.2 การพาความร้อนแบบบังคับ

การพาความร้อนแบบบังคับเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน เมื่อมีการนำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ระบายความร้อนทางด้านเย็นโดยใช้พัดลม แสดงได้ดังรูปที่ 2.25 และทำให้ความต้านทานเชิงความร้อนที่ได้ค่อนข้างต่ำเนื่องจากสามารถระบายความร้อนออกสู่ทางด้านเย็นมากขึ้น



รูปที่ 2.25 การระบายความร้อนด้วยระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ โดยการพาความร้อนแบบบังคับ

จากงานวิจัยของ คิลแลนเดอร์และบลาสส์ [58,59] ได้มีการที่จะนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้กับ ครอบครัวยุคใหม่ที่อาศัยอยู่ทางตอนเหนือของสวีเดน โดยมีการพัฒนาพื้นที่ในชนบทซึ่งนำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ติดตั้งกับเตาหุงต้มเพื่อใช้ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก จากนั้นจึงมีการนำ เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น HZ-20 จำนวน 2 โมดูล ถูกติดตั้งอยู่ที่แผ่นอะลูมิเนียมและมีการระบายความร้อน โดยใช้พัดลม ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้อยู่ที่ 4-7 วัตต์ ต่อมาบลาสส์และเทอร์ลิน [20] ได้มีการนำเสนอ เตาชีวมวลแบบอัดเม็ดโดยนำเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น HZ-14 จำนวน 2 โมดูล ติดตั้งที่ผนังด้านบนของเตา ซึ่งระบายความร้อนโดยใช้พัดลมและเมื่อมีอากาศผ่านช่องการระบายความร้อนของเตาจะทำให้เกิดการ เผาไหม้มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่ใช้เชื้อเพลิง จากนั้น โอฮานเลย์ เป็นต้นแบบในประดิษฐ์เตาหุง ต้มกับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ในปล่องควัน โดยที่ทางด้านร้อนที่เกิดขึ้นจาก ทางปล่องควันจะถ่ายเทความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและทางด้านเย็นจะระบายความร้อนโดย ใช้พัดลมและถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อมีการระบายความร้อนทางด้านเย็นสูงขึ้นทำให้ความต้านทาน เชนความร้อนลดลงส่งผลให้การถ่ายเทของอากาศสูง ซึ่งจากผลการศึกษาและความสัมพันธ์ทางทฤษฎีจะ เห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ โรเวลล์ได้มีการทำเทอร์ โมอิเล็กทริกโมดูลที่คล้ายกับบริษัท Hi-Z ซึ่งใช้ความร้อนจากปล่องควันเป็นแหล่งให้ความร้อนโดยทำการ ปรับปรุงการระบายความร้อนโดยใช้ครีบบลูและพัดลม [44] จากนั้นมีบริษัทเทอร์โมฟอร์ ประเทศรัสเซีย และบริษัทเทอร์โมนามิกส์ ประเทศจีน ได้ทำการนำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ติดตั้งที่ผนัง ด้านข้างของเตาหุงต้มโดยใช้เชื้อเพลิงของแข็งทำให้เกิดความร้อน ซึ่งมีการระบายความร้อนโดยใช้พัดลม ระบายอากาศ ดังนั้น เมื่อพัดลมระบายอากาศและการระบายความร้อนทางด้านเย็นเพิ่มขึ้น ทำให้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาหุงต้มและการผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น บริษัทรอยัลฟิลิปส์ อิเล็กทรอนิกส์ประเทศเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการทดสอบเตาฟิลิปส์ รุ่น HD4010 แสดงดังรูปที่ 2.26 ซึ่งม ีการติดตั้งระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ทางด้านล่างของเตาและมีการระบายความร้อนโดยใช้ พัดลม [60,103] ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ซึ่ง ระบายความร้อนโดยใช้พัดลม ซึ่งจะบรรจูลงในแบตเตอรี่ได้ก็ต่อเมื่อมีความร้อนจากเตาหุงต้ม ดังนั้น การใช้พัดลมจะช่วยให้อากาศเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ มีผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ไบโอดีทได้ ผลิตเตาพกพา แสดงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งออกแบบเพื่อการผจญภัยในกลางแจ้งและกรณีที่เกิดสถานการณ์ ฉุกเฉิน [21] ในการออกแบบจะนำความร้อนทั้งหมดผ่านท่อความร้อนจึงทำการแปลงเป็นไฟฟ้า ซึ่งมี ลักษณะคล้ายกับเตาฟิลิปส์ คือ อากาศจะถูกเข้าไปขับเคลื่อนให้กับพัดลมขณะที่ผ่านการระบายความร้อน และถูกเข้าไปในปล่องทำให้เกิดความร้อน การทำความสะอาด และการเผาไหม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จากนั้น ไบโอดีทและรามัน [104] ใช้ความร้อนจากท่อเหล็กกล้าผ่านห้องเผาไหม้และถ่ายโอนความร้อนไป ยังระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ เพื่อรักษาอุณหภูมิทางด้านร้อนให้สูง โดยที่ทางด้านเย็นของ ระบบระบายความร้อนโดยใช้ฮีทซิงค์ จากนั้นจึงทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศเพื่อ ช่วยระบายความร้อนให้กับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้า ที่ได้จากระบบอยู่ที่ 4.5 วัตต์ ความแตกต่างของอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ในพื้นที่ชนบทของประเทศ กำลังพัฒนาได้มีการใช้เตาหุงต้มสำหรับการประกอบอาหารเป็นประจำทุกวัน ความร้อน และแสงสว่าง แต่อย่างไรก็ตามหากมีการใช้ที่ไม่ถูกต้องอาจส่งผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม หลังจากในช่วงหลาย

ทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการปรับปรุงสภาพแวดล้อมโดยนำเตาหุงต้มจำนวนมากมาเป็นแหล่งให้ความร้อน สำหรับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.26 เตาฟิลิปส์



รูปที่ 2.27 เตาสำหรับการพกพา ผลิตโดยไบโอดีท

มาสเตอร์เก้น [73] ทำการตรวจสอบการใช้งานของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์และเตา EgoFagao ที่ทำจากประเทศบราซิล โดยได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 2 โมดูล รุ่น TEP1-112656-0.6 จากบริษัทเทอร์โมนามิกส์ นำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและมีการระบายความร้อนด้วยพัดลมและแผงระบายความร้อนของอะลูมิเนียม จะทำให้ประสิทธิภาพดีที่สุด มหาวิทยาลัยโรเซสเตอร์ ทำการออกแบบโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเข้ากับรูปแบบของเตาหุงต้มของชาวเฮติที่มีอยู่แล้ว [22,45,74-75,105] ซึ่งได้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อจัดเก็บพลังงาน โดยใช้ความแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

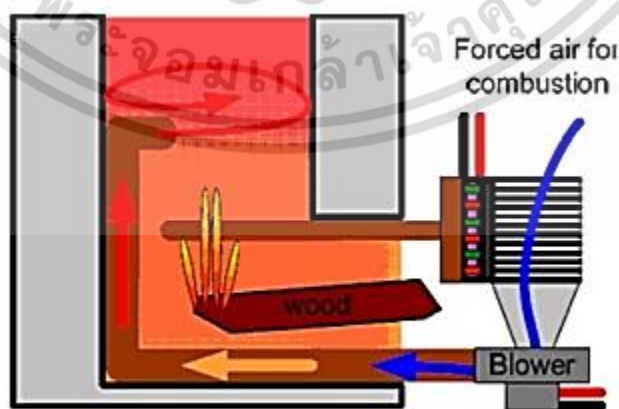
ของอุณหภูมิระหว่างห้องเผาไหม้ที่ไหลผ่านท่อเหล็กและระบายความร้อนทางด้านเย็นด้วยพัดลม ทำให้ได้กำลังไฟฟ้า 2 วัตต์ เพื่อนำมาใช้กับอุปกรณ์ในการชาร์จ ซึ่งในมหาวิทยาลัยโรเชสเตอร์ได้รับความร่วมมือระหว่างศูนย์ควบคุมและการป้องกันโรค ได้มีการปรับปรุงเทอร์โมอิเล็กทริกกับเตาหุงต้มให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งถูกพัฒนาโดยการใช้เตาชีวมวลประกอบอาหาร เพื่อลดการปล่อยก๊าซและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ [106] ซึ่งต้นแบบของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกกับเตาหุงต้มให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นนั้นถูกพัฒนาขึ้น โดยนำไปใช้กับอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้โดยอาศัยหลักการขับเคลื่อนด้วยแรงซึ่งใช้เตาที่ทำโดย Envirofit เพื่อนำไปใช้ทางการค้า ในการออกแบบระบบจะใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อมีพัดลมติดตั้งอยู่ในเตาจะช่วยควบคุมการไหลของอากาศเพื่อปรับปรุงการเผาไหม้และลดการปล่อยก๊าซโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนเตาของผู้ใช้ และการปรับปรุงเตาจะสามารถช่วยลดการปล่อยฝุ่นละอองที่เป็นอันตรายมากถึง 50 % จากรูปที่ 2.28 แสดงให้เห็นถึงเตาของ Envirofit ที่ใช้ในเชิงการค้ากับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกกับเตาหุงต้มของมหาวิทยาลัยโรเชสเตอร์ (กล่องดำ) (รูปที่ 2.28a) และการออกแบบเตาชีวมวลให้มีประสิทธิภาพและการเผาไหม้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2.28b) จากงานวิจัยของ O'Shaughnessy และคณะ [76] ได้ทำการใช้เตา mbaula chitetezo ในประเทศมาลาวี เป็นแหล่งให้ความร้อนกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการร่างภาพประกอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเตา chitetezo ปรากฏในรูปที่ 2.29 โดยที่การไหลเวียนของอากาศนั้นเกิดจากพัดลม จึงได้มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนเพื่อรักษาความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการอยู่ที่ 5.9 วัตต์ เตา mbaula chitetezo ถูกติดตั้งด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยมีการเก็บรวบรวมข้อมูล 80 วัน ที่หมู่บ้านในอำเภอ บาลากา ประเทศมาลาวี [78] มาล และคณะ [79] ได้มีการกำหนดเงื่อนไขในการประกอบอาหารสำหรับคนในพื้นที่ชนบทในอินเดีย จึงได้มีการศึกษาความเหมาะสมของการใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้มแบบดั้งเดิมหรือแบบใหม่เพื่อใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า และได้กำลังไฟฟ้าจากระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ 5-10 วัตต์ เมื่อทำการใช้พัดลมจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และไฟฟ้าที่ได้ตรงตามความต้องการส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของฮาร์แมน และคณะ [46] ได้ทำการออกแบบเตาหุงต้ม Mega Ecofogon โดยบังคับให้อากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีพัดลมถูกขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าที่ได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

การออกแบบที่ผ่านมา ได้มีการใช้เตากับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เพื่อผลิตไฟฟ้าและปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยใช้พัดลม เมื่อเร็ว ๆ นี้ Stovemate Kettlefan พัฒนากองทัพสหรัฐ เพื่อปรับปรุงสภาพที่พักอาศัย แสดงในรูปที่ 2.30 [107] ซึ่งมีพัดลมวางทางด้านบนของเครื่องทำความร้อนและความร้อนบางส่วนติดที่พื้นผิวทางด้านบนของระบบเพื่อเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า Srivastava และคณะ [108-110] ได้พัฒนาและออกแบบแนวคิดของระบบ EduKitchen ที่สถาบันเทคโนโลยีจอร์เจีย โดยมีการปฏิวัติครอบครัวที่อยู่อาศัยในแถบนั้นซึ่งให้ทำการใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาไม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การปรับปรุงประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง และการต้มน้ำที่สะอาด แนวคิดสำหรับการออกแบบใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับพัดลม ซึ่งอากาศจะแทรกเข้าไปในเตาโดยตรง เมื่อมีการระบายความร้อนทางด้านเย็นของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และสามารถใช้งานของหลอดไฟแอลอีดี สำหรับการออกแบบจะใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลผลิต

ไฟฟ้าประมาณ 8 วัตต์ ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งไฟฟ้าที่ได้สามารถนำมาใช้กับพัดลม หลอดไฟแอลอีดี และการผลิตน้ำดื่ม ข้อดีของระบบ คือ ความต้านทานเชิงความร้อนค่อนข้างต่ำ และการระบายความร้อนทางด้านเย็นมากขึ้น นอกจากนี้ อากาศที่เข้าไปในเตาและทางด้านเย็นของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ทำให้ความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริกถูกใช้เพื่อนำความร้อนกลับมาใช้ให้เกิดอากาศบริสุทธิ์ ซึ่งโดยทั่วไปประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น และในการสร้างฝุ่นละออง คาร์บอนมอนอกไซด์นั้นจะมากกว่าเตาที่ไม่ต้องบังคับการไหลเวียนของอากาศ แต่ข้อเสียบางอย่าง คือ การเคลื่อนย้ายของระบบ เมื่อมีการให้ความร้อนกับโมดูลสูงเกินไปจะทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ และในการออกแบบมีการไหลของอากาศแบบบังคับเพื่อทำการเปิดและปิดพัดลมอัตโนมัติเมื่อเตากำลังทำงาน

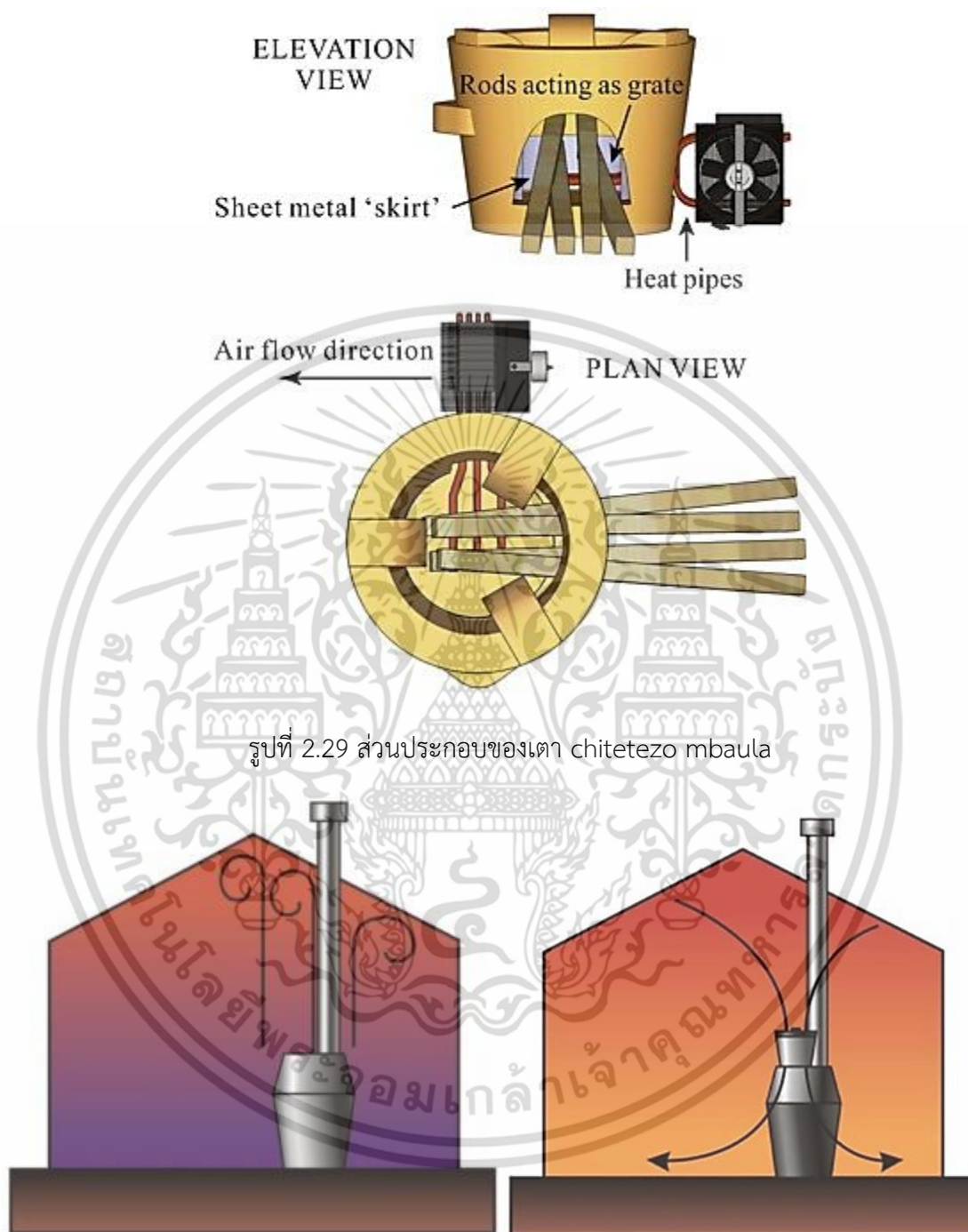


รูปที่ 2.28a เตา Envirofit ที่ใช้ในเชิงการค้า



รูปที่ 2.28b ตัวอย่างการออกแบบเตาที่ใช้ในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



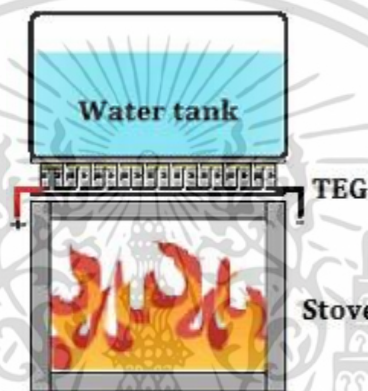
รูปที่ 2.29 ส่วนประกอบของเตา chitetezo mbaula

รูปที่ 2.30 ระบบหม้อไอน้ำภายในและภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3.3 การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้น้ำระบายความร้อน

สำหรับระบบการหมุนเวียนของธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับการพิจารณา โดยใช้อ่างเก็บน้ำที่มีขนาดใหญ่ซึ่งสัมผัสโดยตรงกับการระบายความร้อนทางด้านเย็น ซึ่งมีแนวคิดการนำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน โดยมีการนำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ร่วมกับเตาหุงต้ม แสดงในรูปที่ 2.31 ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่าเป็นระบบเทอร์โมไฮฟอน เมื่อมีการไหลเวียนของน้ำจะอาศัยแรงลอยตัว ดังนั้นในการออกแบบมวลเชิงความร้อนของน้ำจะถูกดูดกลืนพลังงานทั้งหมดผ่านโมดูล โดยไม่จำเป็นต้องถ่ายโอนความร้อนสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งการไหลเวียนของน้ำในธรรมชาติถูกพัฒนาอยู่ภายในถึงเพื่อให้สามารถระบายความร้อนออกสู่ทางด้านเย็น

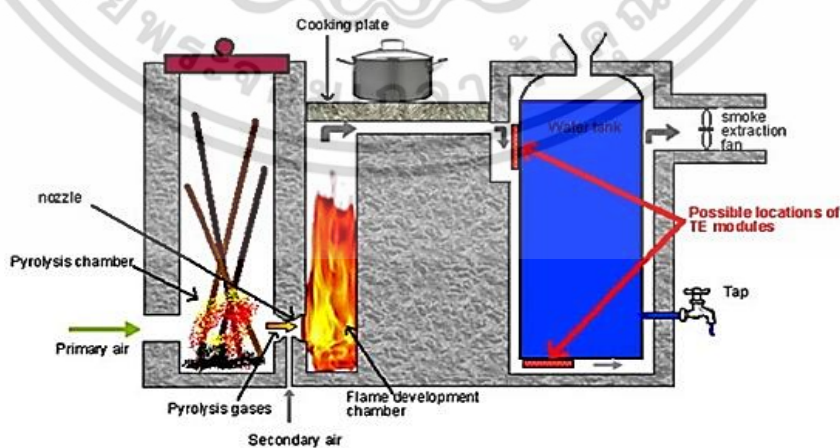


รูปที่ 2.31 การระบายความร้อนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติด้วยน้ำ

การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้น้ำระบายความร้อนได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากความต้านทานเชิงความร้อนต่ำ จากงานวิจัยของนิเวย์อิท และคณะ [80] ทำการทดสอบระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาประเภทต่างๆ ซึ่งสังเกตเห็นการระบายความร้อนของน้ำในหม้อ จึงเป็นตัวเลือกทางหนึ่งสำหรับการใช้เตาในการประกอบอาหาร แซมเพียร์เออร์ และคณะ [29-31] ได้พัฒนาและออกแบบเตาชีวมวลเพื่อใช้กับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์โดยให้ความร้อนจากแผ่นความร้อนและสามารถนำความร้อนมาประกอบอาหารและการทำน้ำร้อนใช้ในครัวเรือน ในการตรวจสอบการทดลอง [31] ทำการจำลองแหล่งรับความร้อนและถังน้ำ ซึ่งถูกนำมาใช้กับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์โดยใช้เตาก๊าซเป็นแหล่งความร้อน ผลการทดลองพบว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุดสำหรับระบบอยู่ที่ 7 วัตต์ แซมเพียร์เออร์ และคณะ [32,47] ใช้อะลูมิเนียมในการทำครีระบายความร้อนทางฝั่งด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และทำกล่องอะลูมิเนียมสำหรับใส่น้ำขนาด 2 ลิตร เพื่อทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนทางด้านเย็น โดยนำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ร่วมกับเตาชีวมวล ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 7.6 วัตต์ จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาเตาหุงต้มโดยองค์กร “Planète Bois” แสดงดังรูปที่ 2.32 แซมเพียร์เออร์ และคณะ [33,47] ทำการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกบิสมัทเทลลูไรด์ซึ่งระบายความร้อนโดยใช้พัดลมและหม้อน้ำเพื่อปรับปรุงการเผาไหม้และการผลิตไฟฟ้าให้ดีขึ้น ซึ่งตำแหน่งที่ดีที่สุดสำหรับการวางระบบเทอร์โม

อิเล็กทรอนิกส์เจเนอเรเตอร์นั้นอยู่ใต้ถังน้ำ เพราะสามารถผลิตไฟฟ้าโดยที่ไม่สูญเสียความร้อนจากก๊าซไปยังถังน้ำ ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำจะดีกว่าการแลกเปลี่ยนกับอากาศ เพราะน้ำสามารถระบายความร้อนได้ถึง 100 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ จากการตรวจสอบของ แซมเพียร์เออร์พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์จะขึ้นอยู่กับความร้อนที่ไหลเข้าจากทางด้านร้อนไปยังด้านเย็นของโมดูล เทาเวอร์พอท [81] ทำการใช้หม้อต้มและแนบเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์กับฐานซึ่งวางทางด้านบนของเตาและผลิตไฟฟ้าได้ 5-10 วัตต์ โดยต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ไฟฟ้า Juanico และคณะ [61] ทำการเสนอตัวควบคุมความร้อนสำหรับระบบเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เจเนอเรเตอร์ ซึ่งในการออกแบบระบบหม้อระบายความร้อนที่เหมาะสมนั้นจะใช้สำหรับการทำงานกับแหล่งความร้อนที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น เตาฟืนที่ใช้ในครัวเรือน จากนั้นอุปกรณ์ในการระบายความร้อนอย่างง่าย คือ พัดลม เพื่อควบคุมการไหลของความร้อนและความร้อนนั้นจะถูกผ่านครีระบายความร้อน ซึ่งค่าความต้านเชิงความร้อนต่ำเมื่อได้รับพลังงานต่ำ แต่ความต้านทานเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิของเตาที่ให้กับเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งไม่ร้อนจนเกินไปจึงจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า และในการที่นำระบบติดตั้งกับเตาทางด้านบนเป็นการแก้ปัญหาได้อย่างมากสำหรับการผลิตพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาฟืน

การออกแบบหม้อระบายความร้อนในอ่างเก็บน้ำบางส่วนเพื่อใช้ในการระบายความร้อน ซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ ระบบมีการพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้อากาศ ชั้นส่วนไม่มีการเคลื่อนไหว และไม่มี การควบคุมการทำงานของระบบ เมื่อเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์โมดูลมีอุณหภูมิร้อนเกินไปจะสามารถควบคุมได้เนื่องจากอุณหภูมิทางด้านเย็นใช้น้ำในการระบายความร้อนภายใต้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ต่อความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งระบบที่ได้สามารถผลิตไฟฟ้า ปรับปรุงการเผาไหม้ของระบบ และตอบสนองความต้องการของผู้คน (แอลอีดี โทศัพท์มือ และอุปกรณ์ชาร์จ) เป็นต้น ผลพลอยได้จากระบบ คือน้ำร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนประมาณ 90% สำหรับข้อเสียของระบบ คือ ในช่วงที่น้ำยังร้อนอยู่ระหว่างประกอบอาหารจะส่งผลให้การผลิตพลังงานลดลง นอกจากนี้เป็นไปได้ว่าหากมีการใช้เตามากเกินไป ทำให้ระบบทั้งหมดได้รับความร้อนเกินจึงส่งผลให้อุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นของโมดูลเกินขีดจำกัดการทำงาน จากนั้นหม้อน้ำที่วางอยู่นอกของระบบจะส่งความร้อนสู่ชั้นบรรยากาศ

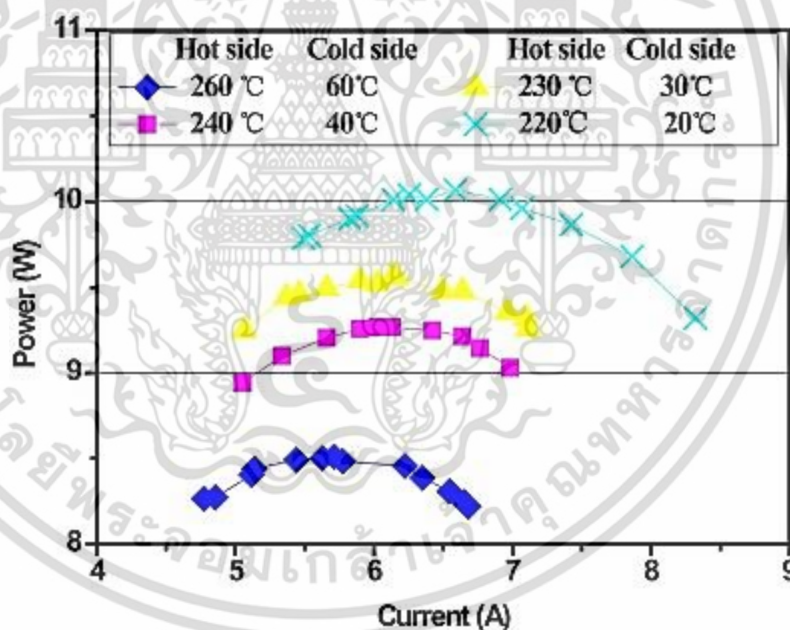


รูปที่ 2.32 การออกแบบระบบระบายความร้อนของเตา “Planète Bois”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3.4 การพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้น้ำระบายความร้อน

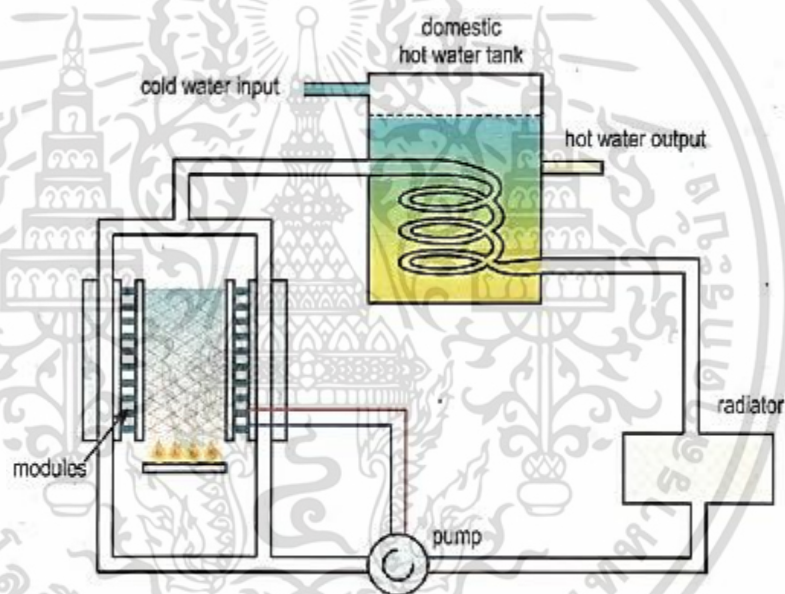
การพาความร้อนแบบบังคับด้วยน้ำพิจารณาจากบล็อกการทำความเย็นและระบบปั๊ม ซึ่งตัวบล็อกทำความเย็นสามารถลดความต้านทานเชิงความร้อนและยังต่ำกว่าระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ไรนัล และคณะ [77] ได้ใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งความร้อน (เพื่อจำลองเตาฟืน) และอุณหภูมิทางด้านเย็นถูกควบคุมโดยอัตราการไหลของน้ำเย็นจากก๊อกน้ำ เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโมดูลหาได้จาก $(T_H + T_C) / 2$ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ได้กับความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากัน แสดงในรูปที่ 2.33 กุลดาซี และคณะ [48] ออกแบบอะลูมิเนียมรูปทรงลูกบาศก์ใช้ในการทำช่องทางน้ำซึ่งนำไปแนบติดกับทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.9 วัตต์ Brazdil and Pospisil [23] ทำการทดสอบระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ โดยใช้โมดูลของสารกึ่งตัวนำบิสมัทเทลลูไรด์ที่ใช้ในเชิงการค้ามาติดตั้งที่ท่อไอเสียและหม้อไอน้ำเมื่อตัวระบบเชื่อมกับหม้อไอน้ำ การเผาไหม้ของก๊าซจะไหลผ่านระบบและผ่านตัวคริสบายความร้อนซึ่งวางอยู่ในท่อ โดยมีการใช้น้ำหล่อเย็นรักษาอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลระหว่าง 25 องศาเซลเซียส และ 27 องศาเซลเซียส จากนั้นท่อไอเสียมีอุณหภูมิสูงสุดถึง 185 องศาเซลเซียส และทำการวัดกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด 8.5 วัตต์



รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางด้านร้อนกับกระแสเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิทางด้านร้อนและอุณหภูมิทางด้านเย็น

จากการตรวจสอบในข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการนำระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ติดตั้งกับเตาโดยมีการระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นจากปั๊ม ซึ่งตอบสนองความต้องการของผู้คนในประเทศ คือสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน ต่อมา Gasunie วิจัยและทำการแก้ไขโมดูลของบริษัท Hi-Z โดยเพิ่มความร้อนให้กับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งใช้พลังงานเข้าไปขับเคลื่อนให้กับ

ระบบ [16,17] ในครั้งแรกกับการสร้างหม้อไอน้ำโดยบริษัท Hi-Z ซึ่งติดตั้งโดยใช้โมดูลรุ่น HZ-13 ที่มีรูปทรงหกเหลี่ยม เมื่อมีความร้อนเข้ามาจะสามารถระบายความร้อนโดยใช้แผ่นทำความเย็นจำนวน 6 แผ่น และได้พลังงานขั้นต้น 75 วัตต์ จากนั้นประสบความสำเร็จอย่างมากในการสร้างหม้อไอน้ำตัวที่สองคือ กำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด 80 วัตต์ ซึ่งใช้เทอร์โมอิเล็กทริกกรุ่น HZ-20 จำนวน 10 โมดูล ในการระบายความร้อนผ่านครีบอลูมิเนียมกับน้ำ ต่อมาได้มีการสร้างหม้อไอน้ำตัวที่สามขึ้นโดย Gasunie เขาได้ทำการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกกรุ่น HZ-20 จำนวน 6 โมดูล ซึ่งติดตั้งที่ผิวครีบบระบายความร้อนและกำลังไฟฟ้าผลิตได้อยู่ที่ 60 วัตต์ โรลด์และคณะ ทำการยึดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลกับแหล่งความร้อนและถังน้ำ ซึ่งศูนย์กลางในการรวมระบบการทำความร้อน แสดงในรูปที่ 2.34 โดยที่ทางด้านร้อนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ตั้งอยู่ในทางการไหลของอากาศและทางด้านเย็นติดกับการไหลเวียนของน้ำ ซึ่งความร้อนที่เข้าไปประมาณ 5% ถูกแปลงเป็นไฟฟ้าและความร้อนส่วนที่เหลือเปลี่ยนไปเป็นน้ำร้อนเพื่อนำความร้อนไปยังระบบหม้อน้ำ



รูปที่ 2.34 ศูนย์กลางการระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก

ศูนย์พลังงานชีวภาพประเทศออสเตรเลีย [62-64] ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้ม โดยใช้โมดูลทั้งหมด 16 ตัว ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 168 วัตต์ เมื่อมีความร้อนเข้ามาในระบบจะระบายความร้อนโดยใช้น้ำหมุนเวียน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของระบบการทำความร้อนจะใช้เทอร์โมอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำ เลท-เทลลูไรด์ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qiu and Hayden [83-86] จากนั้นจึงได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 550 วัตต์ ความแตกต่างระหว่างรอยต่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็น 535 องศาเซลเซียส สำหรับความร้อนที่ไหลเข้ามาและอุณหภูมิในการเผาไหม้จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพิ่มขึ้น โดยจะต้องมีการถ่ายเทความร้อนในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น Alanne และคณะ [12,13] ทำการวิเคราะห์ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกภายในประเทศ เมื่อมีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกเข้าไปในห้องเผาไหม้โดยตรง ทำให้เกิดการพาความร้อนจากเตาไปยังหม้อไอน้ำ โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยที่สุดและความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุด ซึ่งมีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกติดกับห้องเผาไหม้หรือ ออกแบบเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงถึง 660 องศาเซลเซียส และสามารถกำหนดอุณหภูมิทางด้านร้อนได้ถึง 750 องศาเซลเซียส โดยที่ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุด 1.9 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าอยู่ที่ 8.9 %

ในการออกแบบการระบายความร้อนด้วยน้ำจะช่วยลดพื้นที่ในการระบายความร้อนทางด้านเย็นได้มากขึ้น ซึ่งได้ทำการเพิ่มขึ้นส่วนของปั๊ม บล็อกการระบายความร้อน หม้อไอน้ำ และอาจจะเป็นพัดลม นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้น้ำระบายความร้อนมีค่าสูงสุด เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนความร้อนทางด้านร้อนซึ่งได้ทำการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกจะระบายความร้อนให้กับน้ำ สามารถนำไฟฟ้าที่ได้บางส่วนใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งการพาความร้อนแบบบังคับด้วยน้ำเป็นวิธีการที่น่าสนใจสำหรับการใช้ความร้อนเข้าไปเคลื่อนให้กับระบบที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้ น้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบระบายความร้อนที่กล่าวในก่อนหน้านี้นี้สามารถใช้กับที่อยู่อาศัยได้

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประเภทการระบายความร้อนที่นำไปใช้กับเตาสุรูปไว้ดังตารางที่ 2.6 โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จะสัมพันธ์กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบระบายความร้อน วิธีการระบายความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ คือ การพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้น้ำระบายความร้อน ตามด้วยการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้อากาศระบายความร้อน การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้น้ำระบายความร้อน และการพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยใช้อากาศระบายความร้อน สำหรับการเลือก ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตานั้นจะต้องปรับปรุงระบบระบายความร้อนซึ่งเป็นวิธีการที่จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด ยกตัวอย่างเช่น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สำหรับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์อยู่ที่ 1 วัตต์ต่อโมดูล โดยโมดูลที่ใช้คือรุ่น HZ-20 มีความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบนั้นมีการระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ [77] และได้มีการระบายความร้อนโดยใช้ฮีทซิงค์ ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าสูงถึง 4.2 วัตต์ ความแตกต่างของอุณหภูมิ 256 องศาเซลเซียส [49] จากนั้นจึงมีการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลของบริษัท Tellurex รุ่น G1-1.4-219-1.14 [61] กำลังไฟฟ้าที่ได้อยู่ที่ 3.4 วัตต์ ความแตกต่างของอุณหภูมิ 158 องศาเซลเซียส ต่อมาได้มีการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเดียวกัน ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 5.7 วัตต์ ความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส [77] ในทำนองเดียวกันได้มีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลรุ่น TEP1-12656-0.6 จากบริษัทเทอร์โมนามิกส์ มีการระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศ [73] และน้ำ [48] กำลังไฟฟ้าที่ได้อยู่ที่ 4 วัตต์ และ 7.9 วัตต์ ตามลำดับ โดยได้มีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลรุ่น TEP1-12656-0.8 จากบริษัทเทอร์โมนามิกส์ ซึ่งระบายความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศ และน้ำ ความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่ 160 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1.7 วัตต์ และ 2.3 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งระบบที่ระบายความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับด้วยน้ำ [16,17] จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึง 10 วัตต์ต่อโมดูล นอกเหนือจากการทำระบบความเย็นแล้วการนำระบบเทอร์

โมอิลีกทริกเจนเนอร์เรเตอร์กับเตาไปใช้ในที่ต่างๆก็มีความสำคัญ ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบทั้งหมดอาจจะไม่ได้ขึ้นกับกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพเท่านั้น แต่ยังมีเกณฑ์การเลือกอื่นๆ เช่น ค่าใช้จ่าย เสียง และนอกจากนี้ยังต้องพิจารณาในเรื่องของเสถียรภาพ

ตารางที่ 2.6 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประเภทการระบายความร้อนที่นำไปใช้กับเตา

Heat sink	Watt/ module	ΔT	Module	Manufacturer	References
Air natural convection	1 W	100	HZ-20	Hi-Z	Nuwayhid et al. [77].
Air natural convection	4.2 W	256	HZ-20	Hi-Z	Nuwayhid et al [62].
Air natural convection	3.4 W	127	HZ-20	Hi-Z	Nuwayhid et al [77].
Air natural convection	2.4 W	150	TEP1-1264-3.4	Thermonamic	Lertsatitthana korn [51]
Air forced convection	3.5 W		HZ-20	Hi-Z	Killander et al. [58,59].
Air forced convection	N/A	-	HZ-20	Hi-Z	Bass and Thelin [20]
Air forced convection	5-10 W		HZ-14	Hi-Z	Mal et al. [79].
Air forced convection	5 W		HZ-14	Hi-Z	Srivastava et al. [108-110].
Air forced convection	5.3 W	210	TEG 12610-5.1	Tecteg	O'Shaughnessy et al. [76].
Air forced convection	4 W		TEP1-12656-0.6	Thermonamic	Mastbergen et al. [73].
Air forced convection	1.7 W	160	TEP1-12656-0.8	Thermonamic	Champier et al [31].
Water natural convection	2.3 W	160	TEP1-12656-0.8	Thermonamic	Champier et al. [31].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Heat sink	Watt/ module	ΔT	Module	Manufacturer	References
Water natural convection	7.6 W	120	TEP1-12656-0.6	Thermonamic	Champier et al. [32,47].
Water natural convection	3.4 W	158	G1-1.4-219-1.14	Tellurex	Juanicó et al. [61].
Water forced convection	5.7 W	100	G1-1.4-219-1.14	Tellurex	Rinalde et al. [77].
Water forced convection	7.9 W		TEP1-12656-0.6	Thermonamic	Goudarzi et al. [48].
Water forced convection	2.1 W	112.8	TEG-127-230-32e	Thermalforce	Brazdil and Pospisil [23].
Water forced convection	10 W		HZ-20	Hi-Z	Allen et al. [16,17].

2.7.4 การประเมินผลและการเลือกชิ้นส่วน

ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาจะขับเคลื่อนโดยใช้ชิ้นส่วนต่างๆในการแปลงความร้อนจากเตาไปเป็นไฟฟ้า ซึ่งส่วนประกอบของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จะต้องได้รับการออกแบบที่เหมาะสมเพื่อรักษาอุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็น โดยที่ผู้ผลิตได้กำหนดช่วงอุณหภูมิในการใช้งาน ประสิทธิภาพและความทนทาน ดังนั้นการประเมินผลและการเลือกองค์ประกอบที่เหมาะสม เช่น โมดูล ฮีทซิงค์ กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการทำงาน ซึ่งเป็นที่ต้องการมากสำหรับการออกแบบระบบ เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสุทธิตรงตามเป้าหมาย โดยที่ส่วนประกอบทั้งหมดจะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถทำได้โดยทำการประเมินส่วนประกอบของระบบในแต่ละส่วน

2.7.4.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นพื้นฐานในการแปลงความร้อนเป็นไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิที่ผิวทางด้านบนของเตาอยู่ในช่วง 150–350 องศาเซลเซียส และทำการเลือกโมดูลให้ตรงกับช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ เหล็กโคซิลิไซด์ เลทเทลลูไรด์ เป็นต้น ซึ่งโมดูลที่กล่าวมาอยู่บนพื้นฐานของบิสมีเทลลูไรด์ และวัสดุในแต่ละกลุ่มมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม เมื่อมีความร้อนเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ามากทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง ดังนั้นโมดูลที่นำมาใช้โดยทั่วไปจะต้องมีค่าคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสูง คุณสมบัติการติดกับวัสดุที่ดี เสถียรภาพดี ต้นทุนต่ำ ไม่เป็นพิษ และง่ายต่อการออกแบบ [77] ซึ่งมีบริษัทหลายๆแห่งได้ทำการผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกหลายประเภทสำหรับใช้ในทางการค้า เช่น Hi-Z [49] Tellurex [87] Tecteg [88] จากประเทศสหรัฐอเมริกา Thermalforce [89] จากประเทศเยอรมนี และ thermonamic จากประเทศจีน [90] จึงได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมอิล็กทริกเจนนอร์เรเตอร์และราคาของแต่ละบริษัท แสดงในตารางที่ 2.7 จากตารางที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า บริษัท Thermonamic ของประเทศจีน และบริษัท Thermalforce ของประเทศเยอรมนีสามารถจัดส่งโมดูลในราคาที่ต่ำกว่า โดยต้นทุนในการผลิตระบบเทอร์โมอิล็กทริกเจนนอร์เรเตอร์ในเตาคิดเป็นประมาณ 30-50% ของต้นทุนทั้งหมด ดังนั้นจึงมีสถาบันการวิจัยหลายที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายสำหรับระบบเทอร์โมอิล็กทริกเจนนอร์เรเตอร์ ซึ่งทำโดยปรับปรุงประสิทธิภาพและหาวัสดุที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบเทอร์โมอิล็กทริกเจนนอร์เรเตอร์และราคาของแต่ละบริษัท

Component	Unit	HZ20	HZ14	G1-1.4-219-1.14	TEG-12610-5.1	TEG-127-230-32e	TEP1-12656-0.6	TEP1-12656-0.8
		Ref [49].	Ref [49].	Ref [87].	Ref [88].	Ref [89].	Ref [90].	Ref [90].
Voltage	V	5.0	3.5	4.8	7.2	11.3	8.8	9.9
Current	A	8.0	8	1.2	2.0	2.3	3.68	2.9
Power	W	19	14	5.7	7.1	13.3	16.2	14.5
Size	mm	75*75	62.7*62.7	54*54	40*40	40*40	56*56	56*56
Number of couples		71	49	219	126	127	126	126
Hot face	°C	230	230	150	300	200	300	300
Cold face	°C	30	30	50	30	20	30	30
Maximum hot operating temperature	°C	250	250	175	330	230	330	330
Heat flux	W/cm ²	9.54	9.54	-	9.2	13.93	9.0	7.9
Cost of the module	US \$	99.0	70.0	42	30	41	50	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Component	Unit	HZ20	HZ14	G1-1.4-219-1.14	TEG 12610-5.1	TEG-127-230-32e	TEP1-12656-0.6	TEP1-12656-0.8
Cost per watt	US \$/W	5.2	5.0	7.36	4.08	3.08	3.09	3.45

นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกจะขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็น โดยทำการใช้คุณสมบัติของโมดูลที่กล่าวมาซึ่งระบุโดย Nuwayhid and Hamade [77] and Juanicó et al. [61], เพื่อหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดจากทฤษฎีแสดงได้ดังสมการ (2.45)

$$P_{\max} = C \times 10^{-4} \Delta T^2 W \quad (2.45)$$

โมดูลรุ่น HZ-20 และ G1-1.4-219-1.14 มีค่า C คือ 5 , W คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพราะกำลังไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิกำลังสอง เมื่อการทำงานของโมดูลที่อุณหภูมิสูงทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิจะเหลือเพียงหนึ่งในสี่ที่นำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า จึงได้กำหนดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพระบุโดยผู้ผลิต เมื่อระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะต่ำมาก โดยทั่วไปมีค่าใกล้เคียง 1% เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อนและเย็นต่ำ ดังนั้น จึงได้ทำการย้ายระบบเพื่อสร้างกำลังไฟฟ้า 5 วัตต์ และ 500 วัตต์ โดยจะต้องมีการแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่รวมทั้งมีประสิทธิภาพของพัดลมระบายความร้อน ส่วนประกอบเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง จึงได้ทำการใช้วัสดุที่มีราคาต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากในการนำโมดูลแต่ละประเภทประเมินการทำงานของระบบทั้งหมด

ดังนั้นการเลือกขนาดของโมดูลที่ถูกต้องสามารถทำได้พร้อมกับการวิเคราะห์การระบายความร้อน จึงได้มีการกำหนดการระบายความร้อน โดยโมดูลที่มีกำลังไฟฟ้าสูงจะทำให้โมดูลที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำมีการนำไปใช้น้อยกว่า นอกจากนี้ที่อุณหภูมิต่ำยังทำให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้โมดูลที่มีอุณหภูมิต่ำต้องรับความร้อนมากขึ้นเพื่อทำการผลิตไฟฟ้า และในการเลือกโมดูลที่นอกเหนือจากค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพ คือ อุณหภูมิ เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลซึ่งอุณหภูมิทางด้านร้อนที่สามารถทำงานได้สูงสุดจากบริษัท Thermonamic และ Tecteg อยู่ที่ 330 องศาเซลเซียส ตามด้วยบริษัท Hi-Z 250 องศาเซลเซียส บริษัท Thermalforce 230 องศาเซลเซียส และบริษัท Tellurex 150 องศาเซลเซียส

2.7.4.2 การแลกเปลี่ยนความร้อน

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดจากระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ สามารถดูได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อนและด้านเย็นมากที่สุด เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนไม่เกินขีดจำกัดการทำงาน และเป็นสิ่งจำเป็นมากที่จะเข้าใจลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนและคาดการณ์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ซึ่งในการแลกเปลี่ยนความร้อนทางด้านร้อนมีสำคัญน้อย เมื่ออุณหภูมิ

ภายในเตาสูงถึง 600 องศาเซลเซียส ในขณะที่โมดูลในทางการค้าสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และโดยส่วนใหญ่ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จะรักษาอุณหภูมิทางด้านเย็นต่ำที่สุดเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด

ความต้านทานเชิงความร้อนเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิทางด้านเย็นของโมดูล ส่วนหนึ่งของอุณหภูมิทางด้านเย็นถูกควบคุมด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิของโมดูลในการผลิตกำลังไฟฟ้า ในการระบายความร้อนสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นสิ่งจำเป็นมาก โดยต้องมีการกำหนดการใช้งานและคุณสมบัติของโมดูล โดยที่ส่วนประกอบของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ในแต่ละส่วนจะมีความต้านทานเชิงความร้อนซึ่งสัมพันธ์กับความต้านทานเชิงความร้อนของโมดูล (R_m) ความต้านทานในการระบายความร้อน (R_{cs}) อุณหภูมิทางด้านร้อน อุณหภูมิทางด้านเย็น และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถดูได้จากการวาดรูปวงจรความต้านทานเชิงความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.35 ดังนั้นจึงได้ทำแบบจำลองในการคำนวณอัตราการไหลของร้อนเข้ามาในระบบ (Q) ผ่านวงจร ซึ่งหาได้จากสมการ (2.46)

$$Q = (T_H - T_C) / R_m \quad (2.46)$$

จึงได้ทำการนำค่า Q จากสมการที่ (2.46) ลงในสมการที่ (2.47) เพื่อทำการหาความต้านทานเชิงความร้อนสำหรับการระบายความร้อน

$$R_{cs} = \left(\frac{T_h - T_{amb}}{Q} \right) - R_m \quad (2.47)$$



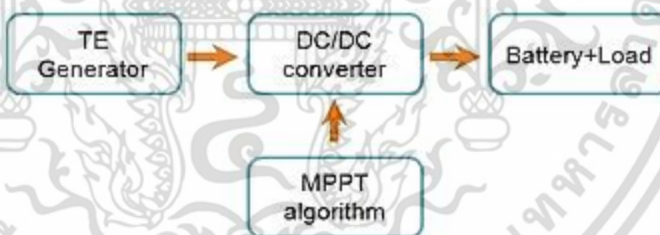
รูปที่ 2.35 วงจรความต้านทานเชิงความร้อน

เมื่ออุณหภูมิทางด้านเย็นยิ่งต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนทางด้านเย็นมากขึ้น เพราะกำลังไฟฟ้าแปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิกำลังสอง ดังนั้น ในการออกแบบตัวระบายความร้อนที่เหมาะสม ควรรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของโมดูล โดยที่ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ร่วมกับเตาจะสามารถเลือกการระบายความร้อนและสถานที่ในการออกแบบได้ โดยจะต้องมีระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และในการระบายความร้อนให้กับระบบนั้นจะประกอบไปด้วยท่อความร้อน thermosyphonic ที่มีพื้นผิวสูง เพื่อให้มีความต้านทานเชิงความร้อนต่ำและความแตกต่างของอุณหภูมิสูง ส่วนใหญ่ระบบนั้นจะอยู่ติดตั้งที่ด้านบนหรือด้านข้างของเตา ซึ่งเป็นไปได้ยากมากที่การระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติทำให้ความต้านทานเชิงความร้อนลดลงและอุณหภูมิสูง ดังนั้นในการออกแบบระบบจะใช้การพาความร้อนแบบบังคับเพื่อไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ผลกระทบของอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านระบบ เมื่อทำการการระบายความร้อนทำให้ความต้านทานเชิงความร้อนต่ำ ในงานต่อไปมุ่งเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการ

ระบายความร้อนโดยใช้แบบจำลอง CFD นอกจากนี้ระบบที่ออกแบบจะต้องมีอุณหภูมิที่ใช้สูงและลดความต้านทานเชิงความร้อนของโมดูล

2.7.4.3 การจัดการระบบผลิตกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล คือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโมดูล จะทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน นอกจากนี้แรงดันขาออกของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เพราะรูปแบบการจัดการพลังงาน แสดงในรูปที่ 2.36 ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นมากในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและภาระทางไฟฟ้า เช่น พัดลม ปั๊ม และไฟ ในการจัดการระบบผลิตกำลังไฟฟ้าได้รับการพัฒนาและทำการประเมินก่อนหน้า บลาสและคณะ [20,58-59] O'Shaughnessy และคณะ [76] และแซมเพียร์เออร์ และคณะ [31-32,47] ทำการเลือกไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อแปลงแรงดันขาออกสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด โดยมีการควบคุมหรือเพื่อให้เป็นแหล่งพลังงานในการนำไปใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น อุปกรณ์ USB O'Shaughnessy และคณะ [78,79] ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ซึ่งทำการชาร์จแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมเหล็กฟอสเฟตได้ 3.3 โวลต์ และแบตเตอรี่นั้นยังสามารถปล่อยออกมาใช้งานได้บางส่วนโดยไม่ก่อให้เกิดเสียหาย คินเซลลา และคณะ [52] วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกให้กับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมเหล็กฟอสเฟต พบว่าเป็นประโยชน์ต่อการแปลงไฟฟ้ากระแสตรง และอุณหภูมิที่ได้ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งตรงข้ามกับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ แต่ความแตกต่างอุณหภูมิของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากขึ้นจะถูกส่งไปยังแบตเตอรี่เพื่อทำการชาร์จโดยตรง



รูปที่ 2.36 รูปแบบการจัดการพลังงาน

กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สามารถทำได้เมื่อความต้านทานที่ต่อตรงกับความต้านทานภายในของโมดูล แต่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าจะต่างจากแรงดันที่ต่อโดยภาระทางไฟฟ้า ต้องการให้โมดูลทำงานเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งอาจจะดูจากการเพิ่มหรือลดของแรงดันไฟฟ้า ในการจัดการระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจะต้องมีการตรวจสอบและทำการเปลี่ยนแปลงโมดูลที่เหมาะสม ซึ่งในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะต้องทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและจัดเก็บไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่เพื่อสามารถนำมาใช้ได้ตลอดทั้งวัน เพราะระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สามารถทำได้ที่ต่อเมื่อเตาทำงาน โดยแบตเตอรี่ในเชิงการค้ามีความหลากหลาย เช่น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลไฮไดรด์ และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมเหล็กฟอสเฟต ในการเลือกลักษณะของแบตเตอรี่

มีหลายลักษณะ เช่น ราคา ความหนาแน่นของพลังงาน เป็นต้น ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์นั้นจะต้องมีความต้านทานของแบตเตอรี่เทียบเท่ากับความต้านทานภายในของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงควรเปลี่ยนความต้านทานของโหลดแล้วใช้อุปกรณ์ในการหาจุดที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

2.7.5 การประเมินผลในทางเศรษฐกิจ

การประเมินผลทางเศรษฐกิจเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกในเตาชีวมวล เมื่อก่อนหน้านี้ได้ทำการอ้างอิงการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจ สรุปไว้ในตารางที่ 2.8 โดยได้ทำการคำนวณค่าใช้จ่ายชนิดของตัวระบายความร้อนที่แตกต่างกันเป็นไปตามราคาของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล อัลลอน และมาลลอน [16] ได้เสนอการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจระหว่างหม้อไอน้ำแบบขับเคลื่อนและแบบธรรมดา คาดว่าต้นทุนในการผลิตหม้อไอน้ำแบบขับเคลื่อนเพิ่มถึง 225 ดอลลาร์ และอีก 4.1 ดอลลาร์ สำหรับปรับปรุงหม้อไอน้ำแบบธรรมดา ซึ่งใช้ระยะเวลา 11 ปี ในการคืนทุน เมื่อใช้งาน 100 วัตต์ สำหรับหม้อไอน้ำแบบธรรมดา จากนั้น Lertsatitthanakorn และคณะ [51] เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการออกแบบระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาชีวมวล ปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่ทั้งสองอยู่ที่ 1.8 วัตต์ และระยะเวลาในการคืนทุนสำหรับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาชีวมวล 0.74 ปี เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา ซึ่งได้ดำเนินการจ่ายไฟให้กับแบตเตอรี่ 365 ชั่วโมง ต่อมารามัน และคณะ [104] เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์โดยใช้เตาหุงต้มเป็นแหล่งจ่ายไฟภายนอก ซึ่งได้มีการรวมวัสดุที่ใช้ในระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เพื่อนำมาใช้กับเตาหุงต้ม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าที่จะใช้แรงขับเคลื่อนให้กับเตาหุงต้ม และต้นทุนในการเลือกส่วนประกอบของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์โดยรวมกับเตาหุงต้มอยู่ที่ 46% ของราคาเตาหุงต้ม นอกจากนี้ประโยชน์ของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้ม คือ ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟสำรอง ในการศึกษาของ Mastbergen [73] ต้นทุนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับการพาความร้อนแบบบังคับด้วยอากาศอยู่ที่ 72 ดอลลาร์ และราคาต่อวัตต์อยู่ที่ 4.80 ดอลลาร์ สำหรับการเปรียบเทียบราคาต่อวัตต์ของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามงานวิจัยของ แซมเพียร์เออร์ และคณะ [32] อยู่ที่ประมาณ 13 ยูโรต่อวัตต์ และ 10 วัตต์ สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศฝรั่งเศส ในขณะที่ราคาต่อวัตต์ของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ อยู่ที่ประมาณ 5 ยูโร ซึ่งราคาต่อวัตต์สำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถแข่งขันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Juanicóla et al. [77] รายงานว่าระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับคนในชนบทเพราะมีความต้องการทางแสงในเวลากลางคืน

ตารางที่ 2.8 การวิเคราะห์การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกกับเตาชีวมวลในทางเศรษฐกิจ

Components	Electric power	Module cost	Auxiliary cost	Total cost	Cost/Watt	References
Air natural convection	2.4 W	-	-	\$60.0	\$25.0	Lertsatitthanakorn [51]
Air forced convection	15 W	\$30.0	\$42.0	\$72.0	\$4.8	Mastbergen [73]
Air forced convection	88 W	\$264.0	\$290.0	\$554.0	\$6.3	Kinsella et al. [52].
Air forced convection	4.5 W	\$23.0	\$2.0	\$25.0	\$5.6	Raman et al. [104].
Water natural convection	8 W	€15.0	€25.0	€40.0	€5.0	Champier et al. [32].
Water forced convection	55 W	\$175.0	\$50.0	\$225.0	\$4.1	Allen and Mallon [16].

โดยส่วนใหญ่ราคาของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ติดตั้งกับเตาจะเกี่ยวข้องกับระบบระบายความร้อน จากตารางที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าราคาต่อระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ต่ำกว่า 10 ดอลลาร์ ซึ่งราคาส่วนใหญ่ค่อนข้างสูง ในการลงทุนของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาสูงเกินไปเนื่องจากระยะเวลาในการคืนทุนนาน ดังนั้น ในกรณีที่มีค่าใช้จ่ายลดลงและปรับปรุงประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดีขึ้น เมื่อใช้วิธีการผลิตโดยมวลจะช่วยลดค่าใช้จ่ายประมาณ 1 ดอลลาร์ต่อวัตต์ ทำให้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกและการใช้วัสดุใหม่ๆ นอกจากนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นด้วย แม้ว่าการเพิ่มเทอร์โมอิเล็กทริกลงไปในเตาจะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น แต่ก็สามารถช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์และการให้ไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ห่างไกล

2.7.6 สรุปและการทำงานในอนาคต

การทบทวนนี้ทำให้ได้ภาพรวมของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้ม ซึ่งมีผู้คนหลายท่านมีแนวคิดในการออกแบบระบบที่มีศักยภาพเพื่อทำการประเมินการระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกที่ผ่านการทบทวนวรรณกรรมโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล การระบายความร้อน การแปลงไฟฟ้ากระแสตรง และแบตเตอรี่ โดยได้ทำการประเมินและวิเคราะห์ในทางเศรษฐกิจของระบบที่กล่าวมาในข้างต้น ซึ่งในการเกิดเทคโนโลยีใดๆจึงกลายเป็นที่น่าสนใจสำหรับทางการพัฒนาเศรษฐกิจ การทบทวนที่กล่าวมานั้นได้มีการนำเสนอแนวทางในการเลือกสถานที่ติดตั้งที่เหมาะสม วัสดุที่ใช้ในการติดตั้ง ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนและระบบหล่อเย็น

การวิจัยในภายภาคหน้าเป็นสิ่งสำคัญมาก โดยได้ทำการแบ่งรายละเอียดดังต่อไปนี้ (1) การค้นพบคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสูง เป็นเป้าหมายสำคัญสำหรับการวิจัยระบบเทอร์โมอิเล็กทริก เจนเนอเรเตอร์กับเตาหุงต้ม (2) การวิเคราะห์ทางทฤษฎีด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ และระบบการระบายความร้อนรวมถึงการวิเคราะห์การศึกษาอุณหภูมิของเตา การเลือกที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริก และการปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อน (3) การออกแบบระบบระบายความร้อนควรจะรวมกับอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนเพื่อให้ความร้อนผ่านระบบได้อย่างทั่วถึง และสามารถนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ (4) โครงสร้างและความต้านทานเชิงความร้อนทางด้านร้อนมีความสำคัญในการออกแบบการระบายความร้อน ดังนั้นจึงได้มีการจัดการเกี่ยวกับการแปรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเตา (5) งานอื่นๆควรให้ความสำคัญกับการออกแบบการควบคุมความร้อนที่ใช้งาน และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (6) เกณฑ์การออกแบบระบบ เช่น ราคา เสี่ยง และการเลือกใช้พลังงานที่เหมาะสม



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลในทางทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก จึงทำให้งานวิจัยมีแนวคิดที่จะนำความร้อนจากเตาหุงต้มมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อให้ระบบที่ออกแบบสามารถระบายความร้อนและมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในบทนี้จะแสดงขั้นตอนการวิจัยและอุปกรณ์ต่างๆที่เลือกใช้ ดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและโครงสร้างภายในของท่อความร้อน

ตารางที่ 3.1 การเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาใช้ในงานวิจัย

spec thermoelectric	Cost (Bath)	η (%)	Power (watt)	Q_h (watt)	Q_c (watt)
TEHP1-12656-0.3	4150	4.25-5.9%	5-12	117.65-210.52	112.65-198.52
TEHP1-24156-1.2	4150	4.3-5.8%	4.5-12	104.65-206.90	100.15-194.9

ตารางที่ 3.1 การเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาใช้ในงานวิจัยจากบริษัท Thermonamic Electronics จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า อุณหภูมิของเตาหุงต้มอยู่ในช่วง 150-250 °C จึงได้มีการกำหนดอุณหภูมิทางด้านร้อนในช่วง 200-250 °C ทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกในช่วง 50-80 °C เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ดังนั้นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ TEHP1-12656-0.3 แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นโมดูลที่ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้า โดยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลทำมาจากสารกึ่งตัวนำโดยใช้บิสมัทเทลลูไรด์ (Bismuth telluride ; Bi_2Te_3) ขนาด 5.6 x 5.6 เซนติเมตร สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่อเนื่องถึง 400 และอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-12656-0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{P}{Q_h} \quad (3.1)$$

$$Q_h = w + Q_c \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-12656-0.3 จากผู้ผลิต

Hot side Temperature (°C)	300
Cold side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	8.4
Matched Load Resistance (ohms)	0.9
Matched Load Output Voltage (V)	4.2
Matched Load Output Current (A)	4.6
Matched Load Output Power (W)	19.3
Heat Flow Across The Module (W)	306
Heat Flow Density (W/cm ²)	9.8

ตารางที่ 3.3 การเลือกโครงสร้างภายในของท่อความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย

wick structure	Cost (Bath)	Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	R _{pipe} (K/w)	Q _c (w)
sintered	765.34	150	6	6	0.02-0.03	65
groove	802.93	150	6	6	0.02-0.03	65
Groove+sintered	918.74	300	8	8	0.002-0.007	65
Groove+sintered	1106.24	150	8	4.5	0.003-0.015	70

ตารางที่ 3.3 แสดงการเลือกโครงสร้างท่อความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยจะพิจารณาอยู่ 3 ชนิด คือ แบบผงโลหะ แบบร่องตามแนวแกน และแบบผสมระหว่างผงโลหะกับร่องตามแนวแกน ซึ่งในแต่ละชนิดก็จะมีราคา ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา ความต้านทานของท่อความร้อน และการระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกโครงสร้างภายในของท่อความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย โดยดูจากการนำจุดเด่นและจุดด้อยของแบบผงโลหะ และแบบร่องตามแนวแกน จะพบว่าเมื่อมีการรวมโครงสร้างภายในของท่อความร้อนทั้งสองจะทำให้สามารถระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.2 จึงทำให้เลือกโครงสร้างภายในของท่อความร้อนแบบผสมระหว่างผงโลหะกับแบบร่องตามแนวแกน

จากการศึกษาข้อมูลในหัวข้อ 3.1 งานวิจัยจึงทำการเลือกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและท่อความร้อน เพื่อทำการสร้างระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อนซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2

3.2 การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1.1 ท่อความร้อน

ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก และสามารถระบายความร้อนเป็นแบบธรรมชาติ (Passive Cooling) ซึ่งส่วนประกอบของท่อความร้อนจะเป็นโลหะที่ทำมาจากทองแดงมีลักษณะปิดหัวปิดท้าย ภายในเป็นระบบสุญญากาศที่มีสารทำงานบรรจุอยู่ (Working Fluid) โดยมีน้ำเป็นสารทำความเย็น (Refrigerant) บรรจุอยู่ภายใน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ท่อความร้อน

3.2.1.2 แผ่นทองแดง

ทองแดงจัดเป็นโลหะอ่อนสามารถทำเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย นำความร้อนได้ดี มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง ซึ่งจุดเด่นของทองแดง คือ ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เช่น น้ำทะเล เป็นต้น ในการใช้แผ่นทองแดงสำหรับการออกแบบมีขนาด $6.3 \times 11.6 \times 2$ เซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น เพื่อใช้สำหรับกวดทับทางด้านบนของเทอร์โมอิเล็กทริก (TE)



รูปที่ 3.3 แผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 แผ่นอะลูมิเนียม

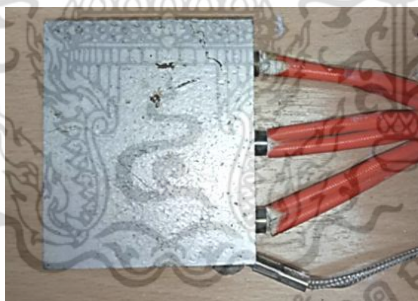
อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติยึดตัวได้ง่ายและมีความเหนียวมาก ทำให้สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆได้ง่าย ซึ่งจุดเด่นของอะลูมิเนียม คือ จุดหลอมเหลวต่ำ ค่าการนำไฟฟ้าที่ดี และการนำความร้อนสูงรองจากทองแดง ในการใช้แผ่นอะลูมิเนียมสำหรับออกแบบมีขนาด 12 x 20 เซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น เพื่อใช้ประกบทางด้านล่างของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_c)



รูปที่ 3.4 แผ่นอะลูมิเนียม

3.2.1.4 ฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนและสามารถแบ่งออกได้อีกหลายประเภท ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยแบบที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบจะเป็นฮีตเตอร์แบบแผ่น เนื่องจากฮีตเตอร์ชนิดนี้สามารถให้ความร้อนกับชิ้นงานได้โดยตรงและมีขนาด

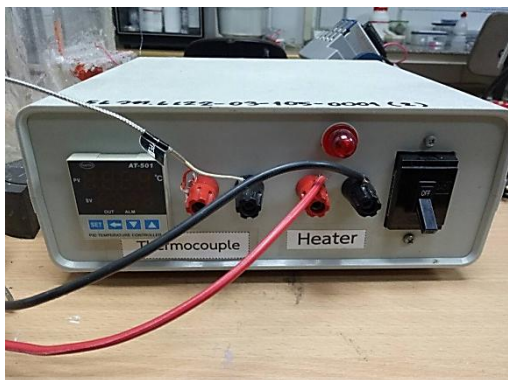


รูปที่ 3.5 ฮีตเตอร์

3.2.1.5 Temperature control

อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ คือ เครื่องควบคุมที่ทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณอินพุต (Input) จากเซนเซอร์ (Sensor) วัดอุณหภูมิ และส่งงานเอาต์พุต (Output) เพื่อไปควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 Temperature control

3.2.1.6 Thermocouple Type K

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คือ เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิซึ่งประกอบด้วยโลหะต่างชนิดกัน 2 เส้น เชื่อมปลายทั้งสองเข้าด้วยกันทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิของโลหะทั้งสองไม่เท่ากัน เทอร์โมคัปเปิลถูกใช้เป็นเซนเซอร์ (Sensor) สำหรับเครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิและยังใช้ในการแปลงค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นกระแสไฟฟ้าได้ โดยมีช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด -180 ถึง $+1300$ องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.7 Thermocouple Type K

3.2.1.7 ก่ออะคริลิก

อะคริลิก (Acrylic) เป็นแผ่นพลาสติกเรียบชนิด Thermoplastic ซึ่งผลิตจากน้ำยา MMA (Methyl Methacrylate) นำไปเข้าระบบหล่อแบบ (Casting System) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อได้รับความร้อนสูงจะอ่อนตัวลง สามารถตัดหรือขึ้นรูปเป็นแบบต่าง ๆ ได้ และเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัวและคงสภาพไว้ มีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อน ไฟฟ้า อีกทั้งไม่เป็นตัวนำความร้อน โดยก่อก่ออะคริลิกที่ออกแบบมีขนาด $24 \times 24 \times 24$ เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กล่องอะคริลิก

3.2.1.8 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติและคอมพิวเตอร์

จากการออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน จึงได้มีการนำระบบจัดเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติมาใช้ในการเก็บข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วย NI 9211 สำหรับวัดอุณหภูมิ , NI 9201 สำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า และ NI 9227 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเชื่อมต่อและจัดเก็บข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้อัตโนมัติทำการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพของระบบต่อไป



รูปที่ 3.9 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ



รูปที่ 3.10 คอมพิวเตอร์

3.2.1.9 เตาหุงต้ม

แหล่งพลังงานความร้อนที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ เตาหุงต้ม โดยนำระบบที่ออกแบบติดเข้ากับทางด้านใต้ส่วนที่เป็นรังผึ้งของเตาหุงต้ม โดยใช้ลวดทำการยึด



รูปที่ 3.11 เตาหุงต้ม

3.2.1.10 ถ่านดำ

ถ่านดำ คือ เชื้อเพลิงสำหรับหุงต้มอาหารในครัวเรือน แต่จริงแล้วถ่านมีสมบัติพิเศษอีกอย่างหนึ่ง คือ สามารถดูดซับกลิ่นเหม็นอับไม่พึงประสงค์ต่างๆ ได้ โดยถ่านดำที่นำมาใช้สำหรับระบบที่ออกแบบปริมาณอยู่ที่ 400 กรัม



รูปที่ 3.12 ถ่านดำ

3.2.1.11 กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal image camera)

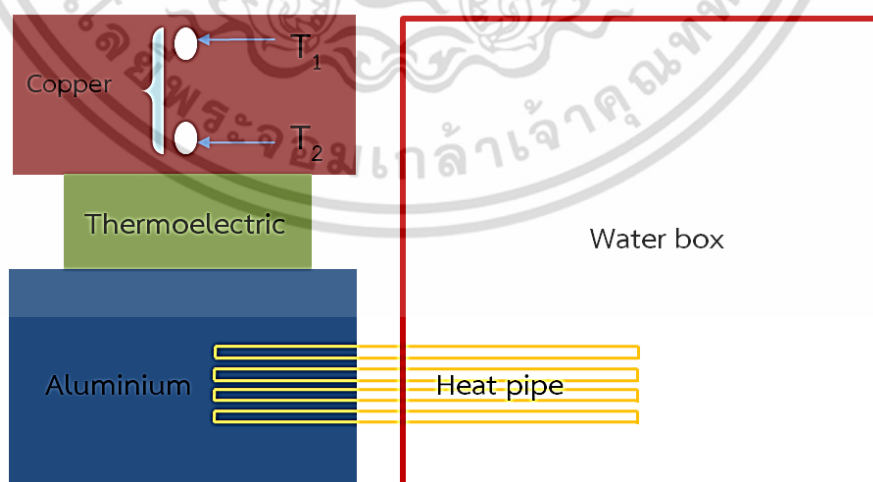
กล้องถ่ายภาพความร้อนประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดหลายตัว แต่ละตัวแสดงผลออกมาในรูปแบบของสีที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิของจุดนั้นๆ โดยทั่วไป สีแดงแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและสีน้ำเงินแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือโทนสีสว่างแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและโทนสีมืดแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว เมื่อนำมารวมกันจะประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า "ภาพถ่ายความร้อน (thermal image) "



รูปที่ 3.13 กล้องถ่ายภาพความร้อน

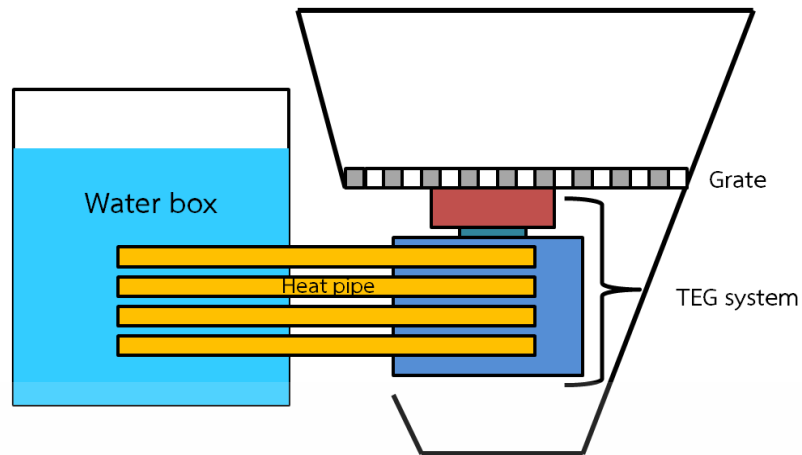
3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบ

ในการออกแบบระบบทำการใช้แผ่นทองแดงและอะลูมิเนียมจำนวน 1 แผ่น โดยที่แผ่นทองแดงขนาด $6.3 \times 11.6 \times 2$ เซนติเมตร จะวางส่วนบนสุดซึ่งติดเข้ากับด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งทางด้านข้างของแผ่นทองแดงทำการเจาะรู 2 รู ที่มีขนาด 3 มิลลิเมตร สำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน ($T_1 - T_2$) และแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 12×20 เซนติเมตร เป็นฐานสำหรับติดเข้ากับทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก โดยที่ทางด้านข้างของแผ่นอะลูมิเนียมจะทำการเจาะรูทั้งหมด 4 รู มีระยะห่างรู 1 เซนติเมตร เพื่อทำการสอดท่อความร้อนเข้าไปภายในแผ่นอะลูมิเนียมระยะ 10 เซนติเมตร และความยาวของท่อความร้อนที่เหลือ 20 เซนติเมตร จะทำการสอดเข้าไปภายในกล่องอะคริลิกที่ออกแบบซึ่งมีขนาด $25 \times 25 \times 25$ เซนติเมตรหนา 1 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.14(ก) จากนั้นจึงนำระบบที่ออกแบบมาติดตั้งทางด้านใต้รังผึ้งของเตาหุงต้ม แสดงดังรูปที่ 3.14(ข)



(ก)

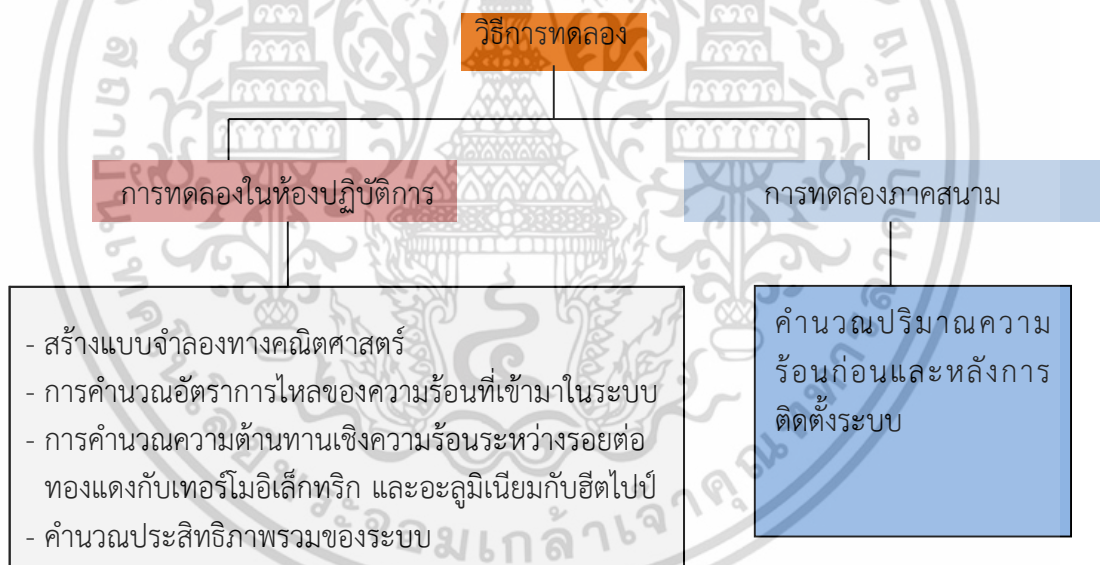
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.14(ก) และ (ข) การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน

3.3 วิธีการทดลอง



3.3.1 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปร 2 ตัวแปร คือ ตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม โดยที่ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ศึกษา คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน 150-250 องศาเซลเซียส , ปริมาตรของน้ำ 5-9 ลิตร และ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ , อุณหภูมิของน้ำ ซึ่งในการที่จะหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับตัวแปรตามที่ศึกษานั้นจะใช้วิธีการทางสถิติด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response surface methodology) โดยวิธีการนี้มีการออกแบบการทดลองหลายรูปแบบ ซึ่งแบบที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design) ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6 เมื่อได้การออกแบบการทดลองที่เลือกจึงกำหนดเงื่อนไขก็คือตัวแปรที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาซึ่งได้กล่าวไว้ในข้างต้นโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 ซึ่งมีการกำหนดปัจจัยระดับปัจจัย ตัวแปรผลตอบแทนที่ส่งผลต่อระบบ(ตัวแปรตาม) การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล (Anova) จากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางจะได้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยนำเงื่อนไขที่ได้ไปทำการทดลองจะได้ตัวแปรตามและเมื่อทำการทดลองครบทั้งหมดจึงนำการออกแบบการทดลองที่ได้วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ความแปรปรวน (Anova) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Welcome to Design-Expert® Software from Stat-Ease, Inc.

To get started, click on the File menu and select either

1. [New Design](#)
- or
2. [Open Design](#)

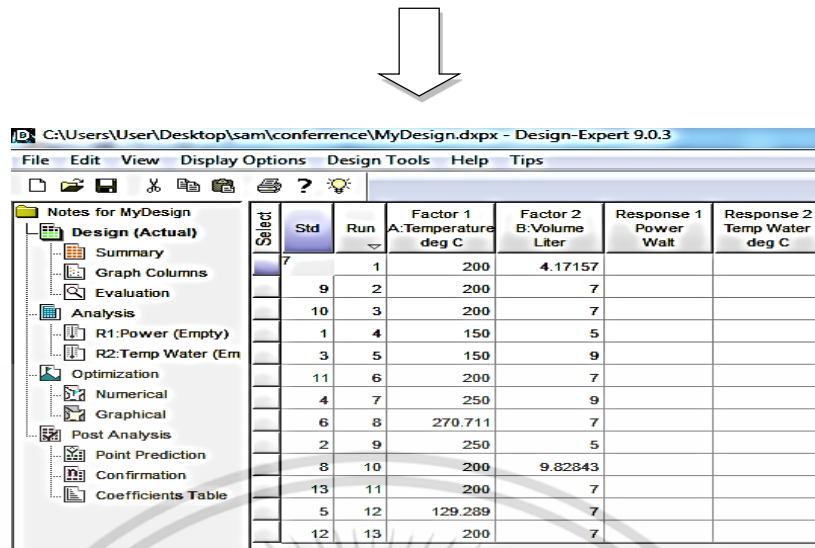
The image displays two screenshots of the Design-Expert 9.0.3 software interface. The top screenshot shows the 'Central Composite Design' setup. The 'Factorial' design type is selected, and the 'Central Composite' design is chosen from the list. The design parameters are: 2 Numeric factors (Temperature and Volume) and 0 Categorical factors. The design is set to be Horizontal. The table below shows the factor levels:

	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	Temperature	deg C	150	250	129.289	270.711
B [Numeric]	Volume	Liter	5	9	4.17157	9.82843

The bottom screenshot shows the 'Responses' section. The 'Responses' dropdown is set to 2. The table below shows the response levels:

Name	Units
Power	Watt
Temp Water	deg C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

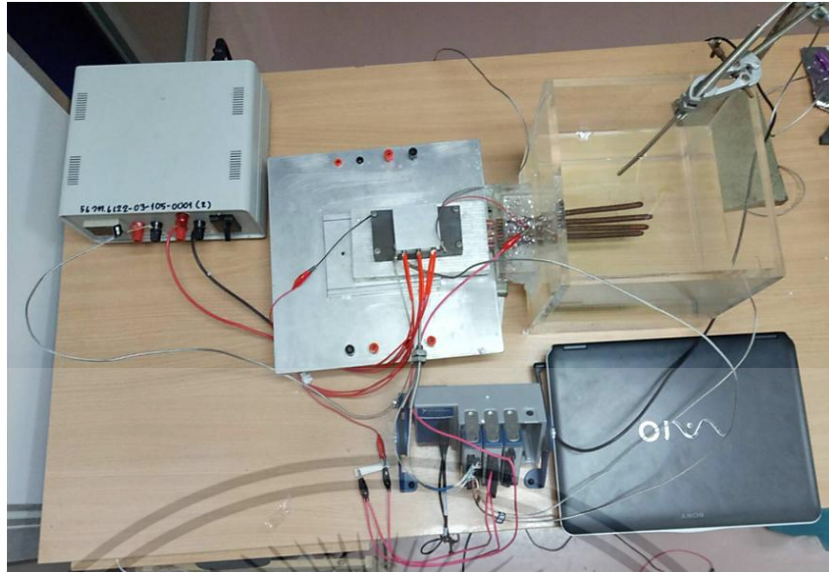


Std	Run	Factor 1 A: Temperature deg C	Factor 2 B: Volume Liter	Response 1 Power Watt	Response 2 Temp Water deg C
7	1	200	4.17157		
9	2	200	7		
10	3	200	7		
1	4	150	5		
3	5	150	9		
11	6	200	7		
4	7	250	9		
6	8	270.711	7		
2	9	250	5		
8	10	200	9.82843		
13	11	200	7		
5	12	129.289	7		
12	13	200	7		

รูปที่ 3.15 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

3.3.2 การทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการนั้นใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่เทอร์โมอิเล็กทริก โดยนำฮีตเตอร์วางติดกับแผ่นทองแดงที่อยู่ด้านบนสุดของระบบ (ติดกับทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก) และด้านเย็นติดกับฐานของแผ่นอะลูมิเนียม ทำการปรับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ตามการออกแบบการทดลอง จากนั้นจึงทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิทั้งหมด 4 จุด คือ T_1 และ T_2 คือ ความแตกต่างอุณหภูมิทางด้านร้อน , T_3 คือ อุณหภูมิทางด้านเย็น และ T_4 คือ อุณหภูมิน้ำ ซึ่งทำการวัดโดยใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติประกอบไปด้วย NI 9211 สำหรับวัดอุณหภูมิ , NI 9201 สำหรับความต่างศักย์ไฟฟ้า และ NI 9227 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยนำข้อมูลที่ได้ทำการคำนวณหาอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก และอะลูมิเนียมกับท่อความร้อนประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ



รูปที่ 3.16 การทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ ทำการวัด อุณหภูมิ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า

3.3.3 การทดสอบระบบโดยติดตั้งกับเตาหุงต้ม

ก่อนทำการทดสอบระบบโดยติดตั้งกับเตาหุงต้ม ทำการคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้ามาก่อนการติดตั้งทั้งหมด 3 ครั้ง หลังจากนั้นจึงนำระบบติดตั้งทางด้านใต้รังผึ้งของเตาหุงต้มโดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิ 2 จุด คือ อุณหภูมิของเตาหุงต้ม และอุณหภูมิของน้ำในหม้อ แสดงดังรูปที่ 3.17 และการนำระบบมาติดตั้งกับเตาหุงต้มทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิทั้งหมด 4 จุด คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน อุณหภูมิทางด้านเย็น อุณหภูมิของน้ำในกล่อง และอุณหภูมิของน้ำในหม้อ โดยใช้ NI 9211 , NI 9201 และ NI 9227 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.18 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความร้อนก่อนและหลังติดตั้งระบบ โดยใช้สมการที่ (3.3) [121] และ (3.4) และทำการถ่ายภาพความร้อนโดยใช้กล้อง FLIR E40

$$\eta = \frac{m_w C_{pw} (T_e - T_i) + m_{w, \text{evap}} H_l}{m_f H_f} \quad (3.3)$$

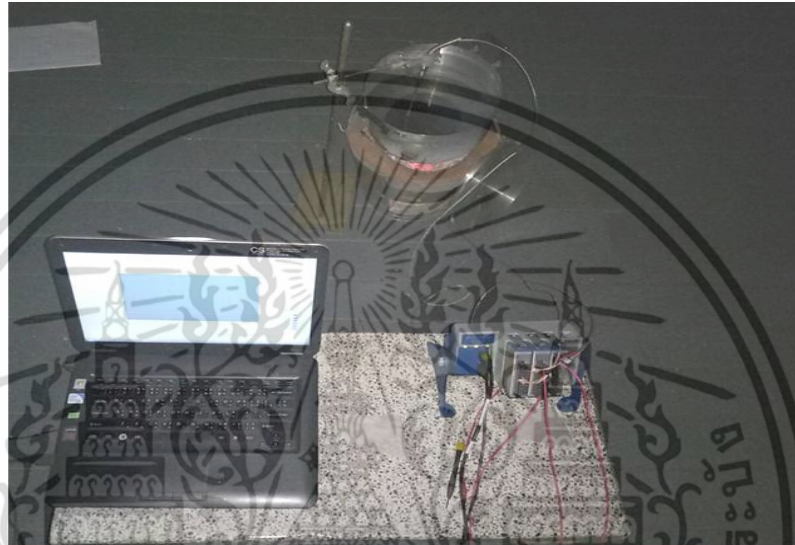
โดยที่	m_{wi}	คือ มวลเริ่มต้นของน้ำ (kg)
	C_{pw}	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (KJ/kg·K)
	$m_{w, \text{evap}}$	คือ มวลของน้ำที่ระเหยไป (kg)
	m_f	คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
	T_e	คือ อุณหภูมิน้ำเดือด (°C)
	T_i	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (°C)
	H_l	คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (KJ/kg)
	H_f	คือ ค่าความร้อนแฝงของเชื้อเพลิง (KJ/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

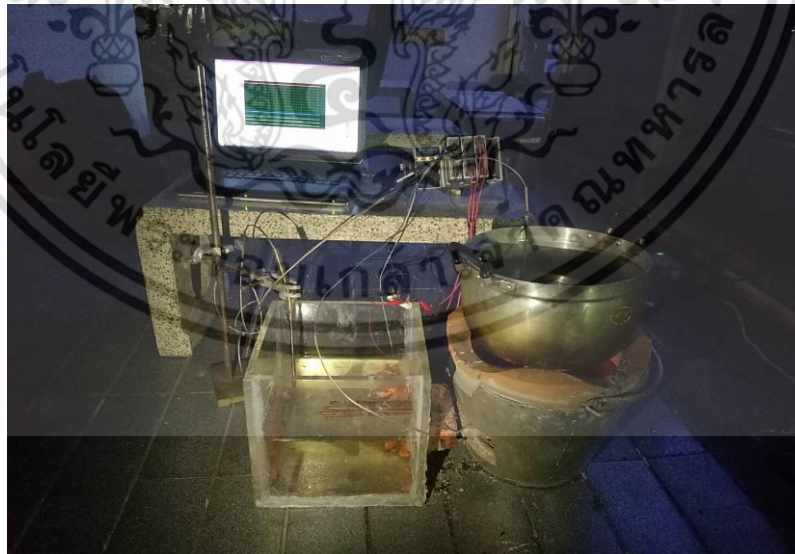
การเปรียบเทียบปริมาณความร้อนที่เข้ามาของระบบโดยไม่มี การติดตั้งและติดตั้งกับ เตาทุงต้มหาได้จากสมการ (3.4) ซึ่งมีการกำหนดตัวแปรต่อไปนี้

ปริมาณความร้อนที่เข้ามาของระบบโดยที่ไม่มี การติดตั้งกับเตาทุงต้ม (η_a) และ ปริมาณความร้อนที่เข้ามาของระบบโดยมีการติดตั้งกับเตาทุงต้ม (η_b)

$$\frac{\eta_a}{\eta_b} \times 100\% \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.17 ปริมาณความร้อนที่เข้ามาของเตาทุงต้มโดยที่ระบบไม่ติดตั้งกับเตาทุงต้ม



รูปที่ 3.18 ปริมาณความร้อนที่เข้ามาของเตาทุงต้มโดยที่ระบบติดตั้งกับเตาทุงต้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

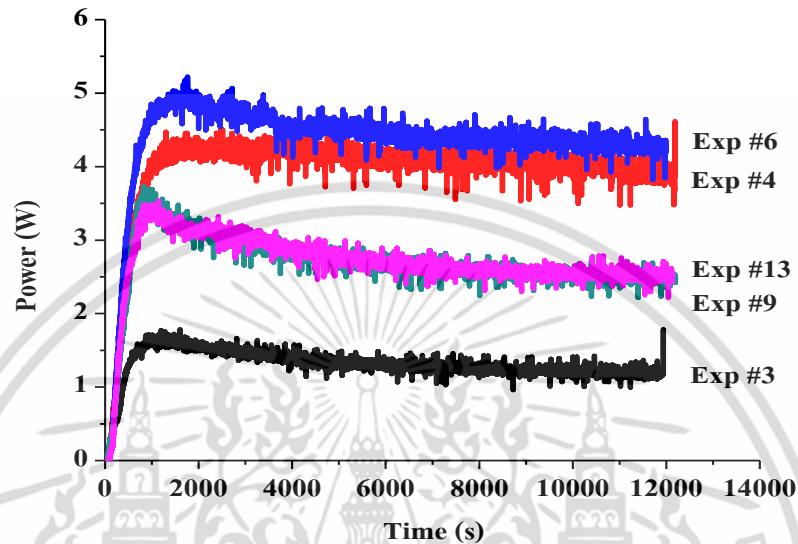
ในบทที่กล่าวมา ได้ทำการออกแบบและทดลองระบบโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน ซึ่งในบทนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค CCD (Central Composite Design) การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ การหาประสิทธิภาพของระบบ การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกและเทอร์โมอิเล็กทริกกับอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมกับท่อความร้อน และผลการทดลองภาคสนาม โดยแสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค CCD (Central Composite Design)

ในเบื้องต้นการออกแบบและทดลองระบบโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน ได้ทำการศึกษาตัวแปรทั้งหมด 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรต้น และตัวแปรตาม โดยที่ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาขึ้นแบ่งออกได้อีก 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำ , กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกและอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งได้มีการกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน 150–250 °C และปริมาตรของน้ำ 5-9 L เพื่อทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว ซึ่งในวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวนั้นสามารถแบ่งการออกแบบการทดลองได้หลายแบบ แต่แบบที่นำมาใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design) เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางเป็นการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะโพลีโนเมียลอันดับที่สอง (Second-Order or Quadratic Model) โดยจากการออกแบบการทดลองนั้นได้เงื่อนไขทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.15 จากนั้นจึงนำเงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบทั้งหมด 13 การทดลองทำการทดลองกับระบบที่ออกแบบ โดยมีการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อนของทองแดง (T_1-T_2) อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) อุณหภูมิของน้ำ (T_4) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.3.2 ดังนั้นจากการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กล่าวมาจึงนำมาใช้ในการคำนวณต่างๆซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) , อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) , อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (Q_w) ซึ่งจากการคำนวณที่ได้ทั้งหมด 13 การทดลอง จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลเพียง 5 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13 เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของการออกแบบการทดลองและเงื่อนไขที่เลือกสามารถทำซ้ำได้ โดยอธิบายแนวโน้มของค่าที่ได้จากการคำนวณที่กล่าวมาในข้างต้นได้ แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.1-4.1.3 และผลการทดลองที่เหลือจะแสดงไว้ในภาคผนวก

จากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางเมื่อทราบตัวแปรต้นและตัวแปรตามทั้งหมด 13 การทดลอง จึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.2 ต่อไป

4.1.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P)



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

รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา คำนวณได้จากสมการ (4.1) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) ในการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13 มีค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.31 วัตต์ , 3.94 วัตต์ , 4.34 วัตต์ , 2.67 วัตต์ และ 2.69 วัตต์ ตามลำดับ หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มคงที่เวลาประมาณ 2,000 วินาที (33 นาที) ดังนั้นจึงสรุปค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) ได้ดังตารางที่ 4.1

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

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

และ V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ตารางที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (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

4.1.2 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h)

การหาอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบสำหรับงานวิจัยนี้คำนวณได้ตั้งสมการที่ (4.2) โดยมีการสมมติฐาน 2 ข้อ คือ อุณหภูมิจะไหลจากจุด T_1 ไปยังจุด T_2 โดยอาศัยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนน้อยมาก ดังนั้นจึงได้ทำการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_1-T_2) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ แสดงดังรูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข)

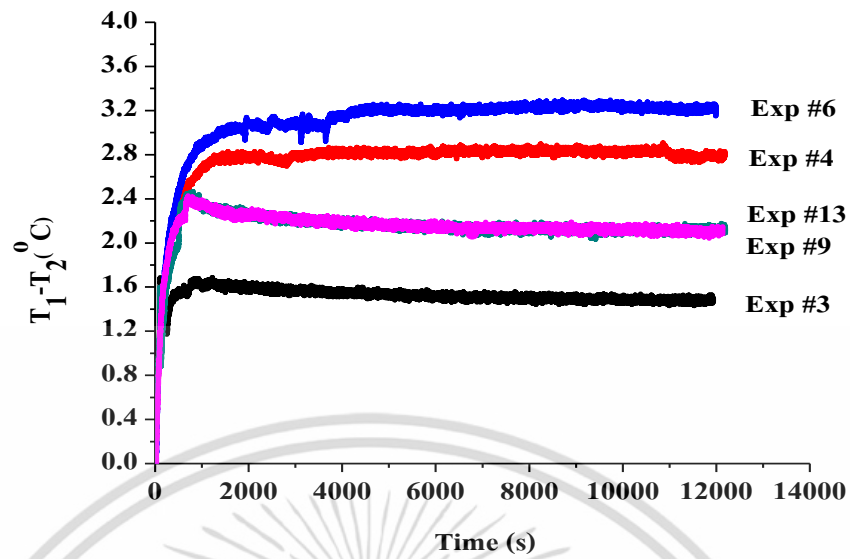
$$Q_h = KA\Delta T/x \quad (4.2)$$

เมื่อ k คือ การนำความร้อนของทองแดง ($401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) [122]

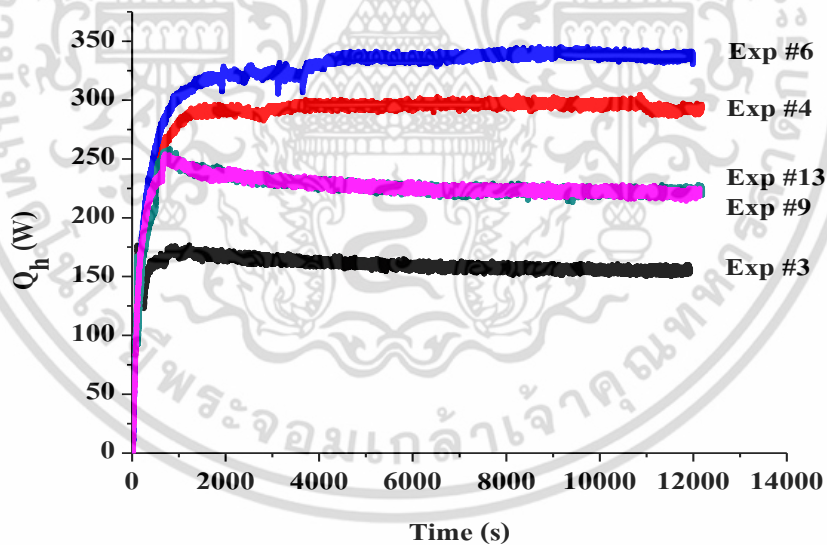
A คือ พื้นที่หน้าตัดของเทอร์โมอิเล็กทริก ($3136 \times 10^{-6} \text{ m}^2$)

ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิ (T_1-T_2) ($^{\circ}\text{C}$)

x คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ T_1 กับ T_2 (cm)



รูปที่ 4.2(ก) ความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_1-T_2) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 3 , 5 , 6 , 9 และ 13 ตามลำดับ



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

รูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข) ความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_1-T_2) กับเวลา และอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไป 1,500 วินาที (25 นาที) อุณหภูมิทางด้านร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_1-T_2) ในการทดลองที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.70 , 2.91 , 3.30 , 2.47 และ 2.43 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้อัตราเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

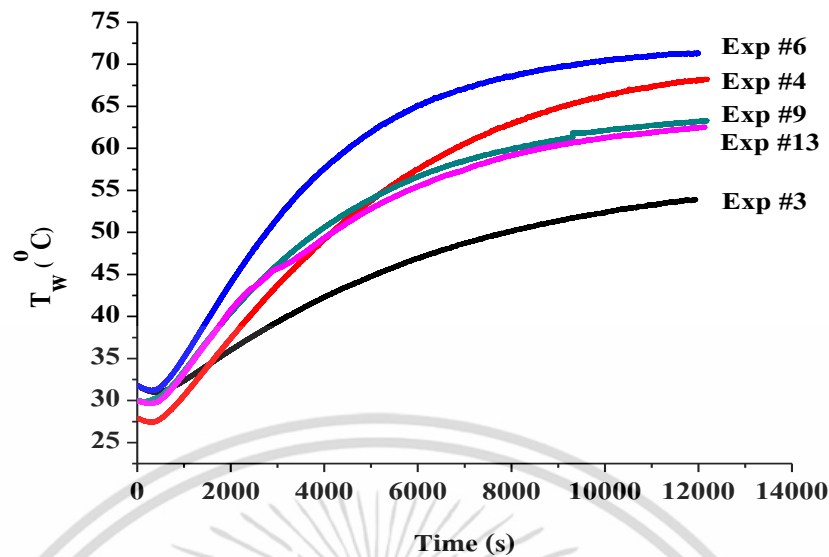
การไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 160 วัตต์ , 290 วัตต์ , 345 วัตต์ , 250 วัตต์ และ 240 วัตต์ และหลังจากนั้นอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 2,000 วินาที (33 นาที) ดังนั้นอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) และความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1-T_2 ทั้งหมด 13 การทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1-T_2 (°C) และการคำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่เข้าในระบบ ทั้งหมด 13 การทดลอง

ครั้งที่	$T_1 - T_2$ (°C)	Q_h คงที่ (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)

เมื่อมีความร้อนเข้ามาในระบบทำให้ความร้อนบางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ความร้อนให้กับน้ำ และสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งในเบื้องต้นทำการคำนวณหาความร้อนที่เปลี่ยนเป็นไฟฟ้า ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการหาความร้อนที่ให้กับน้ำและสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม โดยคำนวณได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของน้ำกับเวลา ทั้งหมด 13 การทดลอง แต่สำหรับในการวิเคราะห์เลือกเพียง 5 การทดลอง เพราะเลือกจากอุณหภูมิทางด้านร้อนสูงสุด ต่ำสุด และเท่ากัน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของข้อมูลและในกรณีที่เงื่อนไขมีอุณหภูมิเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขสามารถทำซ้ำได้ แสดงดังรูปที่ 4.3 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในรูปที่ 4.3 แบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ อุณหภูมิน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ช่วงที่ 1) และอุณหภูมิน้ำที่คงที่ (ช่วงที่ 2)



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

รูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิของน้ำตอนเริ่มต้นคงที่และค่อยๆเพิ่มขึ้นนั้นเกิดจาก อุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 8000 วินาที อุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ช่วงที่ 1) สามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำได้ โดยใช้สมการที่ (4.3) แต่เนื่องจากในกรณีที่ อุณหภูมิของน้ำคงที่หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลนั้นจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำกับเวลาน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 [1] ดังนั้น สมการที่ (4.3) จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณได้ และจึงได้มีวิธีการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในกรณีที่อุณหภูมิน้ำคงที่ ซึ่งได้มีงานวิจัยของ Date et.al [34] ศึกษาทำการคำนวณอุณหภูมิของน้ำที่คงที่โดยใช้ผลเฉลยของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งซึ่งแสดงในสมการที่ (4.4) โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) เพื่อให้ได้อุณหภูมิของน้ำที่ตรงกัน ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) จะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบและอุณหภูมิของน้ำและหลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ 3 , 4 , 6 , 9 และ 13 ตามลำดับ เพื่อให้เห็นถึงอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี แสดงดังรูปที่ 4.4(ก)-4.4(จ) ส่วนการทดลองที่เหลือแสดงในภาคผนวก ดังนั้นจึงสรุปค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนและอุณหภูมิน้ำที่คงที่ทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 4.3

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

$$T_w = [T_i - \frac{Q_h + UA_s T_a}{UA_s}] \exp[-\frac{UA_s t}{mC_p}] + [\frac{Q_h + UA_s T_a}{UA_s}] \quad (4.4)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

UA_s คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (W/°C)

T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

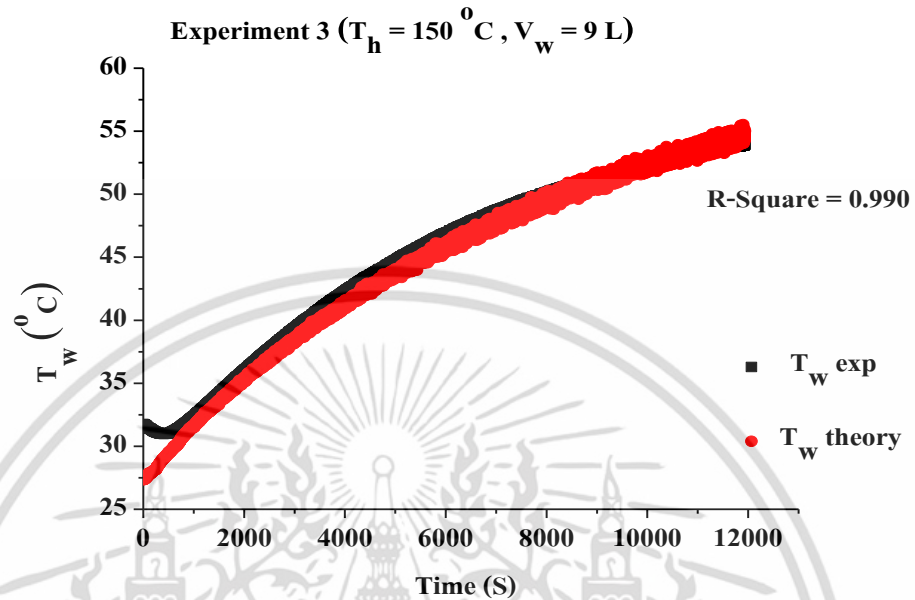
m คือ มวลของน้ำ (ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

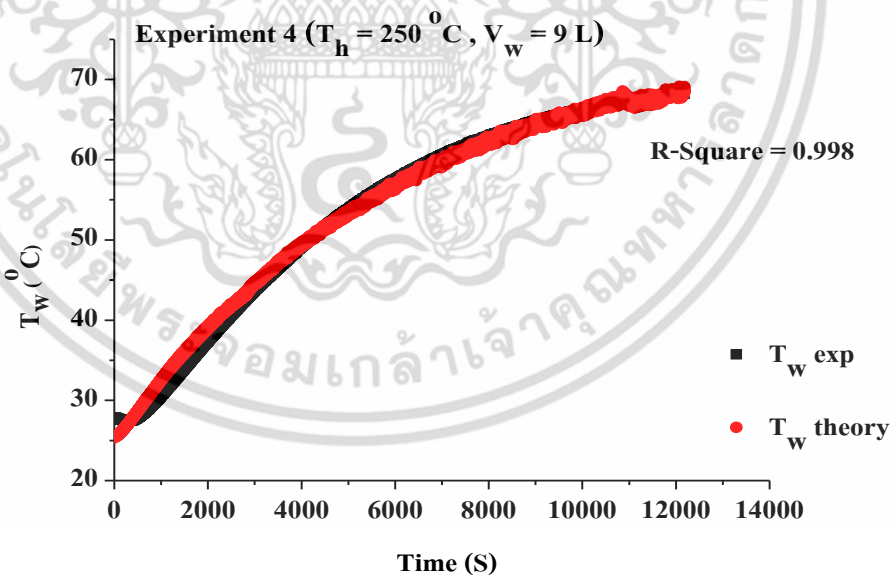
C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ $4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

T_w คือ อุณหภูมิน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)

dT_w/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำต่อเวลา ($^{\circ}\text{C/s}$)

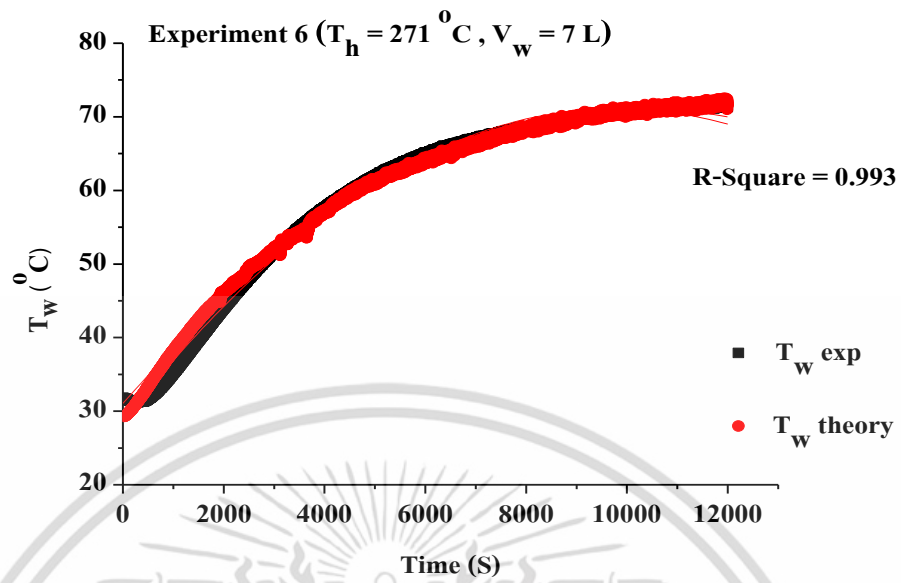


รูปที่ 4.4(ก) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 3

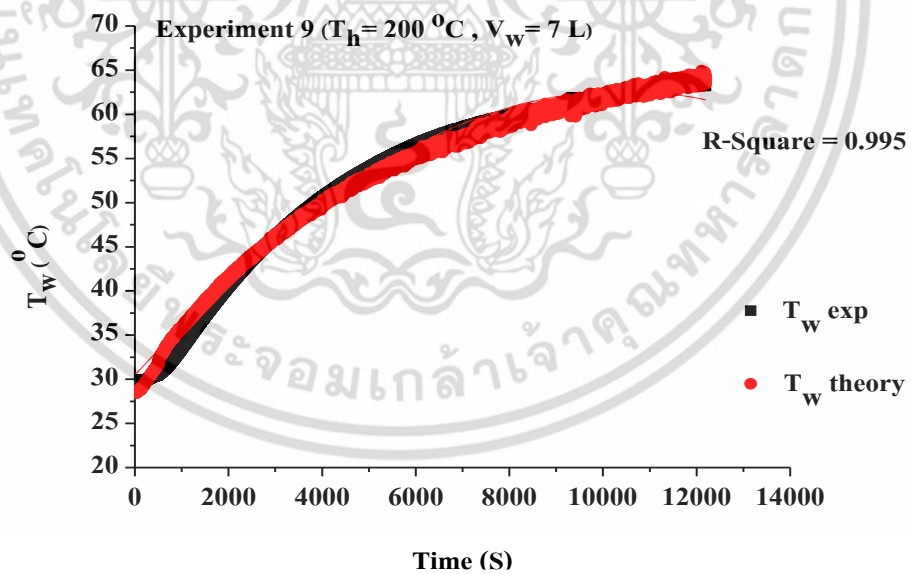


รูปที่ 4.4(ข) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

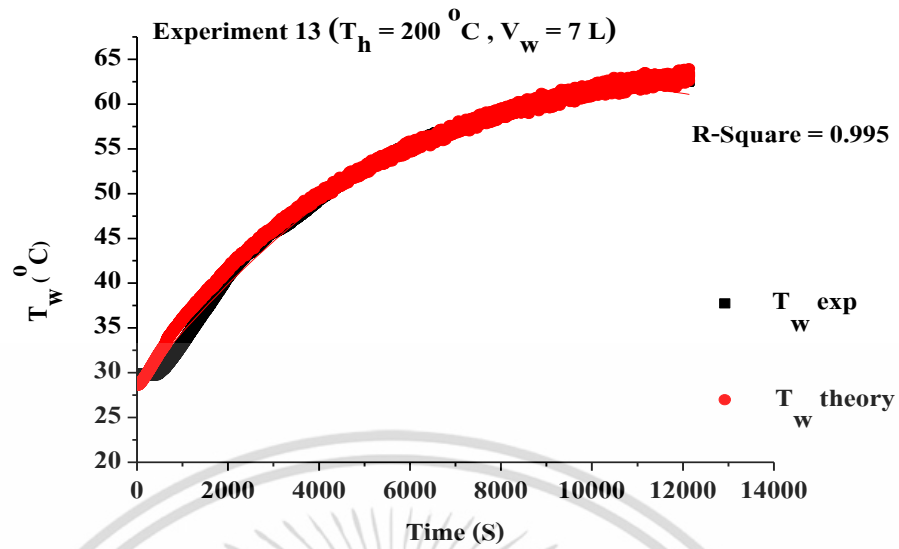


รูปที่ 4.4(ค) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 6



รูปที่ 4.4(ง) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



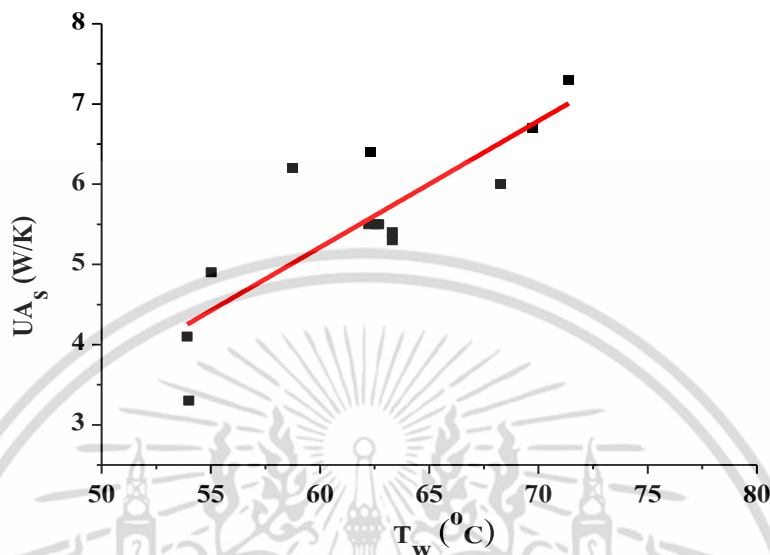
รูปที่ 4.4(จ) เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 13

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำคงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง

ครั้งที่	UA_s	T_w ($^\circ\text{C}$)
1	4.9	55.02
2	6.7	69.74
3	4.7	53.92
4	6.0	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำที่คงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง สามารถเขียนในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำที่คงที่ (T_w) ได้ดังรูปที่ 4.5



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

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) กับอุณหภูมิของน้ำที่คงที่ (T_w) ทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิทางด้านร้อนและผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Date et al. [34] อย่างไรก็ตามค่าระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) ที่ประมาณไว้สูงกว่าที่รายงานโดย Date et al. ประมาณ 4-7 เท่า [34] เนื่องจากพื้นที่ผิวของกล่องน้ำ (A_s) แต่ในงานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) สูงประมาณ 5-6 เท่าซึ่งสูงกว่าของ Date et al. [34] ดังนั้นจึงมีการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้นในสิ่งแวดล้อม และทำให้สามารถลดการสูญเสียความร้อนโดยครอบคลุมกล่อง แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของน้ำที่คงที่เพิ่มอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกและการผลิตไฟฟ้าลดลง

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่คงที่ทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.4 และนำข้อมูลจากตารางที่ 4.4 ไปใช้ในการหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.2

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

เมื่อ

UA_s คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (W/°C)

T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเมื่ออุณหภูมิของน้ำคงที่ (ช่วงที่ 2) ทั้งหมด
13 การทดลอง

การทดลองที่	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

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติสามารถวิเคราะห์ได้โดยทำการออกแบบการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design) โดยมีตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กล่าวในหัวข้อ 4.1 ซึ่งตัวแปรที่ได้จากการออกแบบการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.5 และนำผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรต่างๆ เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำตามเงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองในเบื้องต้นทั้งหมด 13 การทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ ประสมกลาง (CCD) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำ ตามเงื่อนไขต่างๆ

ตัวแปรต้น			ตัวแปรตาม	
การทดลอง	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

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำตามเงื่อนไขต่างๆ ทั้งหมด 13 การทดลอง ซึ่งจากผลการทั้งหมด 13 การทดลอง จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงนำข้อมูลจากการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางทั้งหมด 13 การทดลอง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ความแปรปรวน (Anova) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ทำการศึกษาของระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน แสดงดังตารางที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6(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	

ตารางที่ 4.6(ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของอุณหภูมิน้ำ

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 4.6(ก) และ 4.6(ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด 3 อย่าง คือ การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำ การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และการวิเคราะห์ lack of fit ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำ มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากในแต่ละปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 95%) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ R^2 คือ สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ สามารถอธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำที่ได้เป็นผลมาจากอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำร้อยละ 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 อธิบายความสัมพันธ์อุณหภูมิทางด้านร้อน ปริมาตรของน้ำ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และอุณหภูมิน้ำได้ [2] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำ ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) โดยที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำที่ได้อยู่ในสถานะสมดุล (อุณหภูมิทางด้านร้อนไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา)

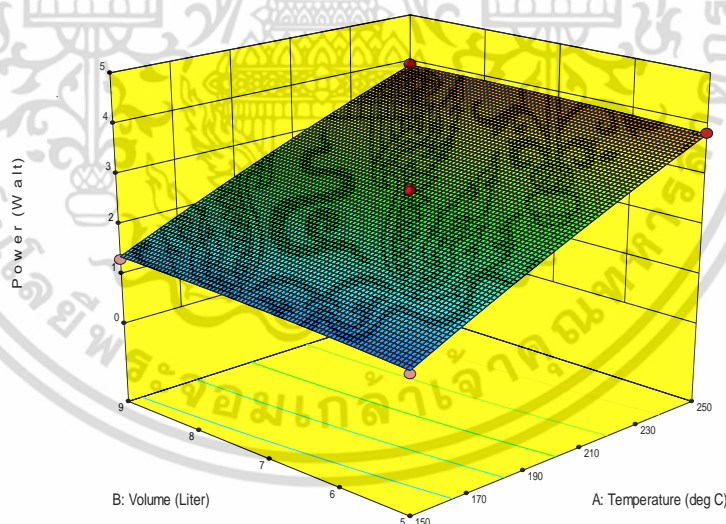
$$\text{Power} = -5.47 + 0.0432 \times T_h + 0.291 \times V_w - 4.50 \times T_h \times V_w - 3.43 \times 10^{-5} \times T_h^2 - 0.0108 \times V_w \quad (4.6)$$

$$T_w = 35.9 + 0.148 \times T_h - 0.531 \times V_w \quad (4.7)$$

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

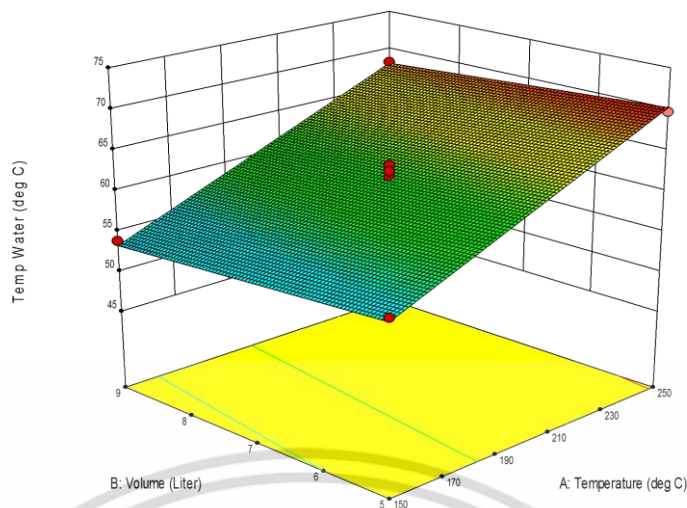
T_h คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน ($^{\circ}\text{C}$) และ V_w คือ ปริมาตรของน้ำ (ลิตร)

ตารางที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข) ที่กล่าวมานั้นยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลในรูปของกราฟแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข)



รูปที่ 4.6(ก) ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า (P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6(ข) ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิน้ำ (T_w)

รูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข) ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำ เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มระหว่างปัจจัยกับตัวแปรผลตอบสนองว่าปัจจัยใดส่งผลต่อการออกแบบระบบ เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของระบบ และในส่วนของปริมาตรของน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิน้ำ 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})

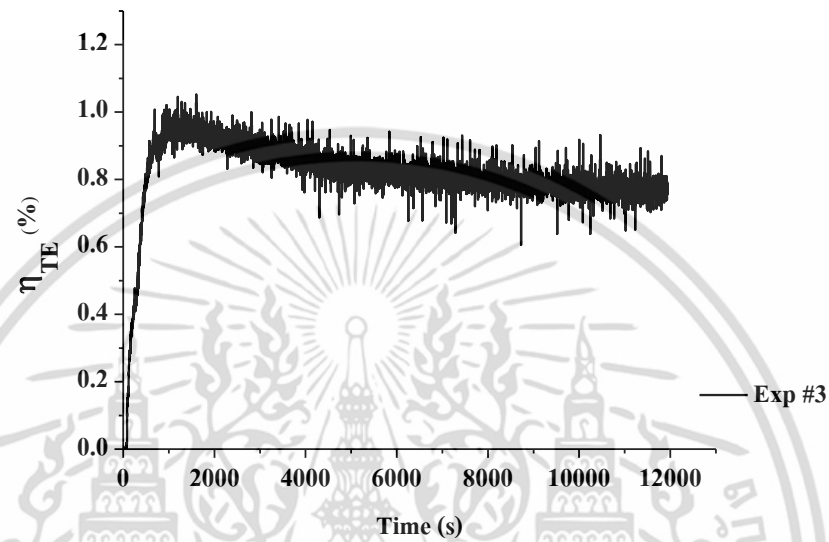
การหาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) สำหรับในการผลิตไฟฟ้า เกิดจากความร้อนที่เข้ามาในระบบแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าบางส่วนและความร้อนส่วนที่เหลือระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงทำการหาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกได้จากสมการที่ (4.8) เมื่อทราบค่าในหัวข้อที่ 4.1.1-4.1.2 แต่สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกเลือกเพียง 5 การทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.7-4.11 และผลการทดลองในส่วนที่เหลือแสดงในภาคผนวก และได้ทำการสรุปค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

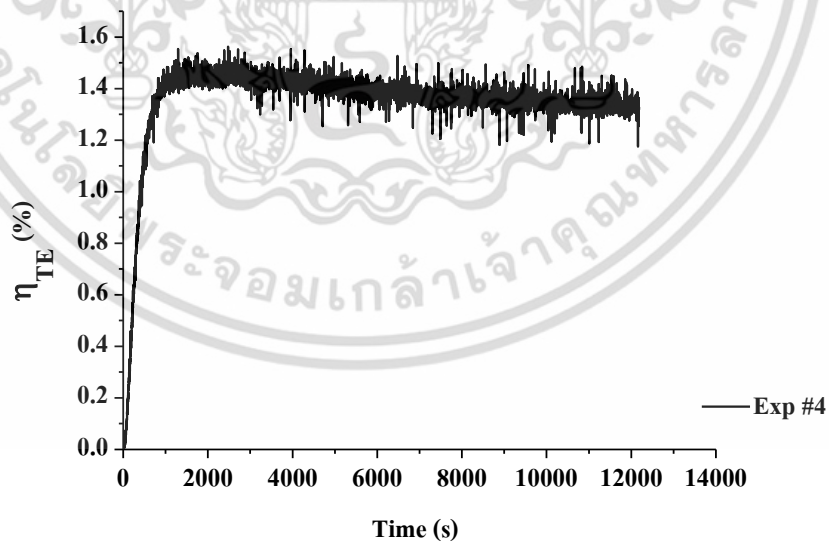
$$\eta_{TE} = \left(\frac{P}{Q_h} \right) \quad (4.8)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (W)

Q_h คือ อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (W)

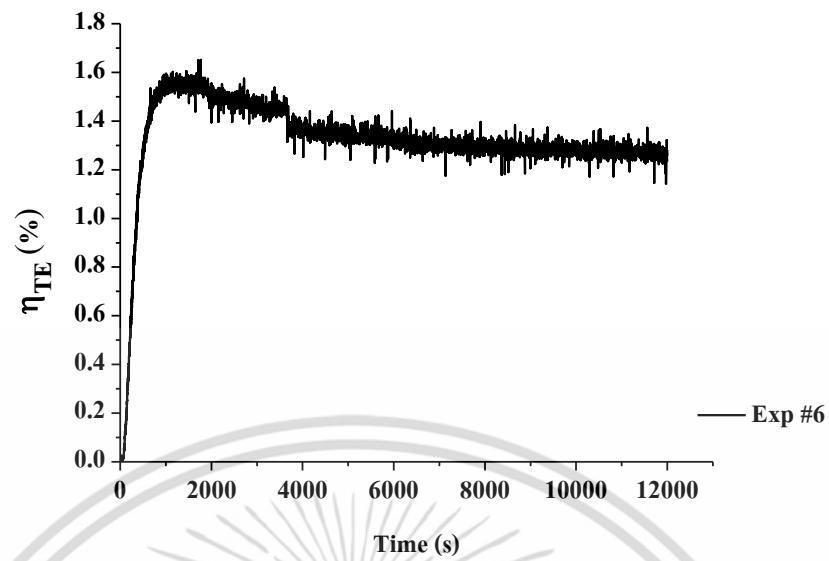


รูปที่ 4.7(ก) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 3

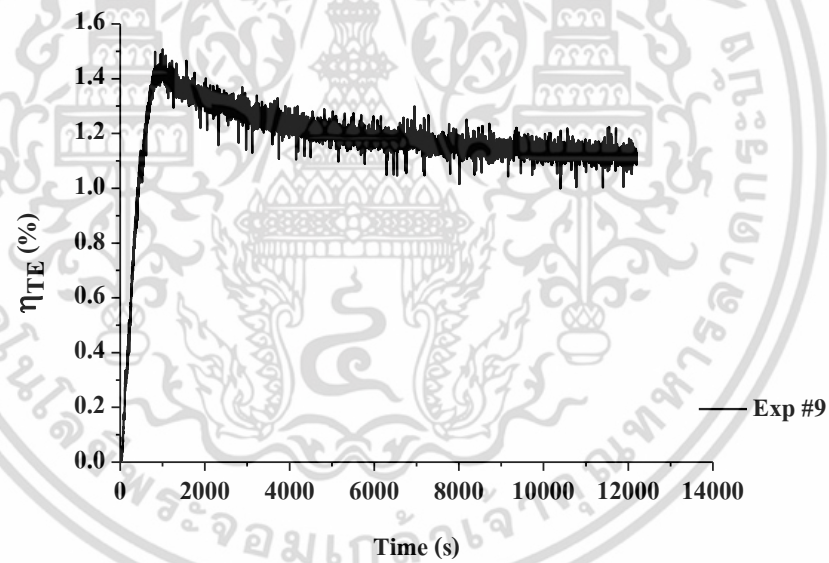


รูปที่ 4.7(ข) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

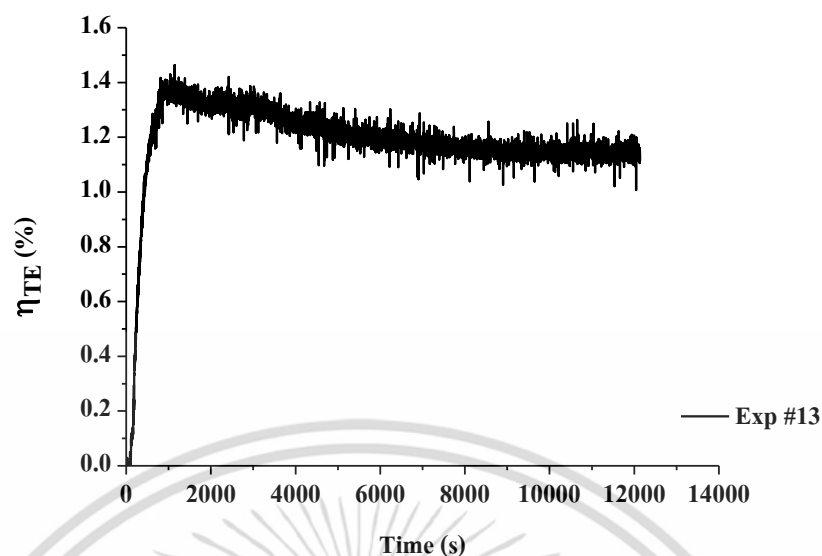


รูปที่ 4.7(ค) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 6



รูปที่ 4.7(ง) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7(จ) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 13

รูปที่ 4.7(ก)-4.7(จ) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา สำหรับการทดลองครั้งที่ 3, 4, 6, 9 และ 13 จะเห็นได้ว่าที่เวลาประมาณ 1500 วินาที (25 นาที) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจะค่อยๆเพิ่มขึ้นและสูงสุดอยู่ที่ 0.92% , 1.50% , 1.60% , 1.40% และ 1.40% หลังจากนั้นประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจะเริ่มคงที่เวลาประมาณ 4000 วินาที (67 นาที) ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Date et al. พบว่าการแปลงประสิทธิภาพจากพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 1-2% [34] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเราโดยมีค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 1-2% จากนั้นจึงทำการสรุปค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง ได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง	η_{TE} (%)
11	1.40
12	1.35
13	1.40

4.3.2 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (η_w)

การหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ เกิดจากอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในหัวข้อ 4.1.3 เมื่ออุณหภูมิน้ำคงที่หรืออุณหภูมิน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหาได้จากสมการที่ (4.9) เมื่อทราบค่าในหัวข้อที่ 4.1.2 และ 4.1.3 โดยแสดงค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ทำการคำนวณได้ทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 4.8

$$\eta_w = \left(\frac{Q_w}{Q_h} \right) \quad (4.9)$$

ตารางที่ 4.8 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 4.8 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทั้งหมด 13 การทดลอง พบว่าเมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำและอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ได้สูงขึ้นโดยอยู่ในช่วง 70-90% ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Date et al. ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำอยู่ในช่วง 50-60% [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของระบบที่กล่าวมานั้นมีประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกและการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ โดยที่ประสิทธิภาพทั้ง 2 ส่วนนี้ สามารถหาประสิทธิภาพรวมของระบบได้โดยรวมประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 80-94% แสดงผลดังตารางที่ 4.9 ซึ่งผลที่ได้จากตารางจะเป็นการบ่งบอกถึงว่างานวิจัยนี้สามารถนำระบบที่ออกแบบไปใช้ตามต้องการ โดยตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์

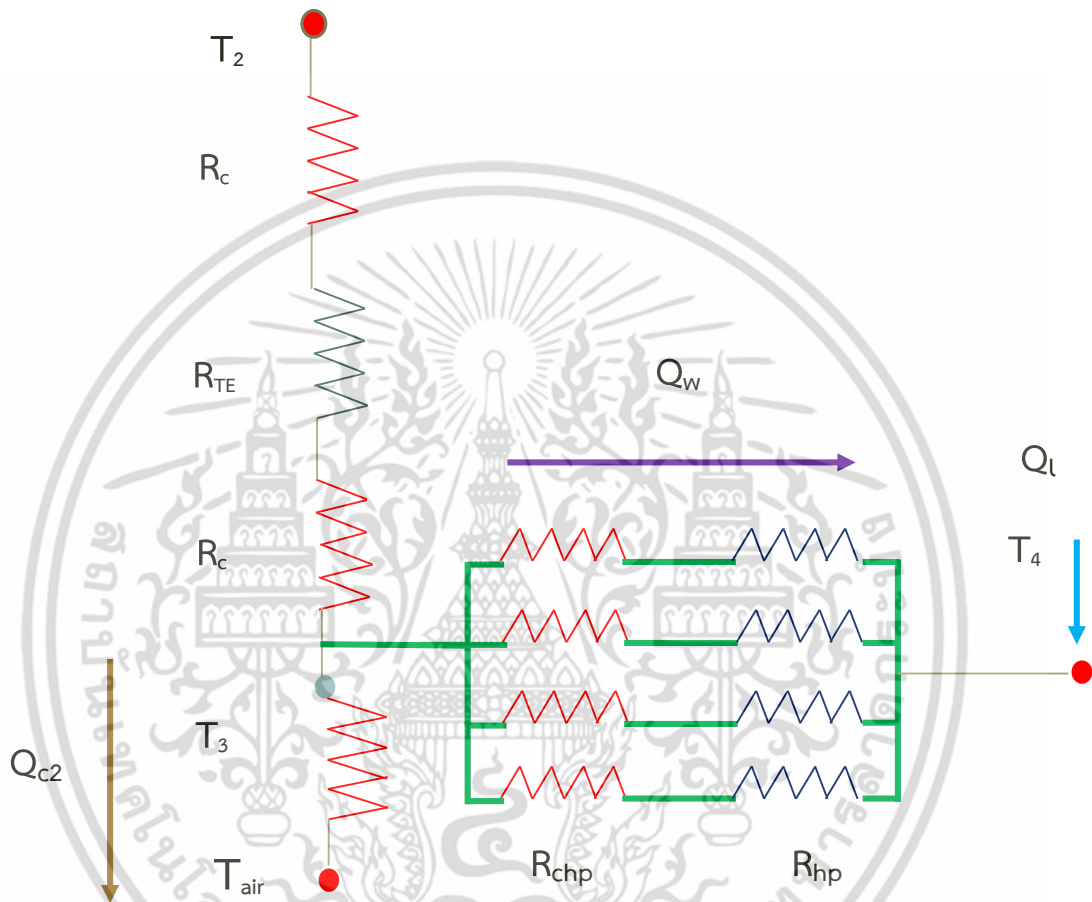
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพรวมของระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน

ครั้งที่	η_{TE} (%)	η_w (%)	η_{total} (%)
1	1.05	82.35	83.40
2	1.50	87.50	89.00
3	0.92	79.38	80.30
4	1.50	85.40	86.90
5	1.10	80.00	81.10
6	1.60	91.80	93.41
7	1.30	90.40	91.70
8	1.35	78.74	80.10
9	1.40	81.70	83.10
10	1.35	81.80	83.15
11	1.40	83.67	85.07
12	1.35	80.95	82.30
13	1.40	81.52	82.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งระบบ

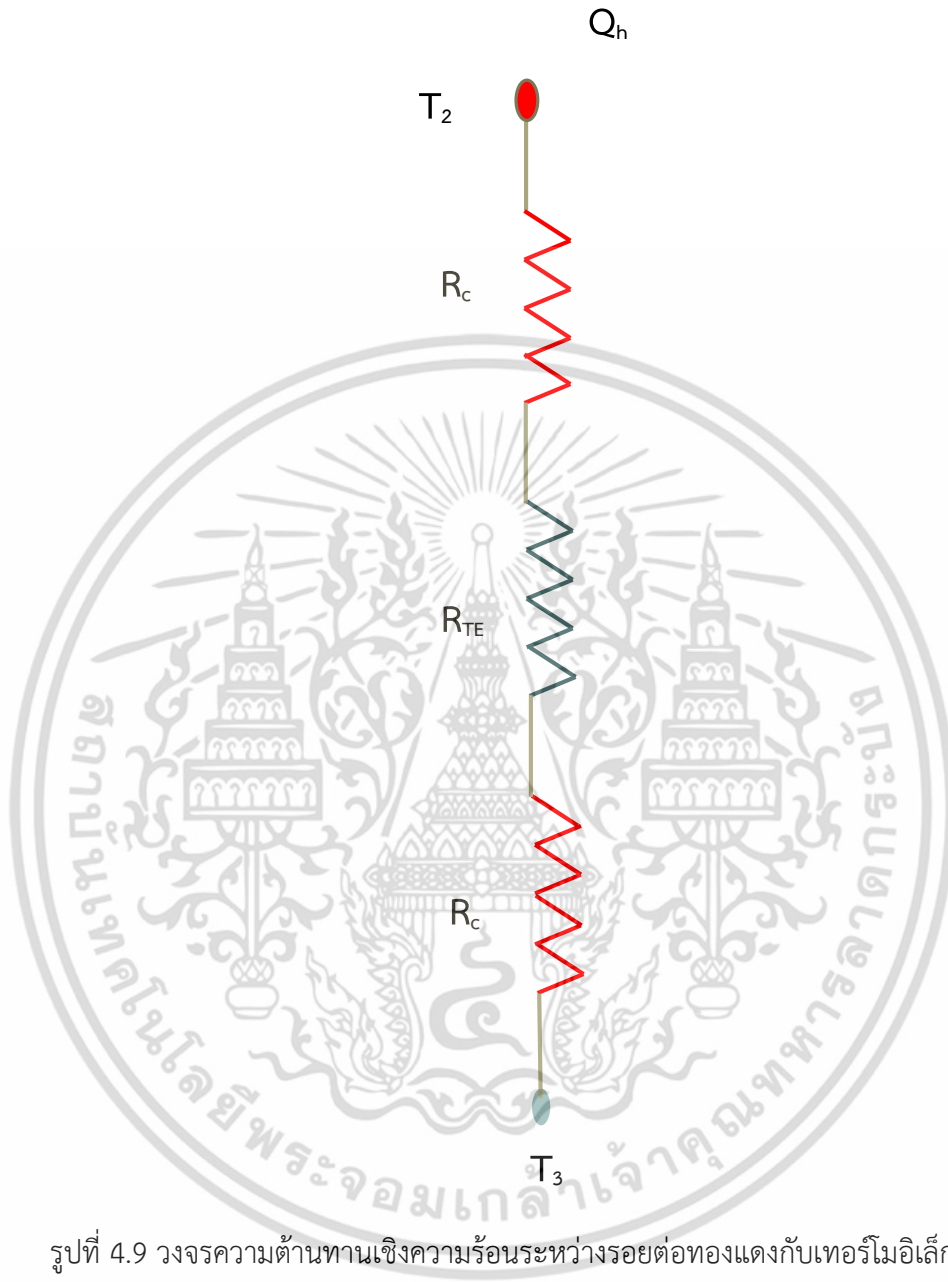
ในบทที่กล่าวมา หัวข้อ 3.3.2 รูปที่ 3.2 ได้ทำการออกแบบระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน ซึ่งจากการออกแบบจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบทั้งหมด 13 การทดลอง ดังนั้นจึงเขียนวงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบ ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน

รูปที่ 4.8 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน เกิดขึ้นเมื่อวัสดุทั้งสองติดกันจึงทำให้เกิดความต้านทานเชิงความร้อน ซึ่งจุดประสงค์สำหรับงานวิจัยนี้ คือ การคำนวณค่าความต้านทานเชิงความร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน โดยที่ค่าความต้านทานเชิงความร้อนยังแสดงให้เห็นถึงรอยต่อของระบบมีการติดต่อที่ดี ซึ่งได้ทำการแบ่งวิธีการหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของระบบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

4.4.1 การหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 4.9 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก

รูปที่ 4.9 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลกับทองแดงและส่วนที่ติดต่อกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลกับอะลูมิเนียม เมื่อต้องการคำนวณความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทั้งสอง (R_c) โดยทำการวัดอุณหภูมิทองแดงและอะลูมิเนียม (T_2 และ T_3) จากกฎของฟูริเยร์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง T_2 และ T_3 สามารถสรุปได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T_2 - T_3 &= (R_c + R_{TE} + R_c) Q_h \\
 (T_2 - T_3)/Q_h &= 2R_c + R_{TE} \\
 (T_2 - T_3)/Q_h - R_{TE} &= 2R_c \\
 R_c &= ((T_2 - T_3)/Q_h - R_{TE})/2
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

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

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

Q_h คือ อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (W)

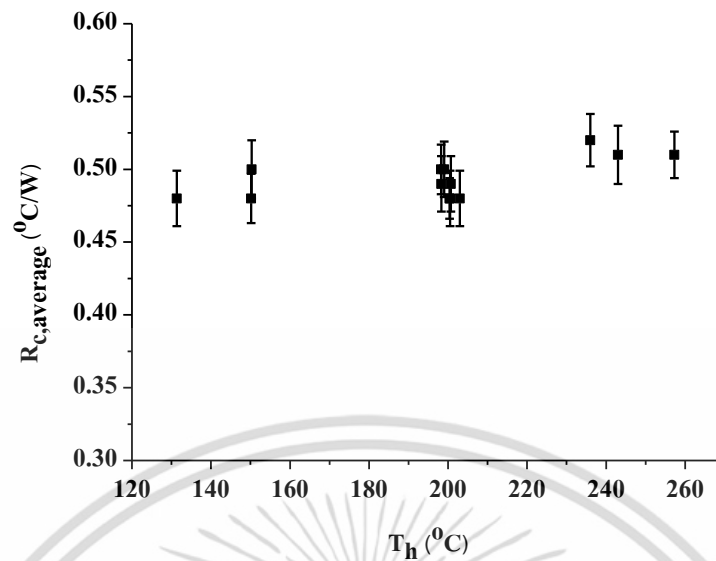
R_{TE} คือ ความต้านทานของเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ [14]

สมการที่ (4.10) คำนวณค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเฉลี่ยทั้ง 13 การทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด 13 การทดลอง

การทดลอง	ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ย (R_c) ($^{\circ}\text{C/W}$)
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

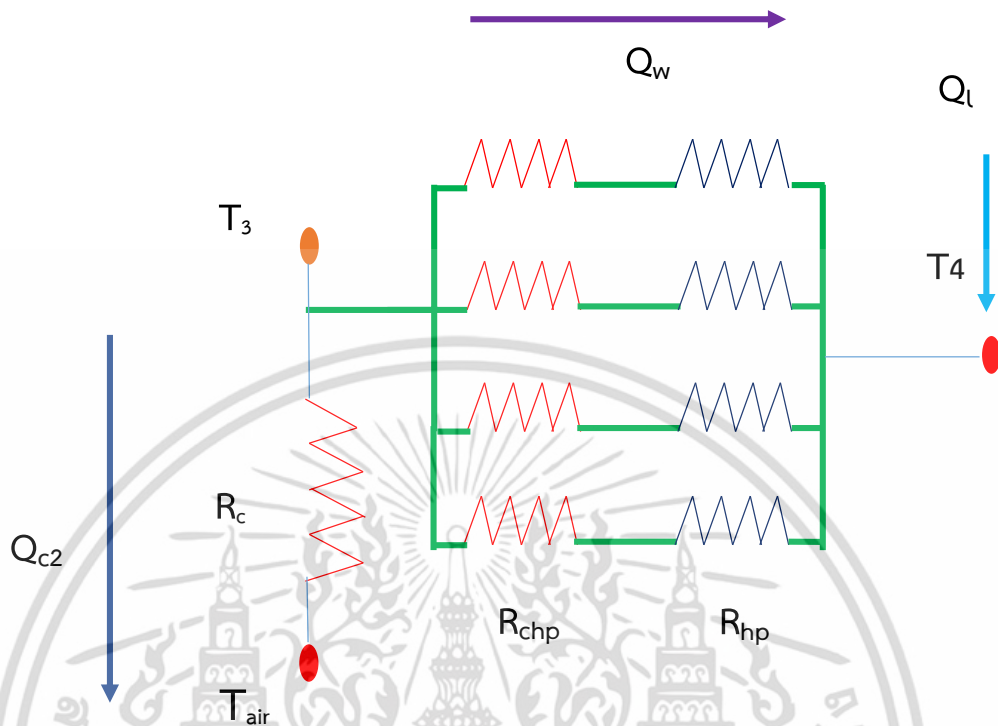
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกเฉลี่ย (R_c) กับ อุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) ทั้งหมด 13 การทดลอง

รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) ทั้งหมด 13 การทดลอง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง 0.4-0.5 $^{\circ}\text{C/W}$ ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่ผ่านเข้ามาในระหว่างรอยต่อของทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกมีการเชื่อมต่อโดยใช้ thermal grease เพื่อช่วยลดความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อของวัสดุ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Sauciuc, I., Erturk, H., Chrysler, G., Bala, V., & Mahajan, R. พบว่าค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5 $^{\circ}\text{C/W}$ [92] ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ทำการออกแบบระบบ และความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกจะเห็นได้ว่าเป็นรอยต่อที่ดี

4.4.2 ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)



รูปที่ 4.11 วงจรความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)

รูปที่ 4.11 การหาวงจรรวมความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (4.11) คำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่ไหลออกจากระบบ (Q_c) เมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกและอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ ในหัวข้อ 4.1.1-4.1.2 โดยที่งานวิจัยนี้ได้ทำการสมมติและคำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านอะลูมิเนียมไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_{c2}) ในสมการที่ (4.12) และ (4.13) แต่ในสมการที่ (4.13) ไม่ทราบค่าความต้านทานของอะลูมิเนียม ดังนั้นจึงคำนวณความต้านทานของอะลูมิเนียมได้ในสมการที่ (4.14) จากนั้นจึงนำอัตราการไหลของความร้อนที่ไหลออกจากระบบ (Q_c) และอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านอะลูมิเนียมไปยังสิ่งแวดล้อม (Q_{c2}) เพื่อทำการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อความร้อนไปยังน้ำ (Q_w) รวมกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำไปยังสิ่งแวดล้อม ในสมการที่ (4.12) ใช้ในการหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe)

จากที่กล่าวมาในข้างต้นสามารถสรุปการหาความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe) ได้ดังสมการที่ (4.15) โดยที่ค่าความต้านทานของท่อความร้อน (R_{hp}) มีค่าน้อยจึงให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการคำนวณความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe) ทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังรูป ข.1-ข.26 ในภาคผนวก ข เพื่อนำมาหาค่าความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipe) ทั้งหมด 13 การทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.11

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

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

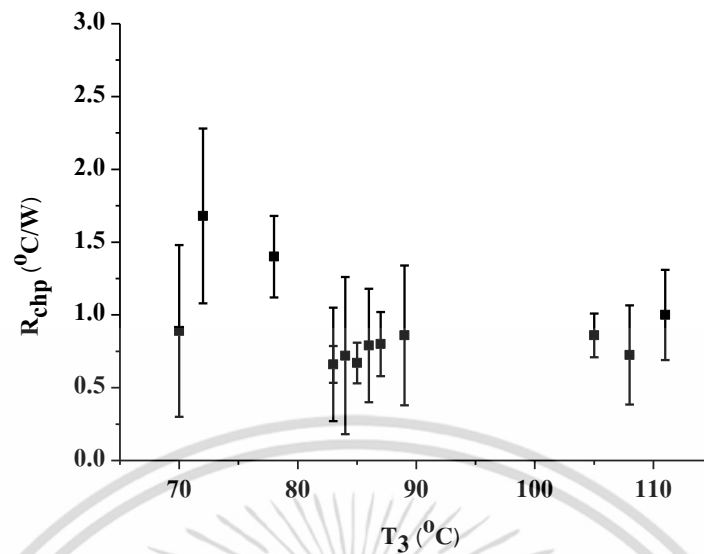
$$R_{chp} = (4(T_3 - T_4) / (Q_w + Q_c)) - R_{hp} \quad (4.15)$$

- เมื่อ
- R_{Al} คือ ความต้านทานเชิงความร้อนของอะลูมิเนียม (W)
 - d_{Al} คือ ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม (20 mm)
 - K_{Al} คือ ค่าการนำความร้อนของอะลูมิเนียม 237 W/m.K [4]
 - A_{Al} คือ พื้นที่ของอะลูมิเนียม ($2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)
 - R_{hp} คือ ความต้านทานของท่อความร้อน (Heat pipe) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 - R_{chp} คือ ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

ตารางที่ 4.11 ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) เฉลี่ยและอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง

การทดลอง	อุณหภูมิทางด้านเย็น (T_3)	ความต้านทานเชิงความร้อน รอยต่อเฉลี่ย (heat pipe)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
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	0.13
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 ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) และอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (Heat pipes) (R_{chp}) กับ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.12

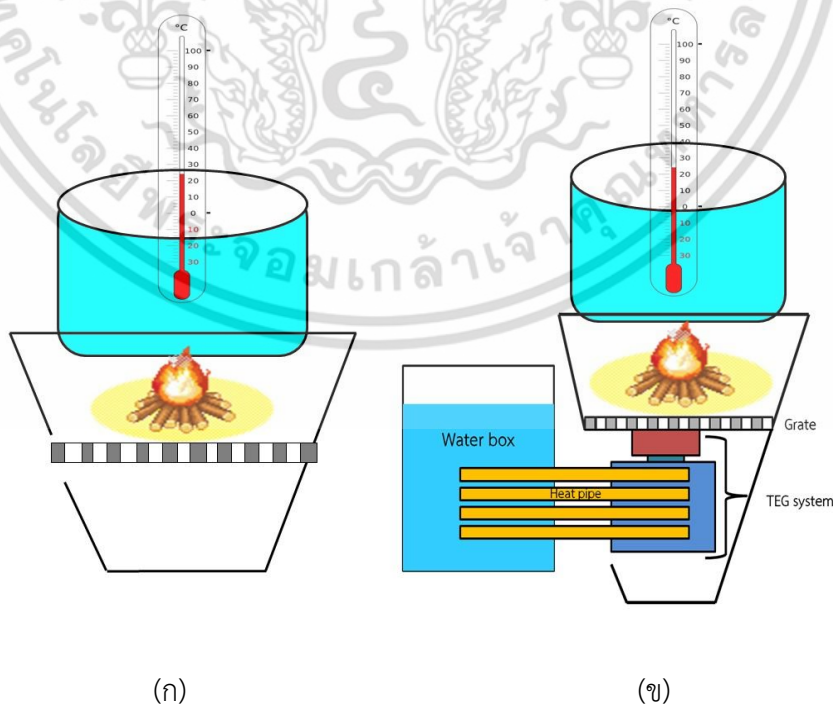


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง

รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับอุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_3) ทั้งหมด 13 การทดลอง จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน เพิ่มขึ้นจาก 70 °C ถึง 110 °C และค่าความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) อยู่ในช่วง 0.6-1.4 °C/W ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก จะเห็นว่ามีค่าสูงกว่าถึง 5 เท่า เพราะการติดกันของวัสดุของท่อความร้อนกับอะลูมิเนียม โดยที่งานวิจัยของเราได้นำอะลูมิเนียมเจาะรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อความร้อน 1 มิลลิเมตร ถึงแม้ว่า thermal grease ถูกนำมาใช้เพื่อลดความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างอะลูมิเนียมกับท่อความร้อน และช่องว่างที่มีขนาดเล็กจะเพิ่มความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างท่อความร้อนและอะลูมิเนียม เพื่อแก้ปัญหานี้ควรวางท่อความร้อนไว้ลงในกรอแม่พิมพ์อะลูมิเนียม แม้ว่าต้นทุนการผลิตของวิธีการนี้จะค่อนข้างสูง แต่ก็ส่งผลต่อการผลิตได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งในการออกแบบครีบบระบายความร้อนเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEG) ดังนั้นในการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลคือต้องการความต้านทานเชิงความร้อนต่ำสุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

4.5 ผลการทดลองภาคสนาม

การออกแบบและทดลองระบบโดยใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน จะเห็นได้ว่าความร้อนสามารถเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าและนำความร้อนที่ได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากกว่า 80% และการวิเคราะห์การปรับปรุงและประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับในงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบระบบติดตั้งกับเตาหุงต้มเพื่อต้องการหาปริมาณความร้อนของเตาหุงต้ม แต่สำหรับการนำระบบไปติดตั้งกับเตาหุงต้มนั้นยังมีจุดด้อย คือ ขัดขวางไม่ให้อากาศเข้าไปภายในเตาหุงต้มและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงลดลง จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลง ส่งผลให้ปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มลดลง จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้การทดลองภาคสนาม สำหรับงานวิจัยนี้ ต้องการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบและแสดงรายละเอียดของอุณหภูมิซึ่งถูกจับโดยกล้องถ่ายภาพความร้อน แสดงได้ดังรูปที่ 4.13(ก) (ข) (ค) และ (ง) ซึ่งได้ทำการอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3.3 ดังนั้น ผลการทดลองที่ได้สำหรับในขั้นตอนนี้ คือ การวัดปริมาตรของน้ำก่อนและหลังใช้ในการทดลอง เพื่อนำมาใช้ในการหาปริมาณความร้อนก่อนและหลังการติดตั้งระบบ โดยใช้อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำในหม้อไปจนถึงปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใช้ เมื่อพลังงานที่ป้อนลงในหม้อจะทำให้อุณหภูมิของน้ำขึ้นสู่จุดเดือดและจากนั้นน้ำจะระเหย ดังสมการที่ (3.3) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังติดตั้งระบบ โดยใช้สมการที่ (3.4) เพื่อบ่งบอกถึงการนำระบบที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้กับเตาหุงต้มได้อย่างเหมาะสม ซึ่งค่าปริมาตรของน้ำและปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบ สรุปได้ดังตารางที่ 4.12 และทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยที่นำระบบไปติดตั้งที่ติดตั้งฝังกับเตาหุงต้ม แสดงดังรูปที่ 4.14-4.16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

(ง)

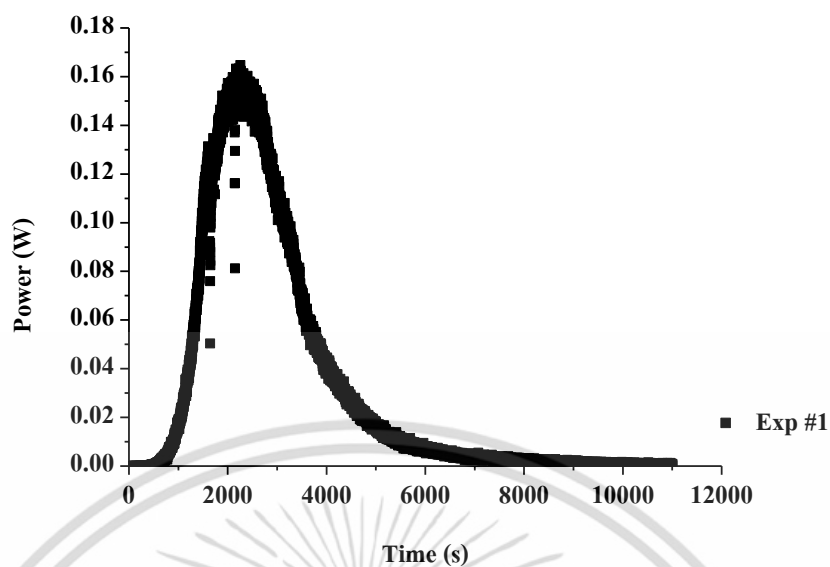
รูปที่ 4.13(ก) (ข) (ค) และ (ง) ปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบ และแสดงรายละเอียดของอุณหภูมิซึ่งถูกจับโดยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้ง

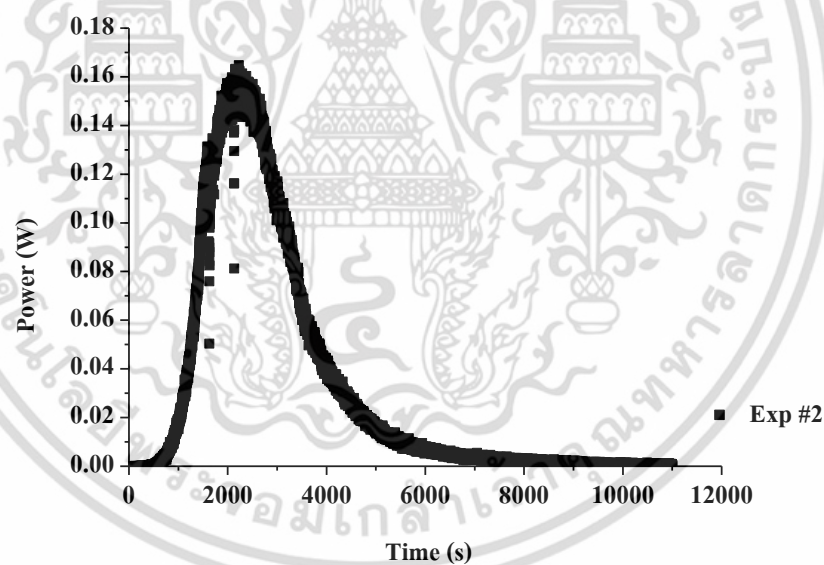
ครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
ปริมาตรของน้ำก่อนติดตั้ง (ลิตร)	2.36	2.36	2.40	2.37
ปริมาตรของน้ำหลังติดตั้ง (ลิตร)	2.30	2.26	2.30	2.29
ปริมาณความร้อนก่อนติดตั้ง (W)	6463.00	6462.70	6554.00	6493.23
ปริมาณความร้อนหลังติดตั้ง (W)	6323.10	6224.05	6325.25	6290.80
เปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังติดตั้ง (%)	97.84	96.30	96.50	96.88
ปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มลดลง (%)	2.16	3.70	3.50	3.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้ง จะเห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนติดตั้งระบบ ซึ่งทั้ง 3 การทดลอง อัตราส่วนของปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มก่อนและหลังการติดตั้งระบบลดลงประมาณ 2-3 % ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายสำหรับงานวิจัยนี้ โดยที่ปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มลดลงไม่เกิน 5 % ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงการนำระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อนที่มีประสิทธิภาพ เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะที่สมจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

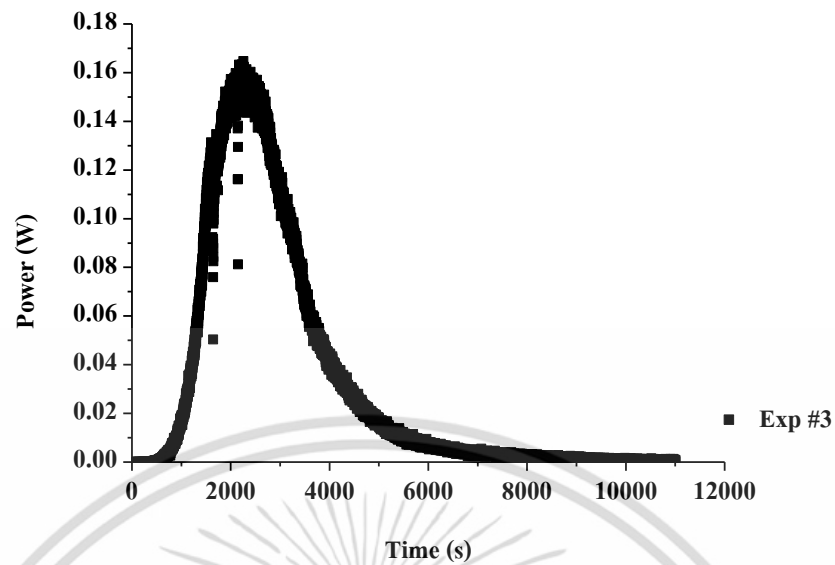


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลาเมื่อระบบติดตั้งกับเตาहुงต้ม ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลาเมื่อระบบติดตั้งกับเตาहुงต้ม ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่อระบบติดตั้งกับเตาหุงต้ม ครั้งที่ 3

รูปที่ 4.14-4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา ทั้งหมด 3 ครั้ง เมื่อระบบติดตั้งกับเตาหุงต้ม จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไป 2000 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ประมาณ 0.16 วัตต์ เมื่ออุณหภูมิของเตาหุงต้มเพิ่มสูงขึ้น หลังจากเวลา 2000 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะค่อยๆ ลดลง เมื่ออุณหภูมิของเตานั้นลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองในห้องปฏิบัติการ จะเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่าประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ อาจเกิดจากระบบที่ออกแบบไม่สามารถควบคุมความร้อนได้ ดังนั้น แนวทางในการแก้ไขควรมีการออกแบบเตาหุงต้มให้สามารถควบคุมความร้อนและมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและนำระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน โดยมีเงื่อนไขและจุดประสงค์ในการออกแบบ 3 ข้อ คือ (1) การออกแบบระบบต้องใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มเพื่อนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและพลังงานความร้อนที่เหลือจะใช้ในการผลิตน้ำร้อนเพื่อสามารถนำมาใช้ในครัวเรือน (2) การระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ และ (3) ระบบที่ออกแบบสามารถนำไปติดตั้งร่วมกับเตาหุงต้มโดยไม่ต้องทำลายโครงสร้างของเตาหุงต้ม

วิธีการทดลองของระบบแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ขั้นตอนแรกกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อุณหภูมิทางด้านร้อนอยู่ระหว่าง 150-250 องศาเซลเซียส และปริมาตรน้ำ 5-9 ลิตร เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ได้จากระบบ โดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวด้วยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design) จากนั้นจึงคำนวณประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบ และการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่อของทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก และอะลูมิเนียมกับท่อความร้อน ซึ่งในขั้นตอนนี้กำหนดให้ฮีทเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ภูวัดโดยใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Lab View จากผลการทดลองพบว่าสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางด้านร้อน ปริมาตรของน้ำ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และอุณหภูมิของน้ำร้อน ปรากฏว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำมากกว่าปริมาตรของน้ำ ประสิทธิภาพรวมของระบบมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรอยต่อของทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.5 องศาเซลเซียสต่อวัตต์ และอะลูมิเนียมกับท่อความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-1.4 องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ซึ่งค่าความต้านทานเชิงความร้อนเฉลี่ยที่ได้สามารถใช้ในการปรับปรุงระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน

การทดลองตอนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนของเตาหุงต้มที่มีการติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบที่ออกแบบ จากการทดลองพบว่าเมื่อเตาหุงต้มมีการติดตั้งกับระบบที่ออกแบบจะมีปริมาณความร้อนลดลงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเตาหุงต้มที่ไม่ติดตั้งกับระบบที่ออกแบบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบสามารถนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสำหรับใช้ในครัวเรือนได้ถึงแม้จะได้กำลังไฟฟ้าน้อย ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขสำหรับงานวิจัยนี้ควรปรับปรุงการออกแบบระบบเมื่อติดตั้งกับเตาหุงต้มเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่สูงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อนำระบบไปถ่ายทอดให้กับประชาชนในพื้นที่ชนบทของประเทศต่างๆ ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาคริต ทองอุไร. 2544. หลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [2] ปารเมศ ชูติมา. (2530). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] ประดิษฐ์เทิดทูล, กาลึกความร้อน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.
- [4] สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2559, https://www.enertron-inc.com/pdf/thermal_design_guidelines/How-to-select-a-heat-pipe.pdf
- [5] มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2559, http://thesis.swu.ac.th/swuthesis/Mech_Eng/Anusorn_S.pdf
- [6] สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2559, <http://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20388/Notes/Natural%20Convection.pdf>
- [7] นักสัทธิ์ คุ้มณาชัย. (2533). การถ่ายเทความร้อน. ปรับปรุงและพิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. โครงการ ตำราเรียนสำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- [8] ไพโรจน์ วิริยจारी. 2544. การออกแบบพื้นที่การตอบสนอง Response Surface Design. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่คณะอุตสาหกรรมเกษตร. 137 น
- [9] นงเยาว์ ชูสุข. 2544. เทคนิคในการพัฒนาผลิตภัณฑ์. ปราชญ์บุรี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะอุตสาหกรรมเกษตร. 37 น.
- [10] กัลยาณี เต็งพงศธร. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชาการวางแผนการทดลองทางอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 15 น.
- [11] อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. 2550. การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร. พิมพ์ครั้งที่4. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 168 น
- [12] Alanne, K., Laukkanen, T., Saari, K., & Jokisalo, J. (2014). Analysis of a wooden pellet-fueled domestic thermoelectric cogeneration system. *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 1-10. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.10.054
- [13] Alanne, K., & Jokisalo, J. (2014). Energy analysis of a novel domestic scale integrated wooden pellet-fueled micro-cogeneration concept. *Energy and Buildings*, 80, 290-301. doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.035
- [14] A.F. Mill, Heat transfer, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [15] Ahiska Rasit, M. H. (2014). A review: Thermoelectric generators in renewable energy. 4(1), 128-136.
- [16] Allen, D.T., Mallon, W.C., Further development of self-powered boilers, In: Proceedings of 18th International Conference on Thermoelectrics, Baltimore, 1999, pp. 80–83.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Allen, D., Wonsowski, J., Thermoelectric self-powered hydronic heating demonstration, In: The Annual Winter Meeting of the American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, San Francisco, 18-21 Jan. 1998.
- [18] Bhattacharya, S.C., Albina, O., Abdul, P.S. (2002) Emission factors of wood and charcoal-fired cook stoves. *Biomass Bioenergy*, 23:453–69.
- [19] Boy E, Bruce N, Smith KR, Hernandez R (2000) Fuel efficiency of an improved wood-burning stove in rural Guatemala: implications for health, environment, and development. *Energy for Sustainable Development* 4(2):23-31.
- [20] Bass J.C., Thelin J., Development of a self-powered pellet stove, In: Proceedings of 19th International Conference on Thermoelectrics, 20-24 Aug. 2000, Cardiff, 2000.
- [21] Biolite, 2015. Available from: www.biolitestove.com/BioLite.html.
- [22] Brol C., Moloczniak K., Dibble A., Donahue I., McKimpson N., First generation thermoelectric cookstove, In: Multi-Disciplinary Senior Design Conference, 2008.
- [23] Brazdil, M., & Pospisil, J. (2013). Thermoelectric Power Generation Utilizing the Waste Heat from a Biomass Boiler. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 2198-2202. doi:10.1007/s11664-013-2570-7
- [24] Crane, D. T., & Jackson, G. S. (2004). Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1565-1582. doi:10.1016/j.enconman.2003.09.003
- [25] Cotter, T.P. "Theory of heat pipes." USAEC Report LA-3246, Contract W7405-3ng-36. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, 1965.
- [26] Cheung, H. "A critical review of heat pipe theory and applications." USAEC Report UCRL-50453. *Lawrence Radiation Laboratory*, University of California, 1968.
- [27] Chisholm, D. "The heat pipe." M&B Technical Library TL/ME/2, Published by Mills and Boon Ltd., London, 1971.
- [28] Champier, D., Bedecarrats, J. P., Rivaletto, M., & Strub, F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35(2), 935-942. doi:10.1016/j.energy.2009.07.015
- [29] Champier, D., Rivaletto, M., Strub, F., TEGBioS: a prototype of thermoelectric Power generator for biomass stoves, In: Proceedings of 22nd international conference on efficiency, cost, optimization, simulation, and environmental impact of energy systems, Paraná, Brazil, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] Champier, D., Rivaletto, M., Strub, F., Improving biomass stove with a thermoelectric generator, In: 5th conference on sustainable development of energy water and environment, Dubrovnik, 2009.
- [31] Champier, D., Bedecarrats, J. P., Rivaletto, M., & Strub, F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35(2), 935-942. doi:10.1016/j.energy.2009.07.015
- [32] Champier, D., Bédécarrats, J. P., Kousksou, T., Rivaletto, M., Strub, F., & Pignolet, P. (2011). Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove. *Energy*, 36(3), 1518-1526. doi:10.1016/j.energy.2011.01.012
- [33] Champier, D., Favarel, C., Bedecarrats, J.P., Kousksou, T., Rozis, J.F., Prototype combined heater/thermoelectric power generator for remote applications, *J. Electron. Mater.* 42 (7) (2013) 1888–1899.
- [34] Date, A., Date, A., Dixon, C., & Akbarzadeh, A. (2014). Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. *Solar Energy*, 105, 656-668. doi:10.1016/j.solener.2014.04.016
- [35] Fleurial JP. Thermoelectric power generation materials: technology and application opportunities. *JOM J Miner, Met Mater Soc* 2009; 61(4):79–85.
- [36] Gaugler, R.S., US Patent 2350348, Appl. 21 Dec, 1942. Published 6 June, 1944
- [37] Grover, G.M., US Patent 3229759. Filed 1963.
- [38] Grover, G.M. “Evaporation–condensation heat transfer device.” US Patent No. 3229759. Appl. 2 December, 1963. Published 18 January, 1966.
- [39] <http://rd.kek.jp/slides/20130702/Thermal-1.pdf>, สืบค้นวันที่ 13 สิงหาคม 2559
- [40] Gao Min., & Rowe D.M. (2002). Recent concepts in thermoelectric power generation, In: 21st International Conference on Thermoelectronics, pp 365–374.
- [41] Hamid Elsheikh, M., Shnawah, D. A., Sabri, M. F. M., Said, S. B. M., Haji Hassan, M., Ali Bashir, M. B., & Mohamad, M. (2014). A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 337-355. doi:10.1016/j.rser.2013.10.027
- [42] Freedman S.I. (1996). Thermoelectric power generation, in: G.W. Sutton (Ed.), *Direct Energy Conversion*, McGraw-Hill, New York, NY, pp. 141–176.
- [43] Gao Min., & Rowe D.M. (1998). Evaluation of thermoelectric modules for power generation, *J. Power Sources* 73, 193–198.
- [44] Hi-Z, A brochure of TE’s prototypes for different applications manufactured by Hi-Z, 2015. Available from: http://www.hiz.comz.com/uploads/2/3/0/9/23090410/___hi-z_applications.pdf.

- [45] Hoskins S., Poandl L., Scannell D., Fontaine Y.J., Higgins D., Thermoelectric power system for improved Haitian cookstove, In: Multi-Disciplinary Senior Design Conference, 2008.
- [46] Horman C., Lee M., Wagner M., Thermoelectric Cook stove, Santa Clara University, Santa Clara, CA, 2013.
- [47] Favarel, C., Champier, D., Bédécarrats, J.P., Kousksou, T., Strub, F., Study of a thermoelectric system equipped with a maximum power point tracker for stand-alone electric generation, In: 9th European Conference on Thermoelectrics, 1449, 2012, pp. 520–523.
- [48] Goudarzi, A. M., Mazandarani, P., Panahi, R., Behsaz, H., Rezanian, A., & Rosendahl, L. A. (2013). Integration of Thermoelectric Generators and Wood Stove to Produce Heat, Hot Water, and Electrical Power. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 2127-2133. doi:10.1007/s11664-013-2545-8
- [49] Hi-Z, Manufacturer of thermoelectric modules, 2015. Available from: www.hiz.com.
- [50] International Energy Agency, World Energy Outlook 2006, IEA Publications, France
- [51] Lertsatitthanakorn, C. (2007). Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresour Technol*, 98(8), 1670-1674. doi:10.1016/j.biortech.2006.05.048
- [52] Kinsella, C. E., O'Shaughnessy, S. M., Deasy, M. J., Duffy, M., & Robinson, A. J. (2014). Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module. *Applied Energy*, 114, 80-90. doi:10.1016/j.apenergy.2013.09.025
- [53] Loh CK, Harris Enisa and Chou DJ Enertron, Inc. Comparative Study of Heat Pipes Performances in Different Orientations. Mesa, Arizona.
- [54] Incropera, F.P.; & Dewitt, D.P. (1985). Introduction to Heat Transfer. International Edition. London. John wiley & Sons, Inc.
- [55] Jackop, M.; & Hawkins,G.A. (1957) Elements of Heat Transfer. International Edition. London. John Wiley & Sons, Inc.
- [56] Luan, W. (2004). Recent developments of thermoelectric power generation. *Chinese Science Bulletin*, 49(12), 1212. doi:10.1360/04we0037
- [57] Ismail, B., & Ahmed, W. (2009). Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology. *Recent Patents on Electrical Engineering*, 2(1), 27-39. doi:10.2174/1874476110902010027
- [58] Killander A., & Bass J., A stove-top generator for cold areas, In: Proceedings of the 15th international conference on thermoelectrics, Pasadena, USA, 1996, pp. 390–393.

- [59] Killander A., Generating electricity for families in northern Sweden, Report from the Department of Manufacturing Systems Royal Institute of Technology, 1996.
- [60] Jetter, J. J., & Kariher, P. (2009). Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 294-305. doi:10.1016/j.biombioe.2008.05.014
- [61] Juanicó, L. E., Rinalde, F., Tagliavere, E., & Molina, M. (2013). Novel Heat Controller for Thermogenerators Working on Uncontrolled Stoves. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 1776-1780. doi:10.1007/s11664-012-2429-3
- [62] Moser, W., Friedl, G., Aigenbauer, S., Heckmann, M., Hofbauer, H., A biomass-fuel based micro-scale CHP system with thermoelectric generators, In: *Central European Biomass Conference*, Messe Center Graz, Austria, 2008.
- [63] Moser, W., Friedl, G., Haslinger, W., Hofbauer, H., Small-scale pellet boiler with thermoelectric generator, In: *Proceedings of 25th International Conference on Thermoelectrics*, Vienna, Austria, 2006.
- [64] Moser, W., Aigenbauer, S., Heckmann, M., Fried, G., Hofbauer, H., Micro-scale CHP based on biomass-intelligent heat transfer with thermoelectric generators, In: *BIOENERGY*, Jyväskylä, Finland, 2007.
- [65] Niu, X., Yu, J., & Wang, S. (2009). Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator. *Journal of Power Sources*, 188(2), 621-626. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.12.067
- [66] Maydanik, Y. F. (2005). Loop heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 25(5-6), 635-657. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.07.010
- [67] Mastbergen D, Willson B. Generating Light from Stoves using a Thermoelectric Generator. Presented at the ETHOS International Stove Research Conference, 2005 Seattle Washington. Available at www.vrac.iastate.edu/ethos/last accessed december 2010
- [68] Ozisik M.N. (1977). *Basic Heat Transfer*. Kogakusha. International Edition. Turkey. McGraw-Hill, Ltd,
- [69] Nuran Bradley. 2007. *The Response Surface Methodology*. India: Department of Mathematical Sciences Indiana University of South Bend
- [70] Mukhopadhyay, R., Sambandam, S., Pillarisetti, A., Jack, D., Mukhopadhyay, K., Balakrishnan, K., . . . Smith, K. (2012). Cooking practices, air quality, and the acceptability of advanced cookstoves in Haryana, India: an exploratory study to inform large-scale interventions. *Global Health Action*, 5(1), 19016. doi:10.3402/gha.v5i0.19016

- [71] MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T., & Roden, C. (2008). A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for Sustainable Development*, 12(2), 56-65. doi:10.1016/s0973-0826(08)60429-9
- [72] Melcor Corp., Thermoelectric Engineering Handbook provided by Melcor Corp, 2015. Available from https://home.zhaw.ch/~fusa/PSS_VLE_C/CHAPTER_03/CASES/Materials/Melcor_TE_Handbook.pdf.
- [73] Mastbergen D., Development and optimization of a stove-powered thermoelectric generator, Colorado State University, 2008.
- [74] Phillips A., Cummings L., McCune C., Zhang X., Thermoelectric power pack for next generation cook stove, In: Multi-Disciplinary Senior Design Conference, 2008.
- [75] P10462, Thermo-Electric Cook Stove #3, 2015. Available from: <https://edge.rit.edu/content/P10462/public/Home>.
- [76] O'Shaughnessy, S. M., Deasy, M. J., Kinsella, C. E., Doyle, J. V., & Robinson, A. J. (2013). Small scale electricity generation from a portable biomass cookstove: Prototype design and preliminary results. *Applied Energy*, 102, 374-385. doi:10.1016/j.apenergy.2012.07.032
- [77] Nuwayhid RY, Rowe DM, Min G. Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. *Renewable Energy* 2003; 28: 205e22.
- [78] O'Shaughnessy, S. M., Deasy, M. J., C. E., Doyle, J. V., & Robinson, A. J., Field trial testing of an electricity-producing portable biomass cooking stove in rural Malawi, *Energy Sustain. Dev.* 20 (2014) 1–10.
- [79] Mal R., Prasad R., Vijay V.K., Renewable energy from biomass cook stoves for off grid rural areas, In: 1st International Congress on Environmental, Biotechnology, and Chemistry Engineering, 2014, pp.113–117.
- [80] Nuwayhid, R.Y., Moukalled, F., AbuSaid, R., Daaboul, M., Practical design Considerations for a rural stove-top thermoelectric generator, In: Proceedings of 19th International Conference on Thermoelectrics, 2000, pp. 490–497.
- [81] Power pot, 2015. Available from: <http://www.powerpractical.com/products>.
- [82] Nigel Bruce, R. P-P., & Rachel Albalak. (2000). Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge. 78, 1080-1092.
- [83] Qiu, K., Hayden, A.C.S., Integrated thermoelectric generator and application to self-powered heating systems, In: Proceedings of 25th International Conference on Thermoelectrics, Vienna, Austria, August 2006.
- [84] Qiu, K., & Hayden, A. C. S. (2008). Development of a thermoelectric self-powered residential heating system. *Journal of Power Sources*, 180(2), 884-889. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.02.073

- [85] Qiu, K., & Hayden, A. C. S. (2009). A Natural-Gas-Fired Thermoelectric Power Generation System. *Journal of Electronic Materials*, 38(7), 1315-1319. doi:10.1007/s11664-008-0648-4
- [86] Qiu, K., & Hayden, A. C. S. (2010). Development of Thermoelectric Self-Powered Heating Equipment. *Journal of Electronic Materials*, 40(5), 606-610. doi:10.1007/s11664-010-1473-0
- [87] Tellurex, Manufacturer of thermoelectric modules, 2015. Available from: www.tellurex.com.
- [88] Tecteg, Manufacturer of thermoelectric modules, 2015. Available from: www.tecteg.com.
- [89] Thermalforce, Manufacturer of thermoelectric modules, 2015. Available from: www.thermalforce.de.
- [90] Thermodynamic, Manufacturer of thermoelectric modules, 2015. Available from: www.thermonamic.com.
- [91] Rowe, D.M., 1999. Thermoelectrics, an environmentally-friendly source of electrical power. *Renew. Energy* 16, 1251–1256.
- [92] Sauciuc, I., Erturk, H., Chrysler, G., Bala, V., & Mahajan, R. (2005). Thermal Devices Integrated With Thermoelectric Modules With Applications to CPU Cooling. 2153-2159. doi:10.1115/ipack2005-73243
- [93] Reay, D.A. and Kew, P. "Heat Pipes." 5th ed. USA: Elsevier, 2006.
- [94] Temilade Adeyinka Sesan, B., M.Arch (2011). What's Cooking? Participatory and Market Approaches to Stove Development in Nigeria and Kenya.
- [95] Rowe D.M. (2006). Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source, *Int. J. Innov. Energy Syst. Power* 1 (1), 13–23.
- [96] Rowe D.M. (2012). Thermoelectric harvesting of low temperature natural/waste heat, *AIP Conf. Proc.* 1449 (1), 485–492.
- [97] Riffat, S. B., & Ma, X. (2003). Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(8), 913-935. doi:10.1016/s1359-4311(03)00012-7
- [98] Saqr, K. M., Mansour, M. K., & Musa, M. N. (2008). Thermal design of automobile exhaust based thermoelectric generators: Objectives and challenges. *International Journal of Automotive Technology*, 9(2), 155-160. doi:10.1007/s12239-008-0020-y
- [99] Saqr, K., & Musa, M. (2009). Critical review of thermoelectrics in modern power generation applications. *Thermal Science*, 13(3), 165-174. doi:10.2298/tsci0903165s
- [10] Rowe D.M. (1978) Thermoelectric power generation, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 125 (11R), 1113–1116.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

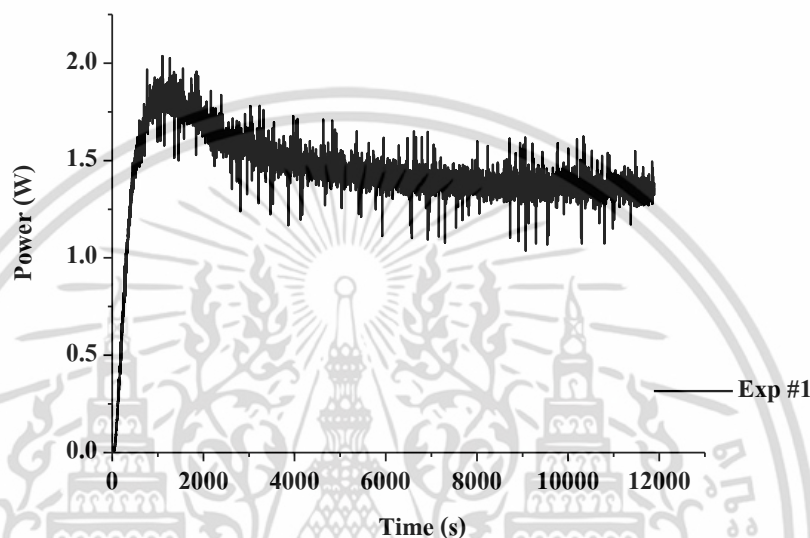
- [101] Rowe D.M. (1994). Thermoelectric generators as alternative sources of low power, *Renew. Energ.* 5, 1470–1478.
- [102] Snyder, G. J. (2008). Small thermoelectric generators. *Electrochemical Society Interface*, 17(3), 54-56.
- [103] Satisfying a burning need, 2015. Available from:
<http://www.research.philips.com/password/download/password28.pdf>.
- [104] Raman, P., Ram, N. K., & Gupta, R. (2014). Development, design and performance analysis of a forced draft clean combustion cookstove powered by a thermoelectric generator with multi-utility options. *Energy*, 69, 813-825. doi:10.1016/j.energy.2014.03.077
- [105] Rugg J., Sawyer B., Bird J., Gorevski T., Masood F., Thermoelectric and fan system for cook stove, In: Multi-Disciplinary Senior Design Conference, 2008.
- [106] Stokes D., Mantini M., Chartier R., Rodes C. Design and testing of a thermoelectric enhanced cookstove add-on (TECA) for indigenous biomass stoves in Kenya, In: 10th International Conference on Healthy Buildings, Brisbane, Australia, 2012.
- [107] Stovemate Kettlefan thermoelectric self-powered fan, 2015. Available from:
http://www.rural-energy.net/catalog/products/productdetail.php?pro_id=412.
- [108] Srivastava A., Duran D., Pinder M., Raghav V., Komerath N., Conceptual design of a thermoelectric Edu-Kitchen system, In: International Conference on Power, Signals, Controls and Computation, 2012, pp.1–6.
- [109] Srivastava A., Design of a Thermoelectric Edu-Kitchen System, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2013.
- [110] Srivastava, A., Pinder, M., Shah, S., Raghav, V., Komerath N., Thermoelectric and thermophotovoltaic micro renewable power systems for home use, In: 10th International Energy Conversion Engineering Conference, August Atlanta, Georgia, 2012.
- [111] URL:www.worldenergyoutlook.org/database_electricity/electricity_access_database.htm.last accessed June 2010.
- [112] Zheng, X. F., Yan, Y. Y., & Simpson, K. (2013). A potential candidate for the sustainable and reliable domestic energy generation–Thermoelectric cogeneration system. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), 305-311. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.03.020
- [113] WHO and United Nations Development Programme (UNDP), *The Energy Access Situation in Developing Countries*, UNDP, New York, 2009.
- [114] URL: www.biolithestove.com/BioLite.html; [15 January 2016]



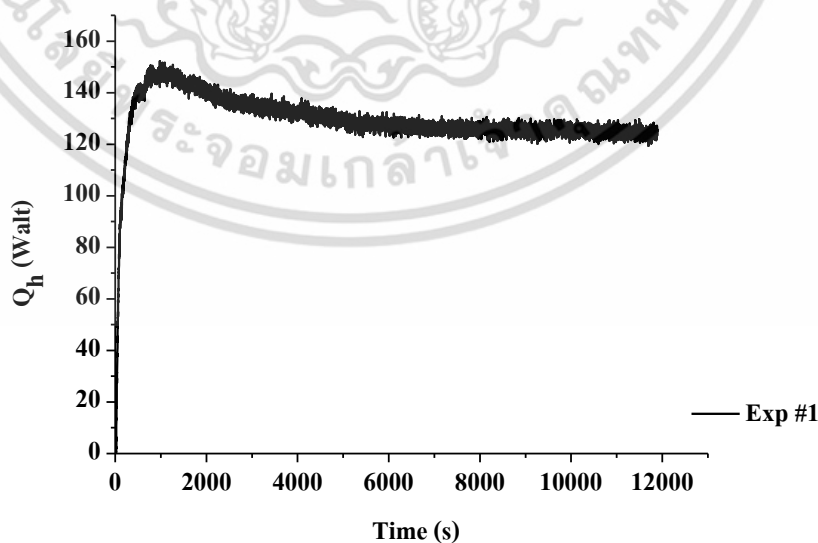
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการทดลองครั้งที่ 1

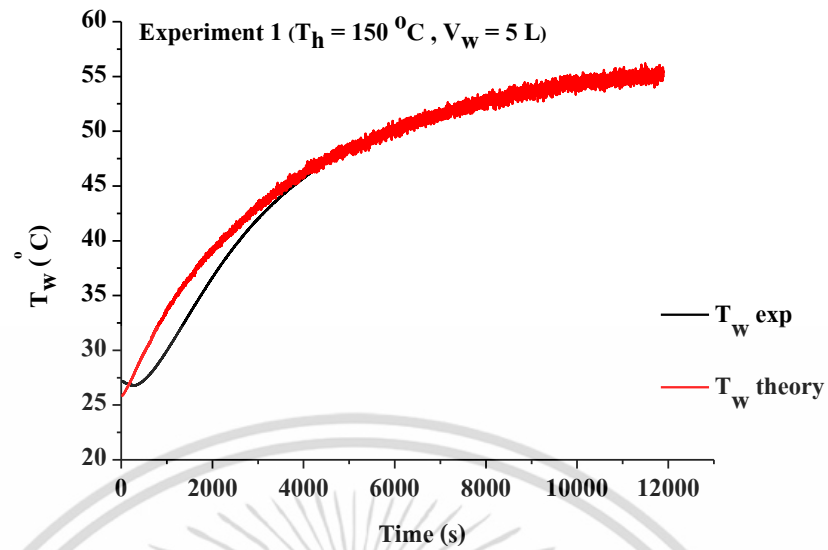


รูปที่ ก.1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 1

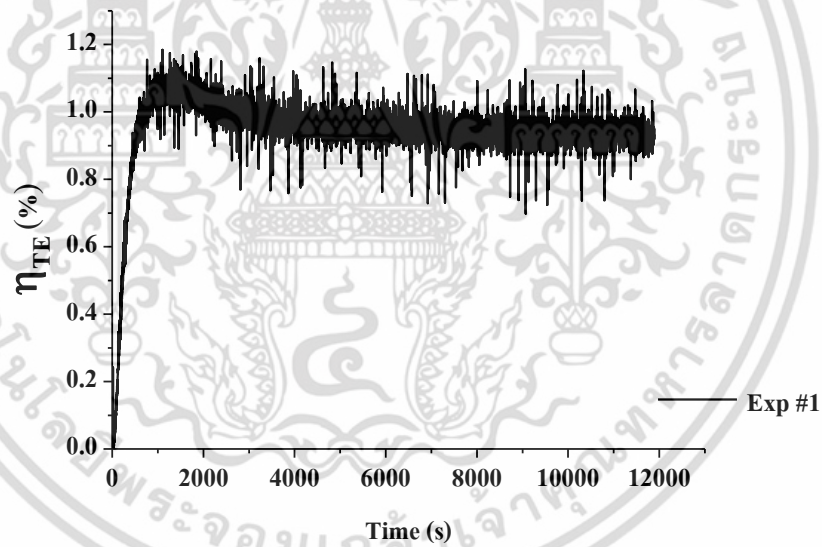


รูปที่ ก.2 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



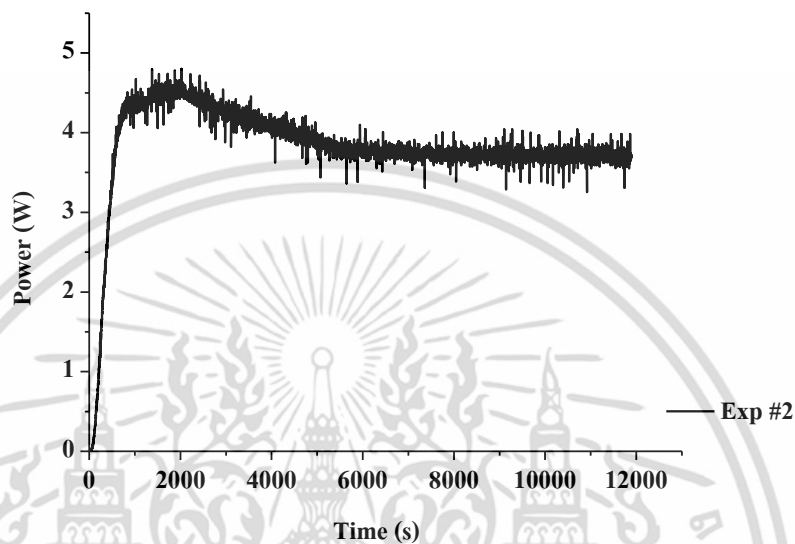
รูปที่ ก.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 1



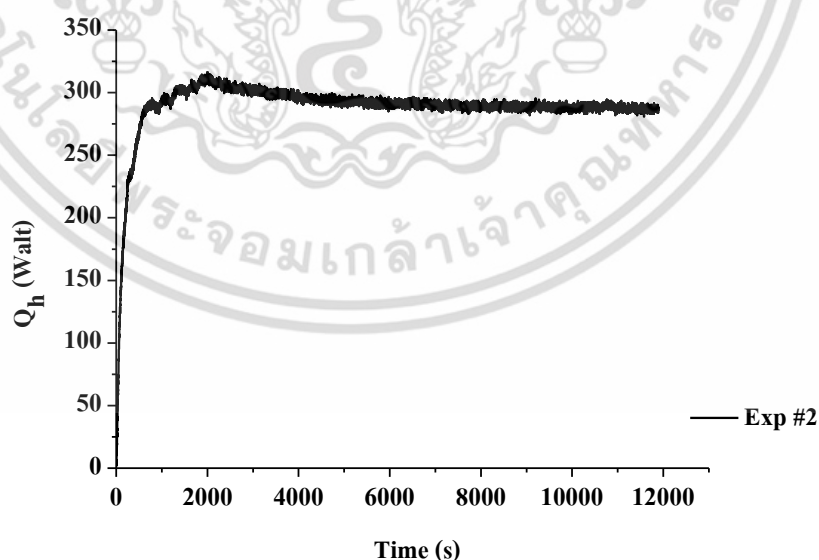
รูปที่ ก.4 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการทดลองครั้งที่ 2

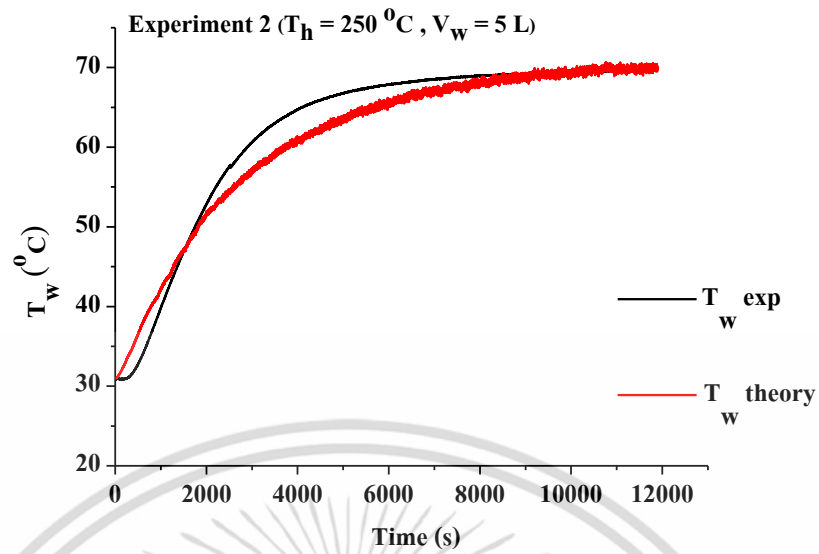


รูปที่ ก.5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 2

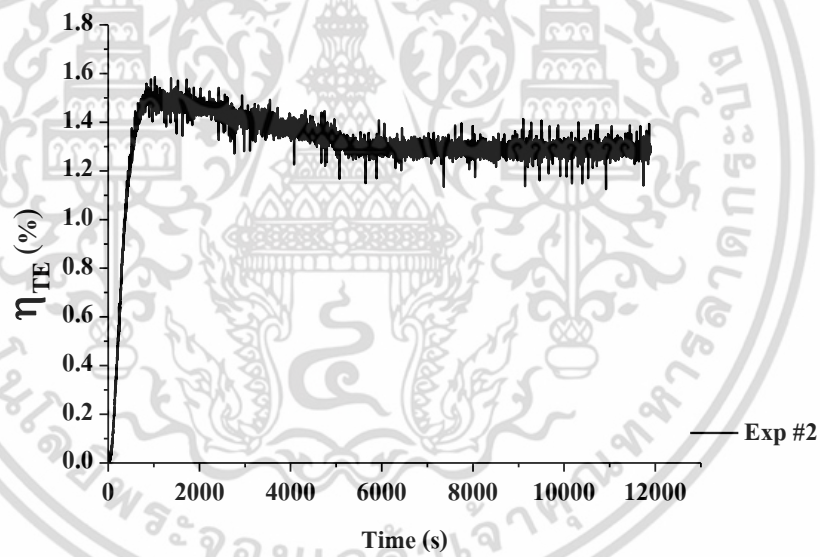


รูปที่ ก.6 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



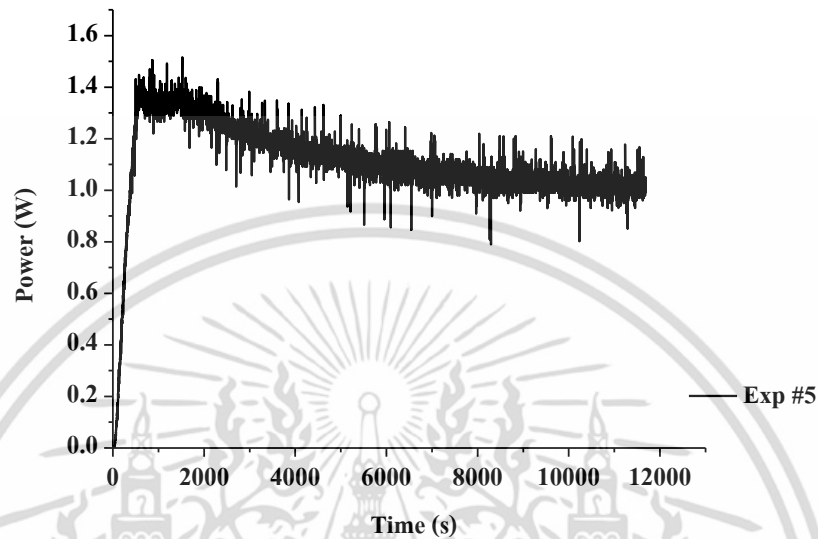
รูปที่ ก.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 2



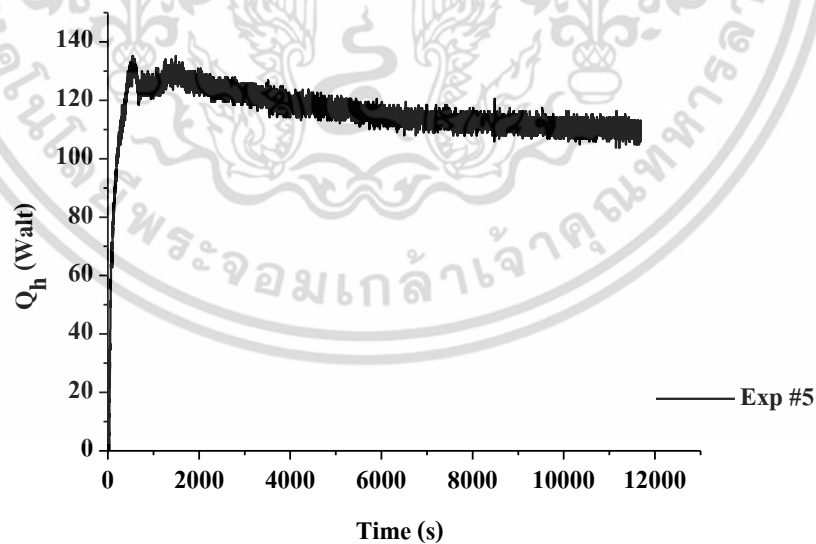
รูปที่ ก.8 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการทดลองครั้งที่ 5

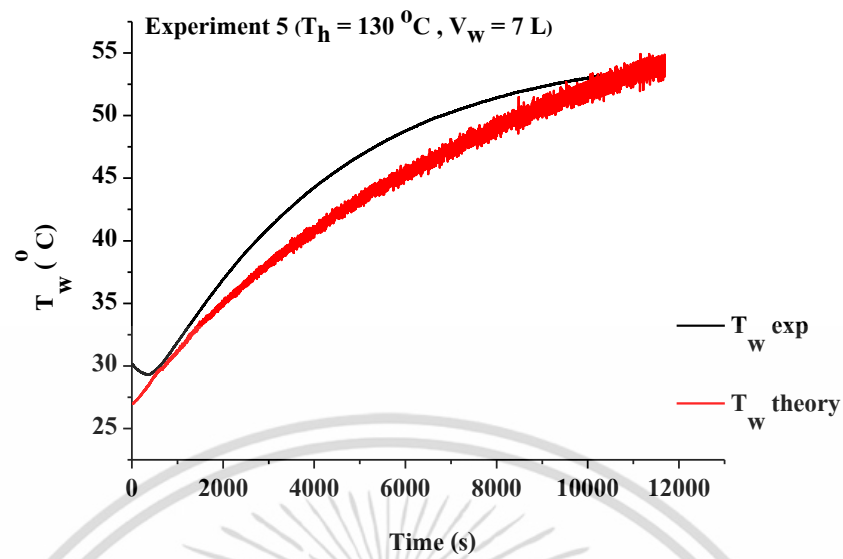


รูปที่ ก.9 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 5

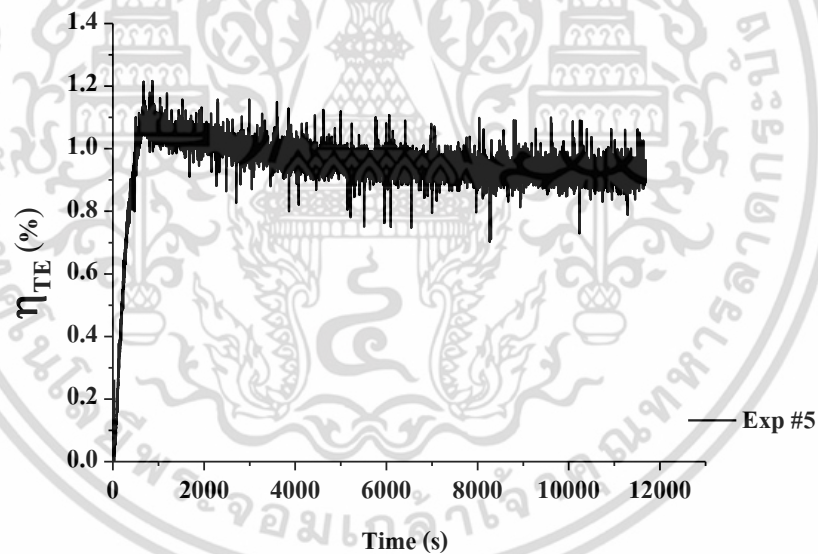


รูปที่ ก.10 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



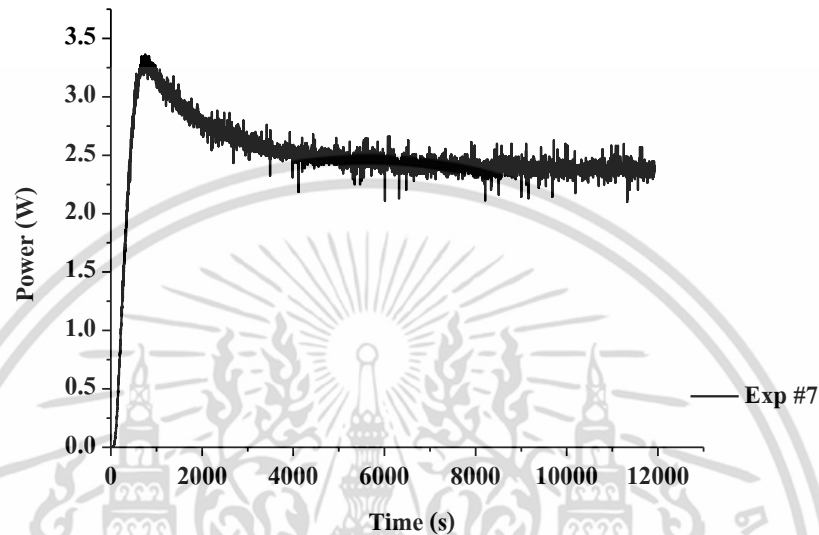
รูปที่ ก.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 5



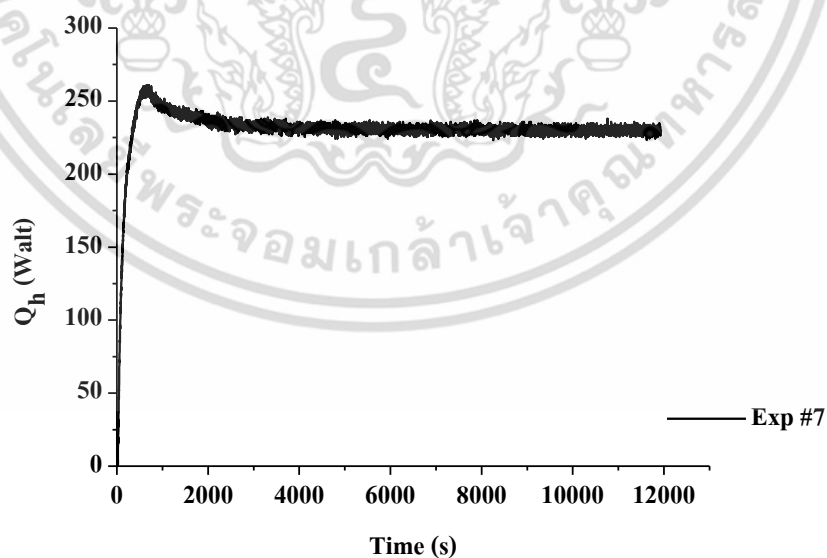
รูปที่ ก.12 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการทดลองครั้งที่ 7

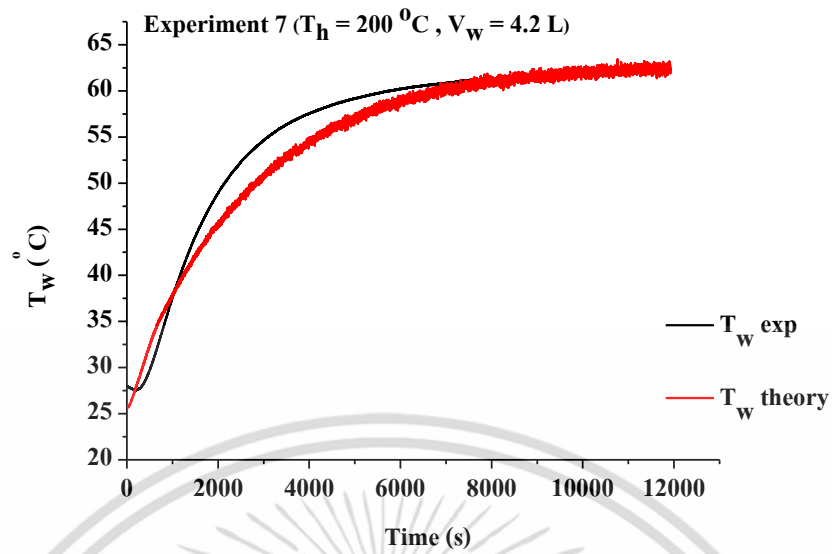


รูปที่ ก.13 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 7

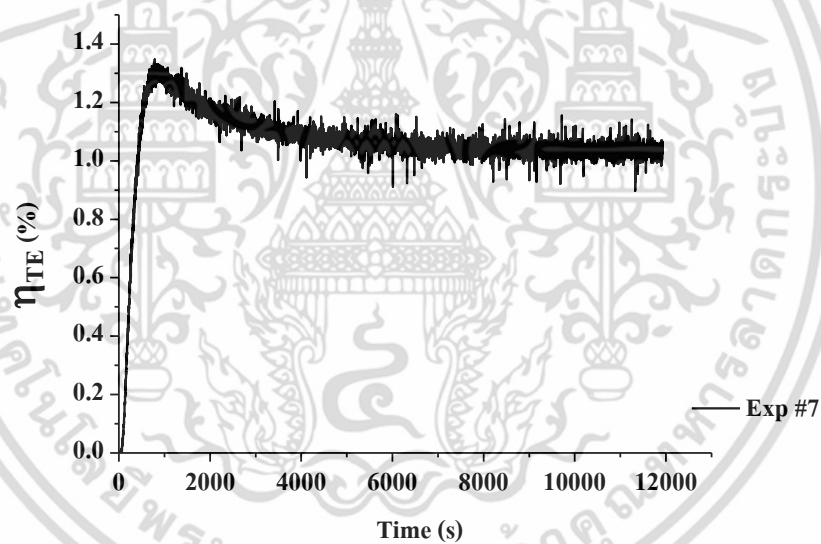


รูปที่ ก.14 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



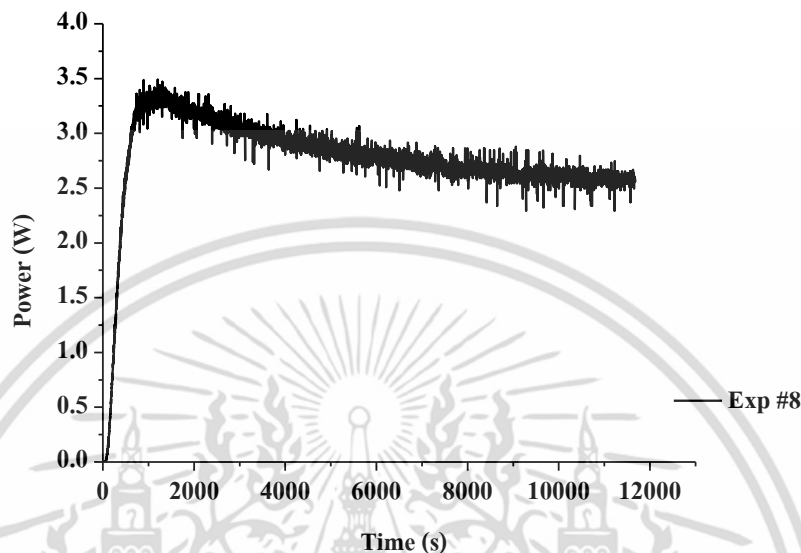
รูปที่ ก.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 7



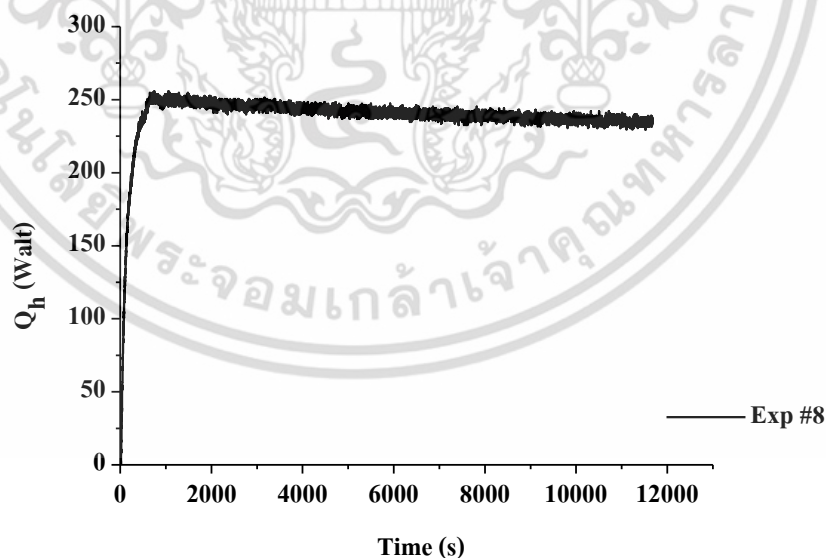
รูปที่ ก.16 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการทดลองครั้งที่ 8

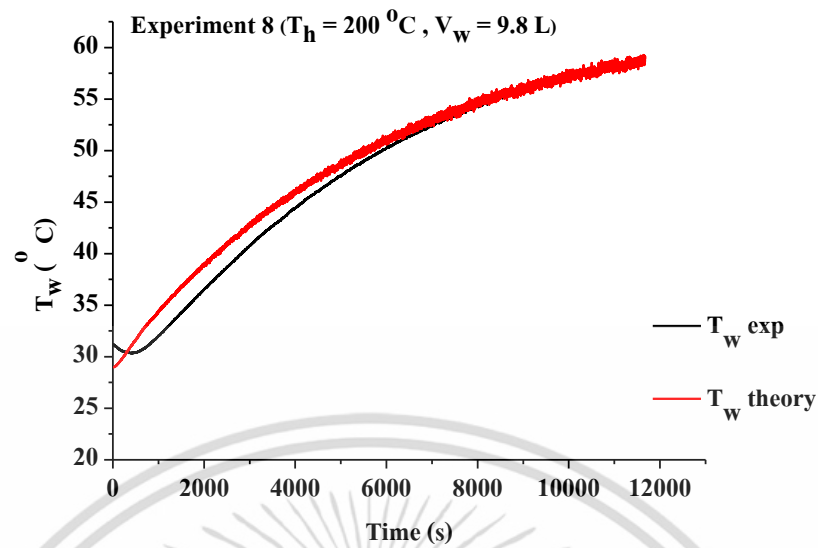


รูปที่ ก.17 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 8

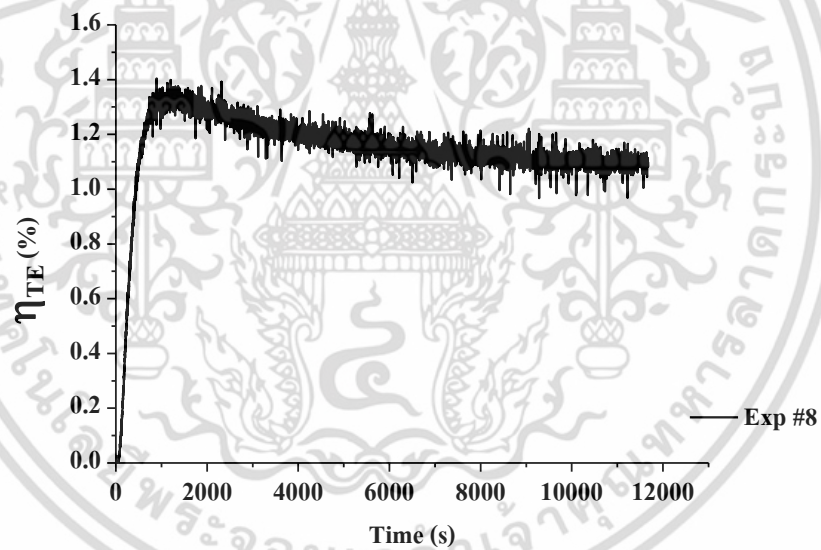


รูปที่ ก.18 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



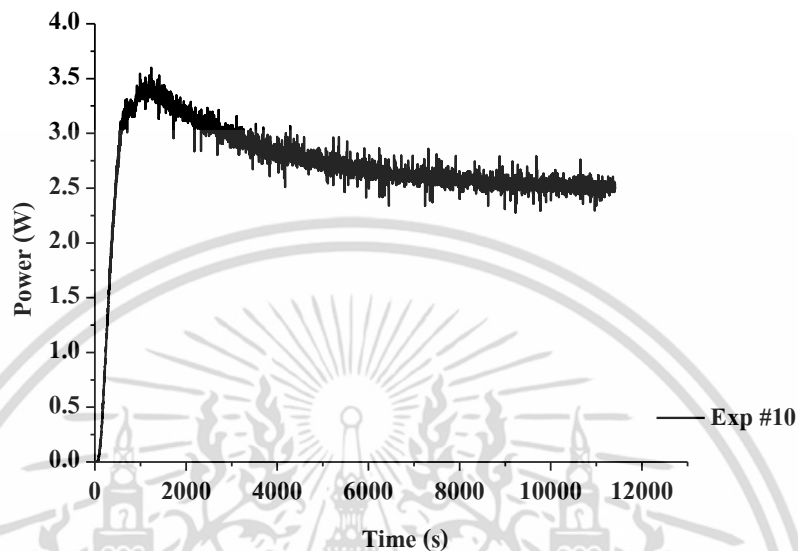
รูปที่ ก.19 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 8



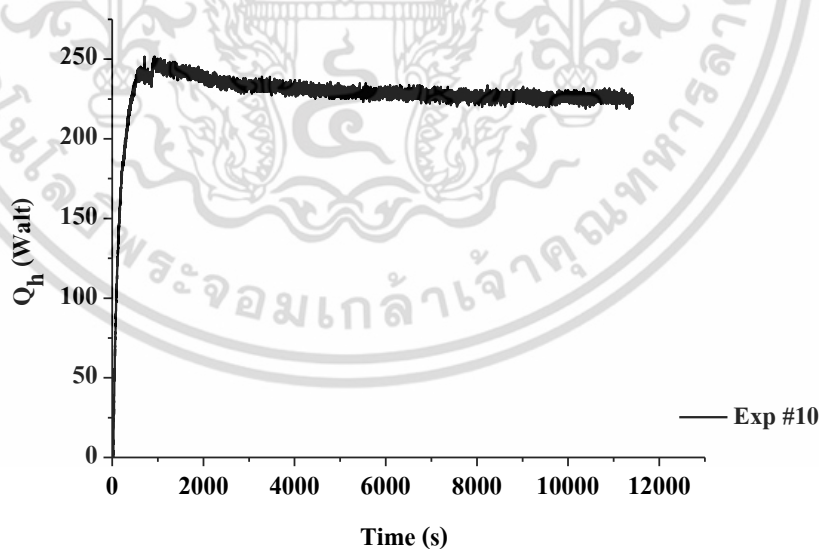
รูปที่ ก.20 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของ ความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการ ทดลองครั้งที่ 10

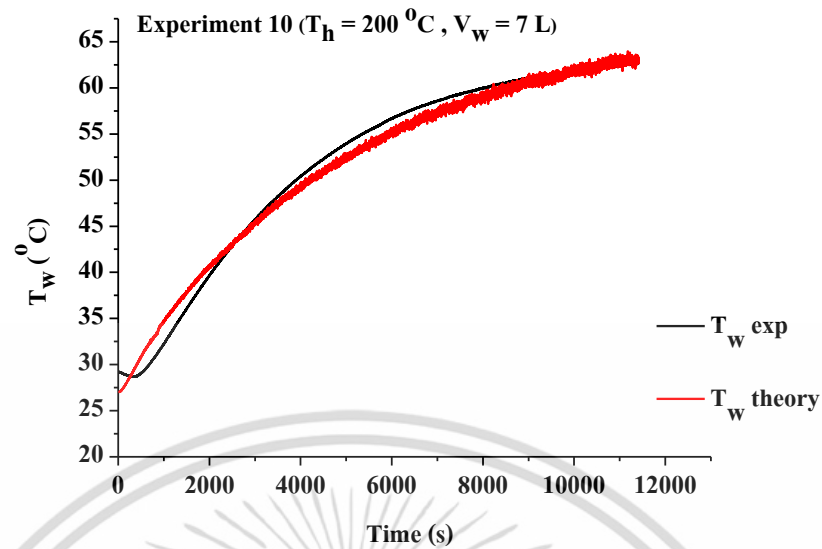


รูปที่ ก.21 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 10

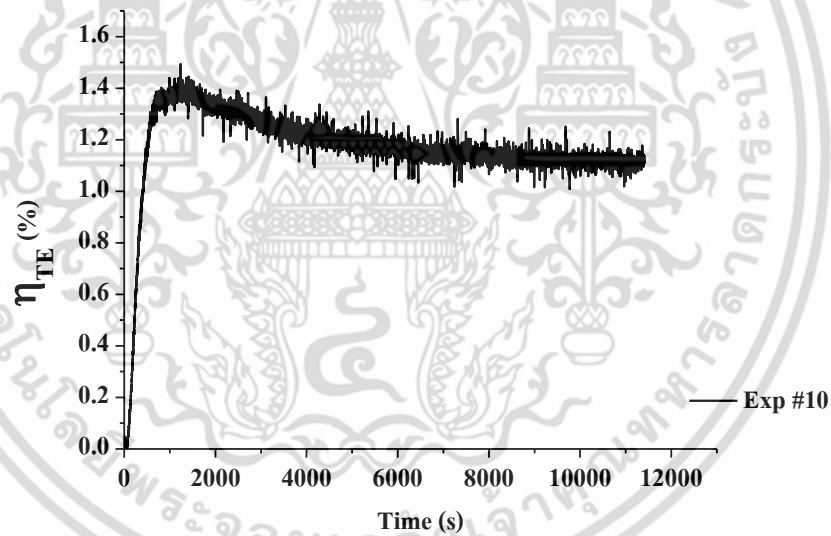


รูปที่ ก.22 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้าน ร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



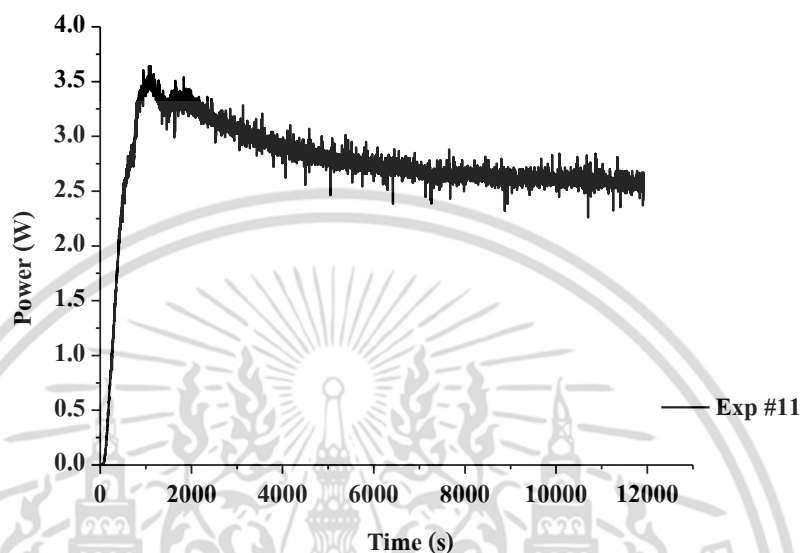
รูปที่ ก.23 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 10



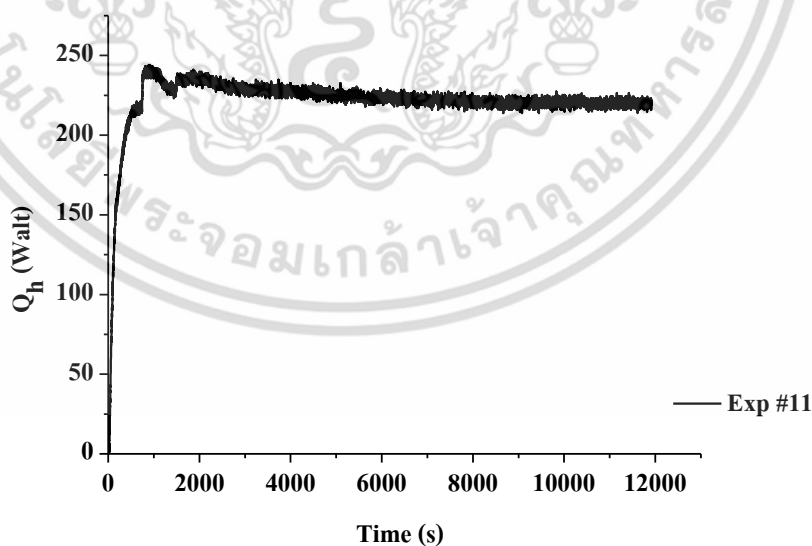
รูปที่ ก.24 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของ ความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการ ทดลองครั้งที่ 11

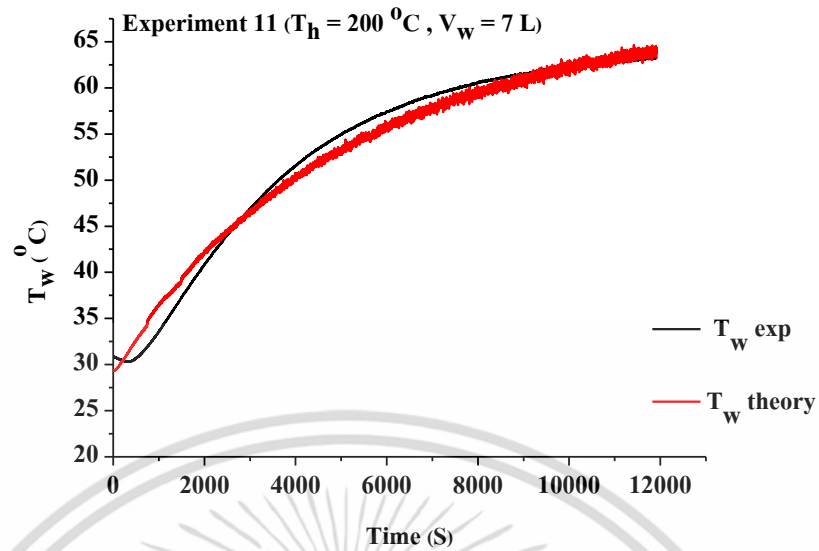


รูปที่ ก.25 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 11

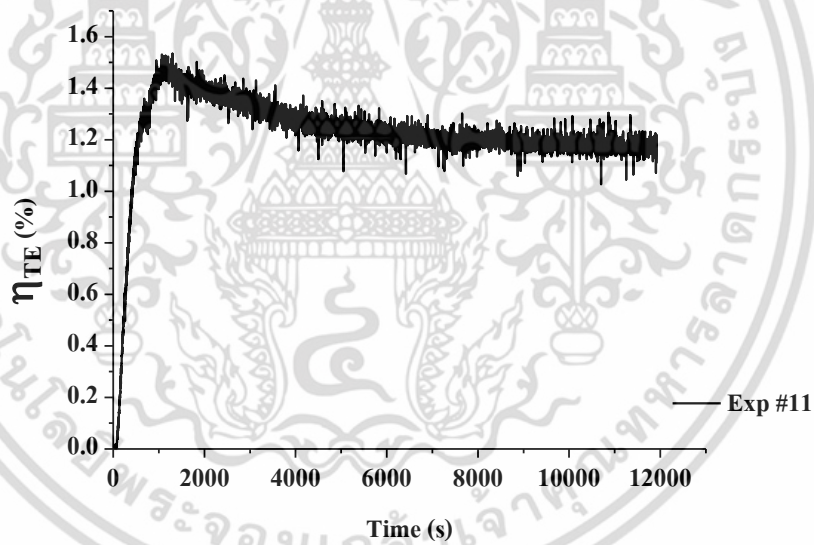


รูปที่ ก.26 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้าน ร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



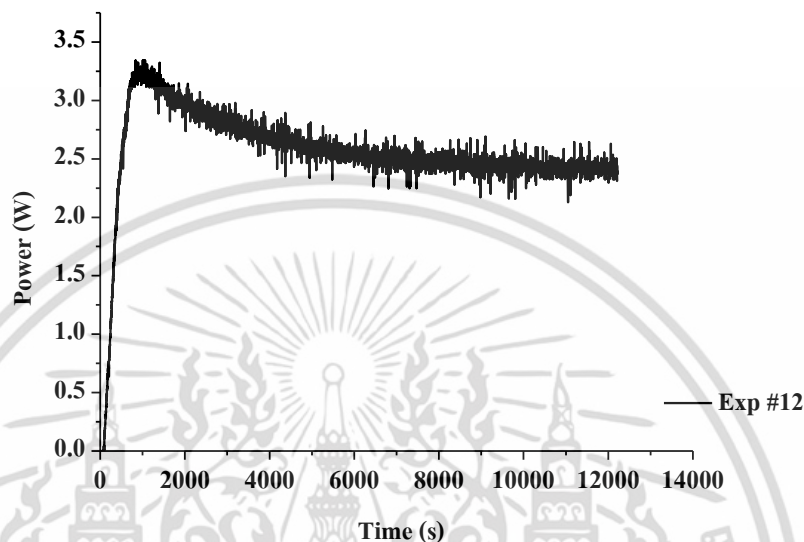
รูปที่ ก.27 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 11



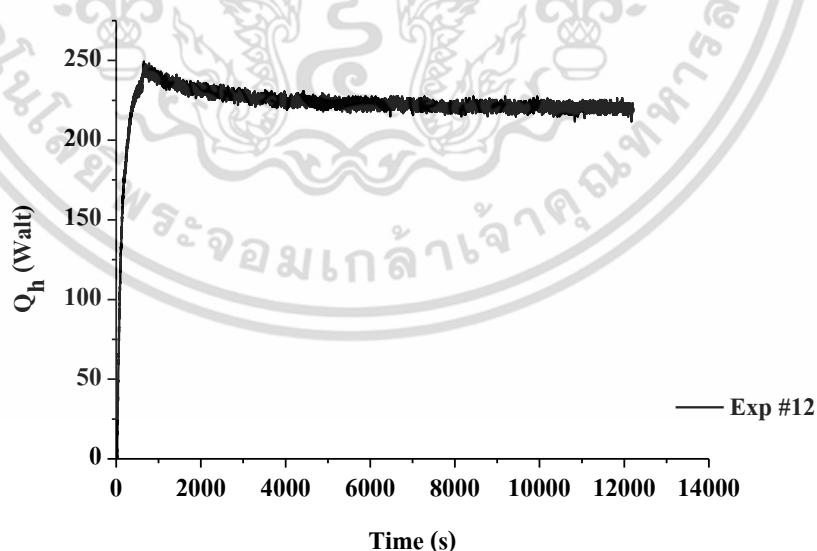
รูปที่ ก.28 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับเวลา อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการวัด ($T_{w,exp}$) และอุณหภูมิน้ำที่ได้จากทฤษฎี ($T_{w,theory}$) กับเวลา และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา ในการทดลองครั้งที่ 11

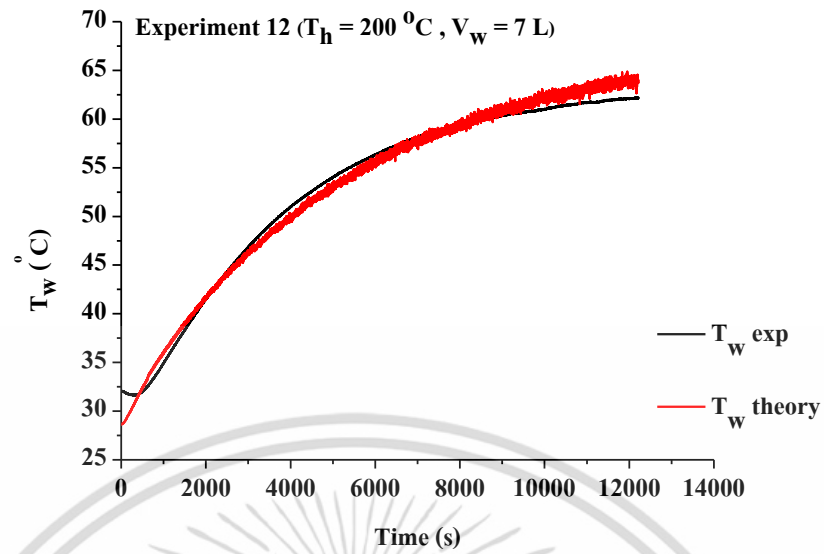


รูปที่ ก.29 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (P) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 12

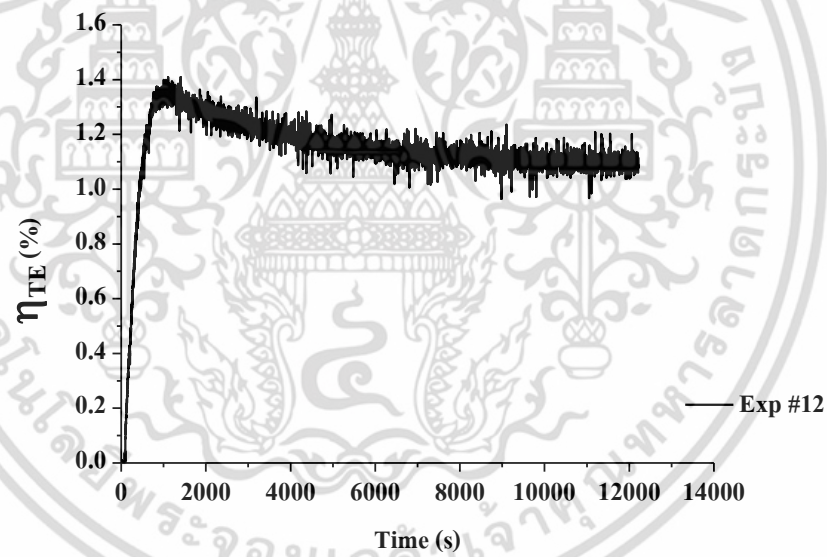


รูปที่ ก.30 อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) กับเวลา เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามการทดลองที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.31 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการวัดและทฤษฎี ในการทดลองที่ 12

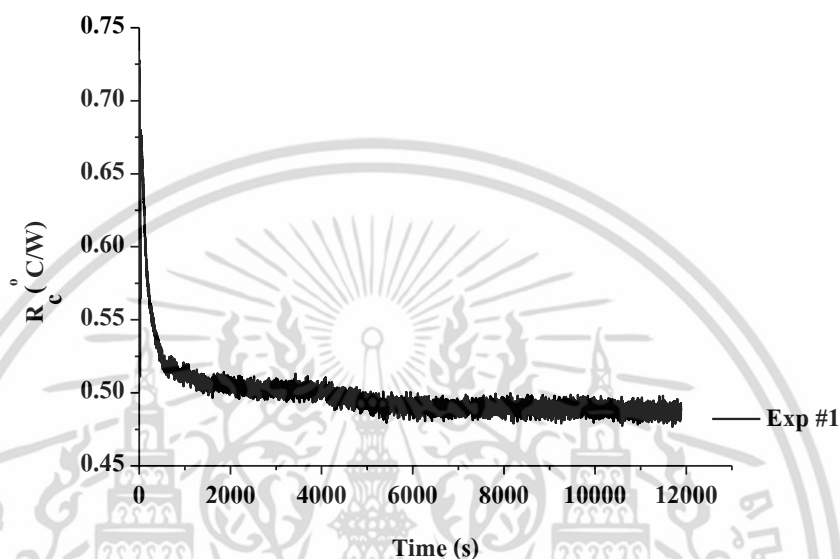


รูปที่ ก.32 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 12

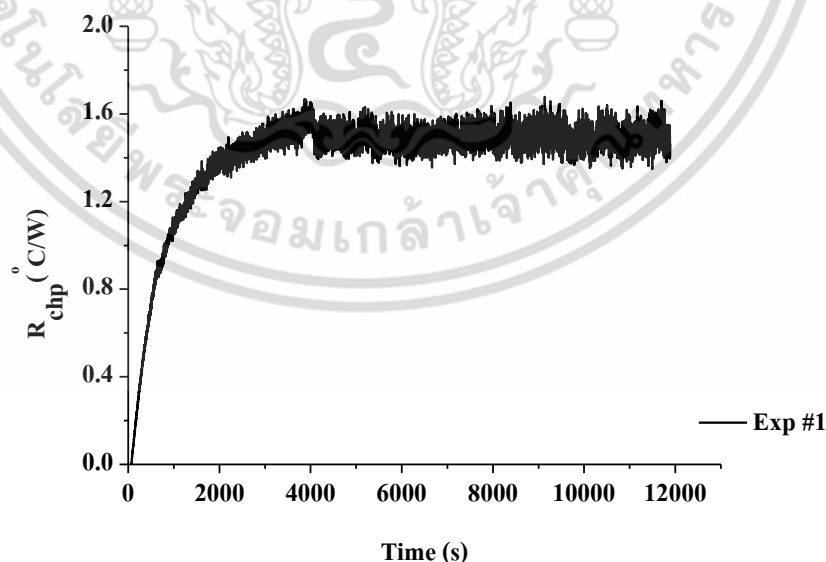
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริกกับเวลา และความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อนกับเวลา ทั้งหมด 13 การทดลอง

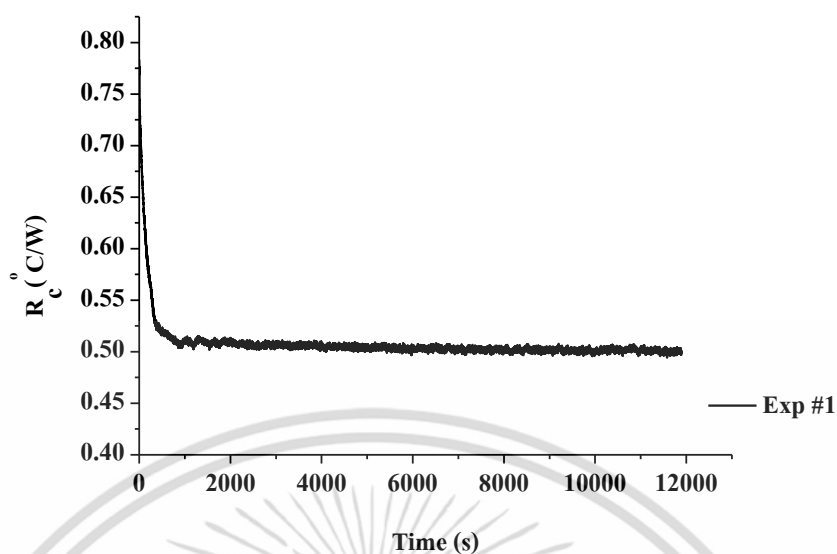


รูปที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1

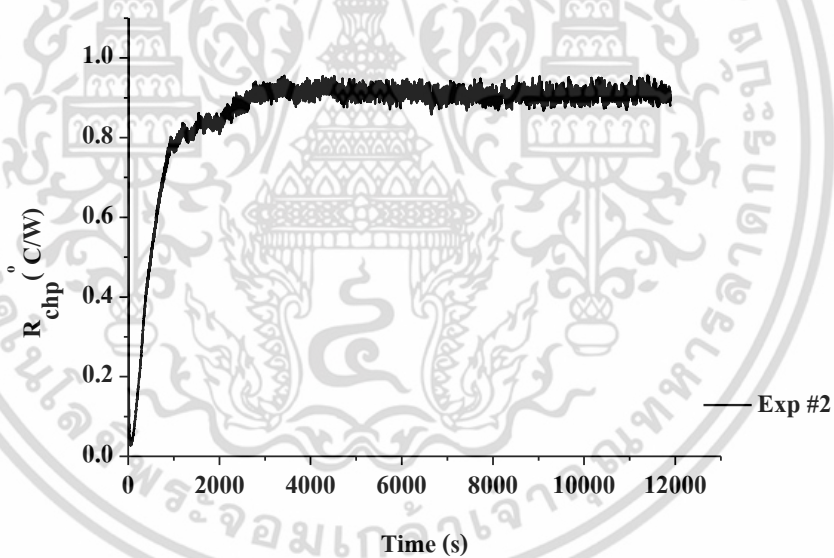


รูปที่ ข.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

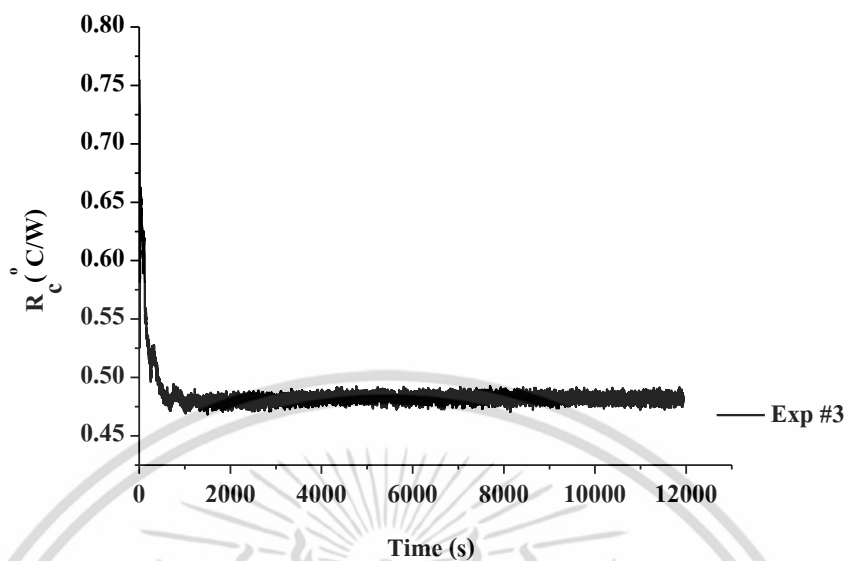


รูปที่ ข.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 2

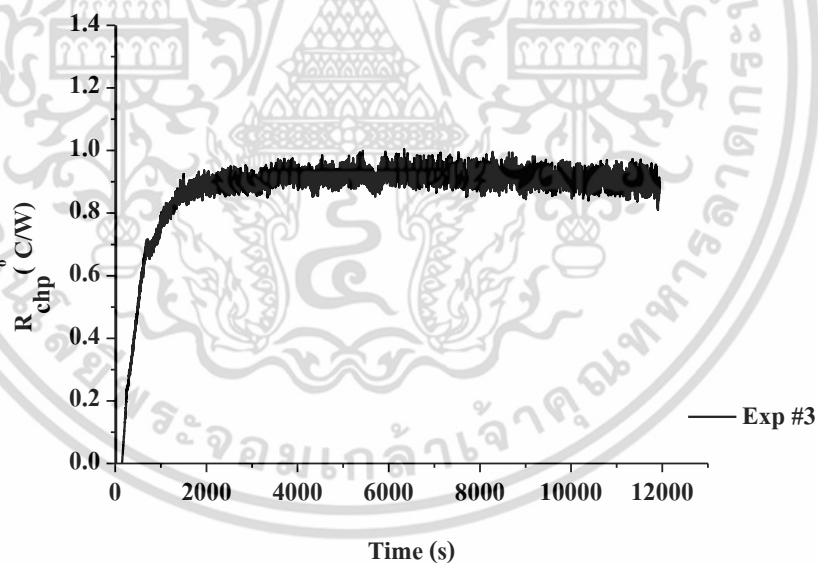


รูปที่ ข.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

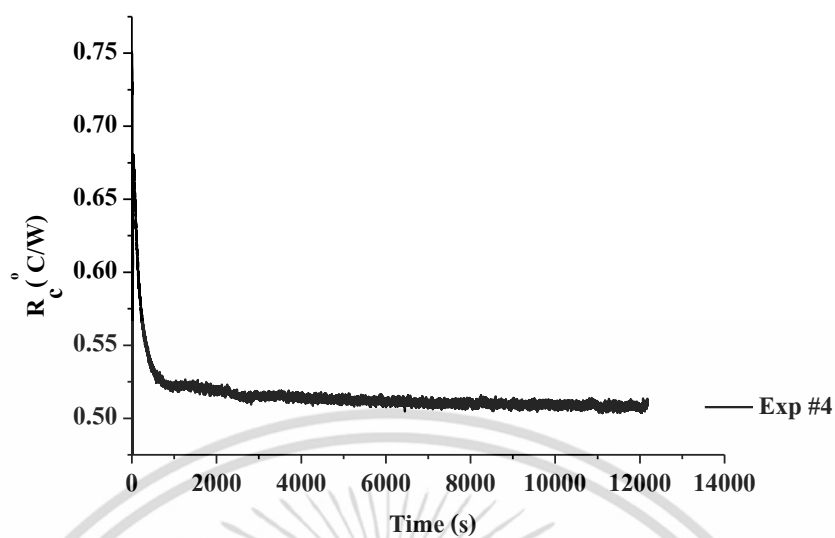


รูปที่ ข.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 3

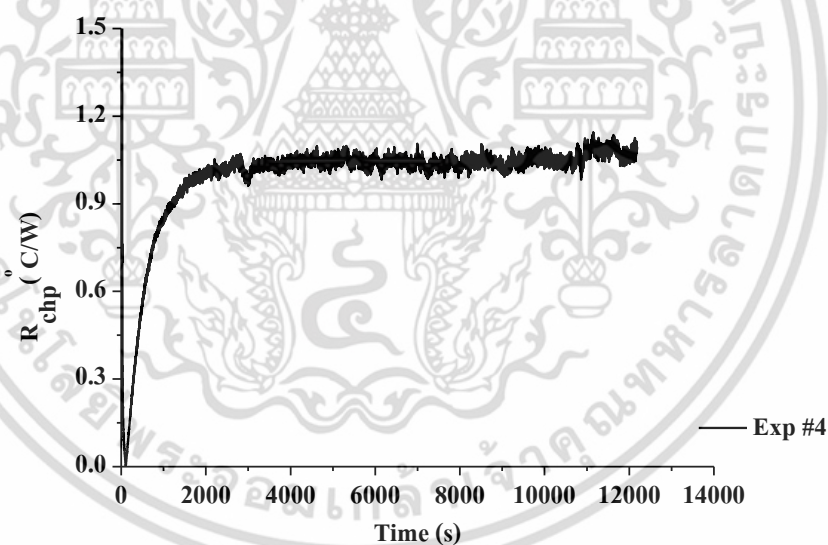


รูปที่ ข.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

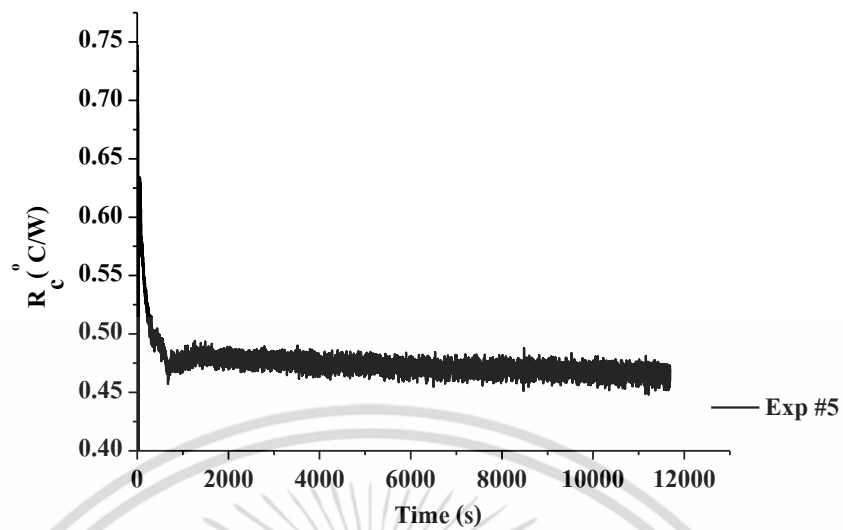


รูปที่ ข.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 4

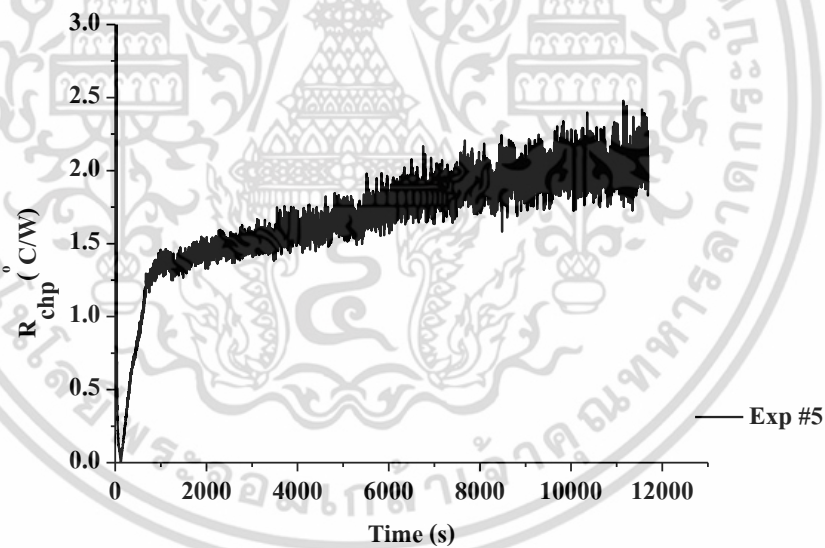


รูปที่ ข.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

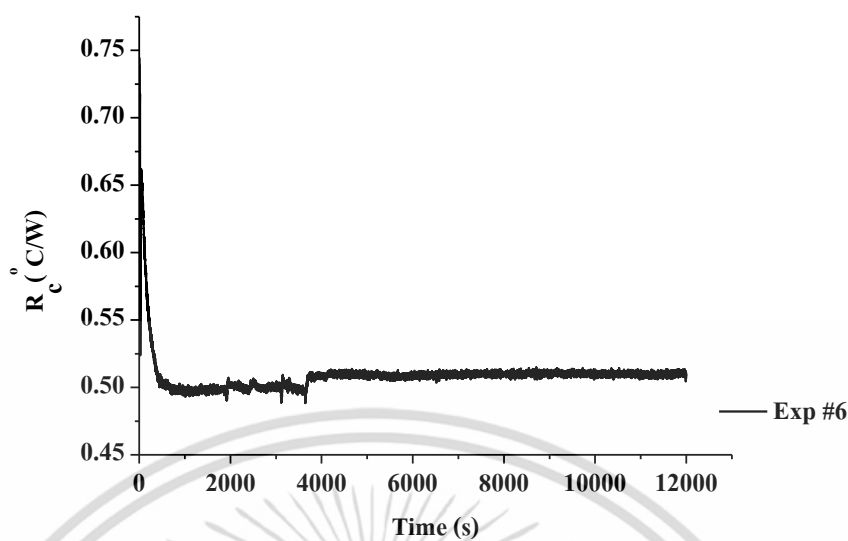


รูปที่ ข.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 5

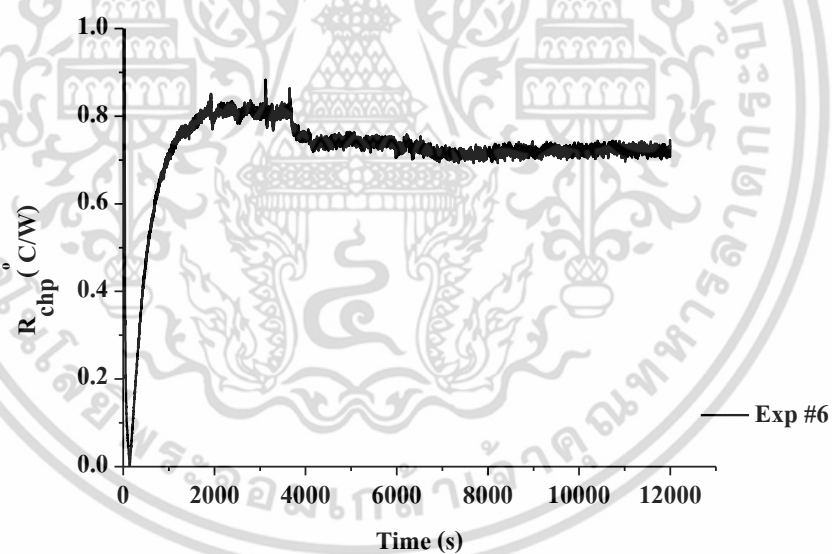


รูปที่ ข.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

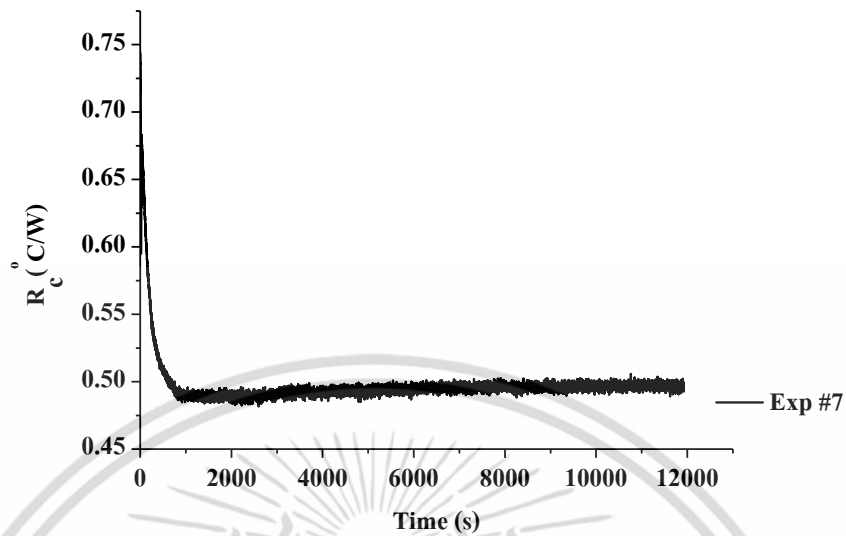


รูปที่ ข.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 6

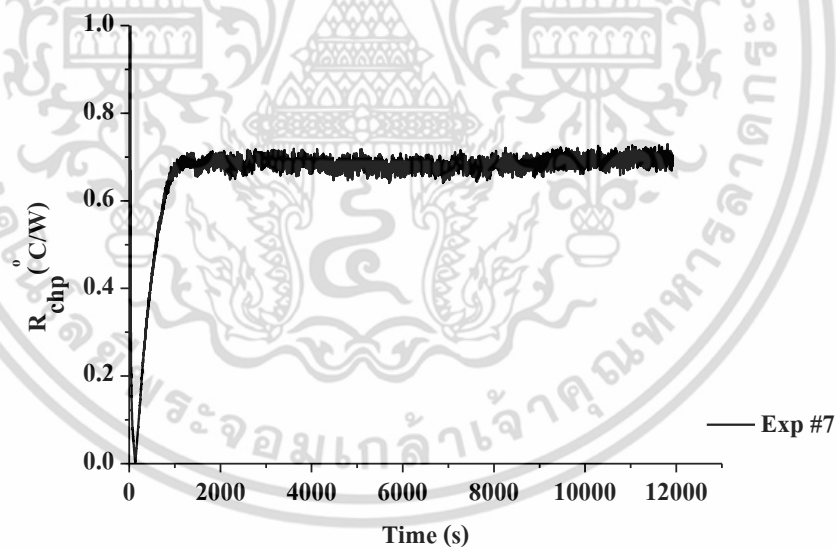


รูปที่ ข.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

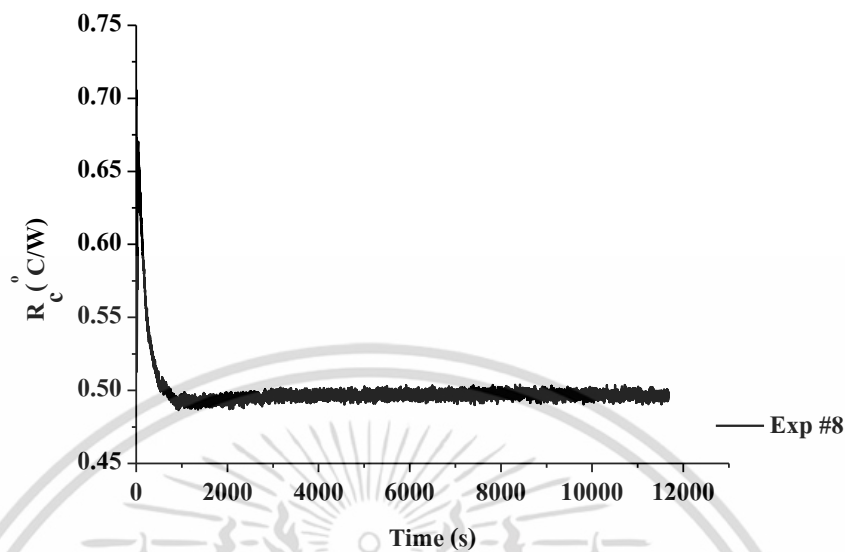


รูปที่ ข.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 7

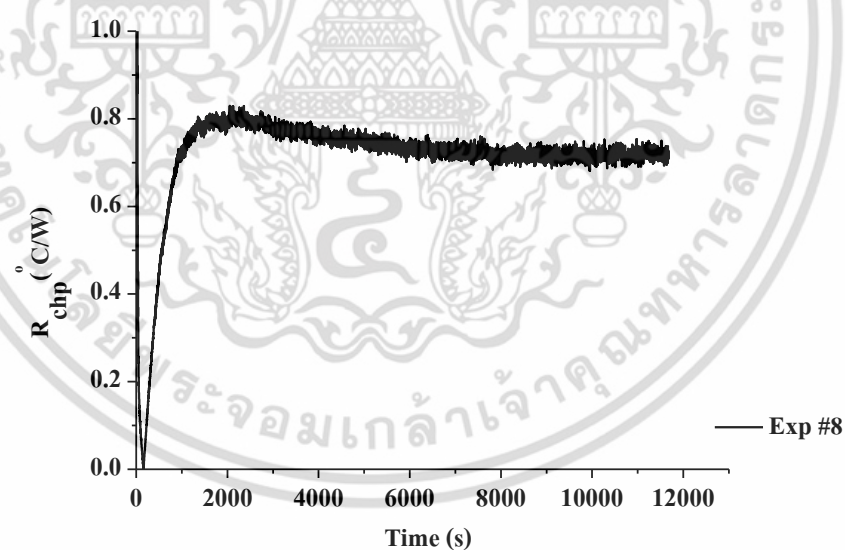


รูปที่ ข.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

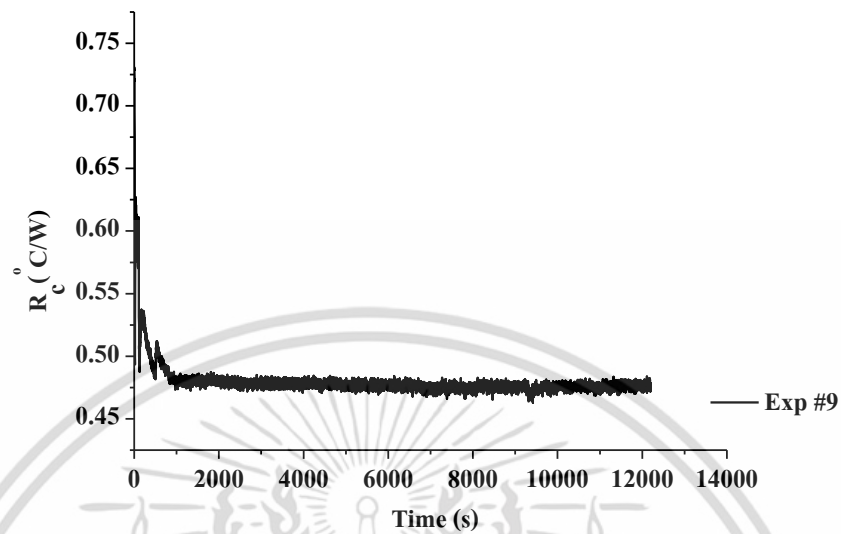


รูปที่ ข.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 8

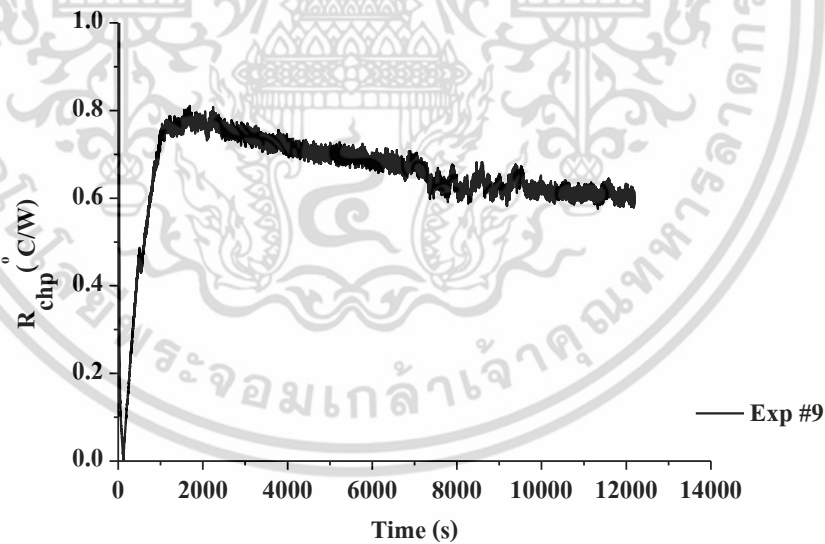


รูปที่ ข.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

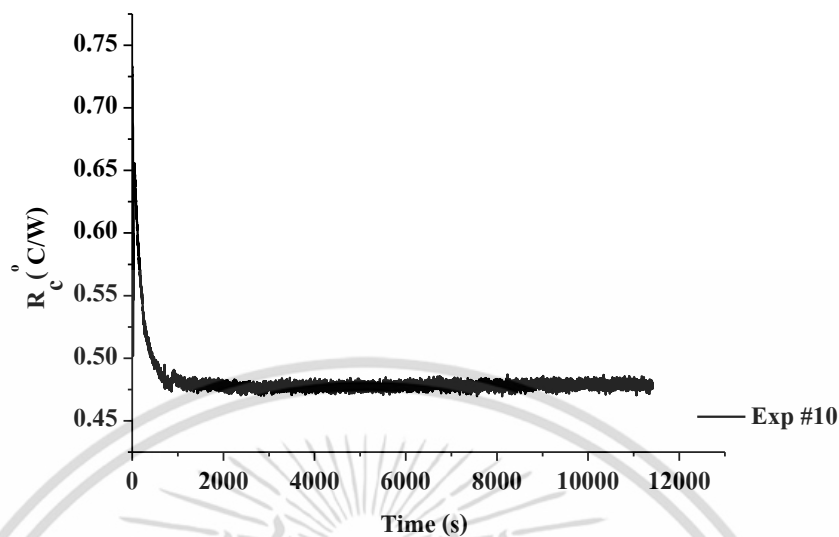


รูปที่ ข.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 9

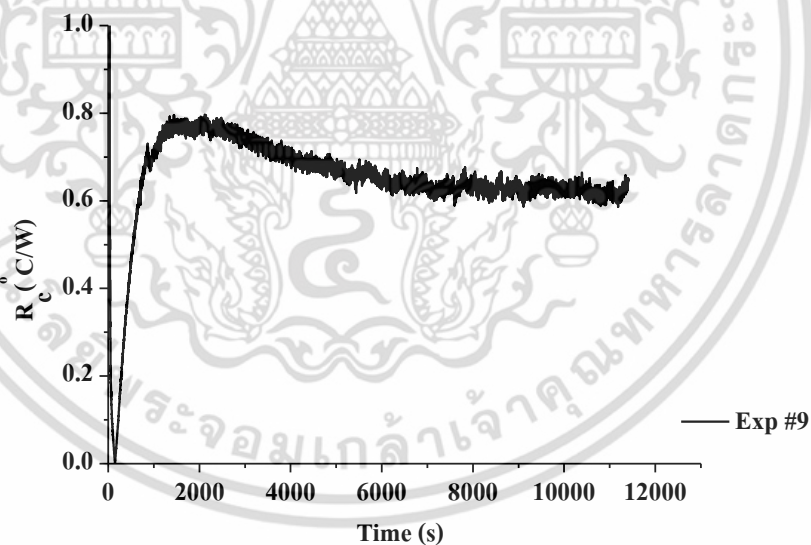


รูปที่ ข.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

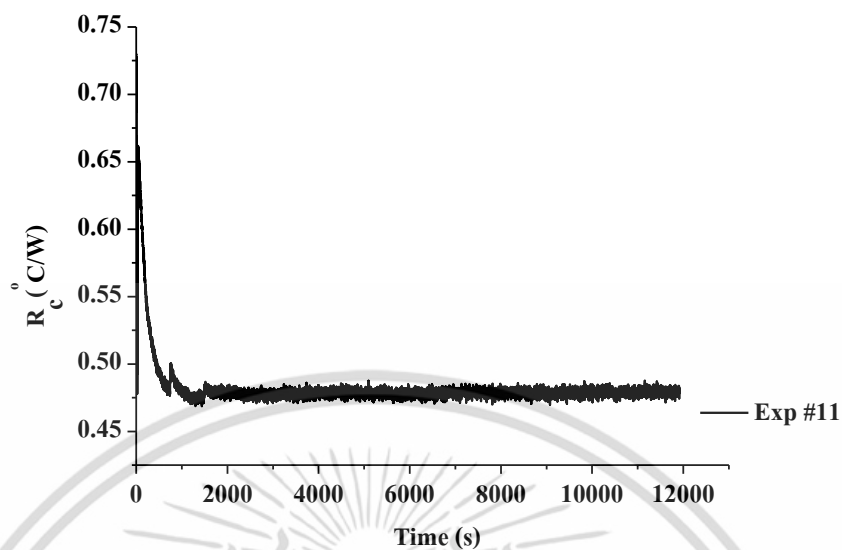


รูปที่ ข.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 10

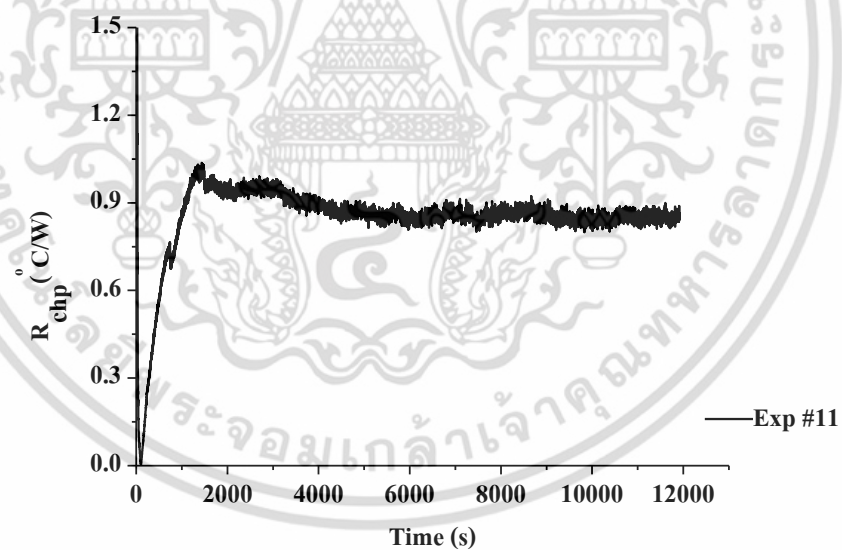


รูปที่ ข.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

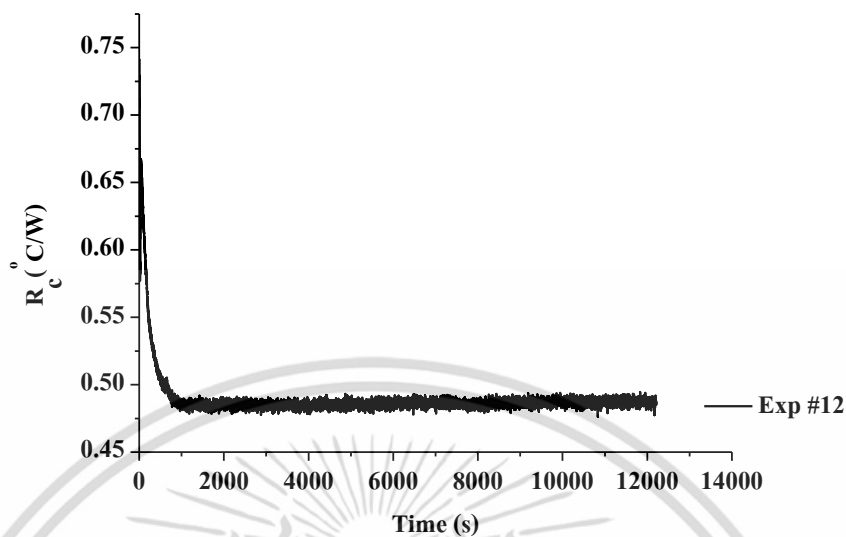


รูปที่ ข.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 11

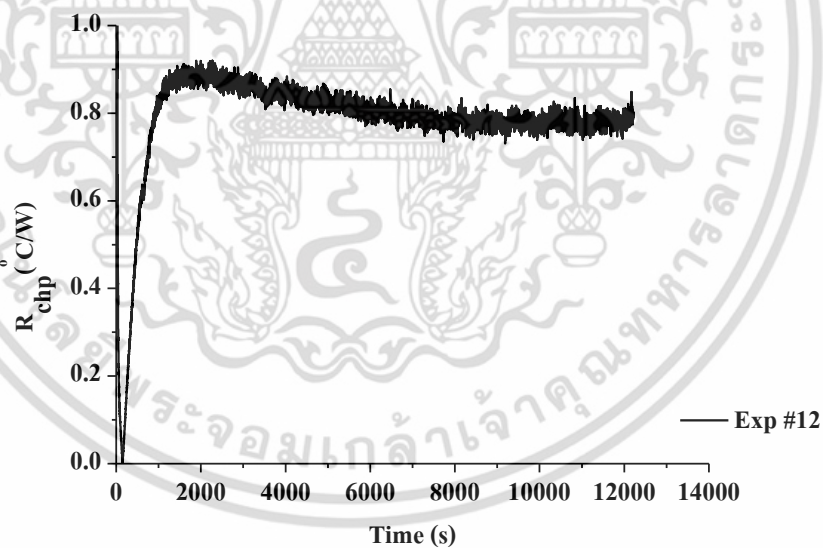


รูปที่ ข.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

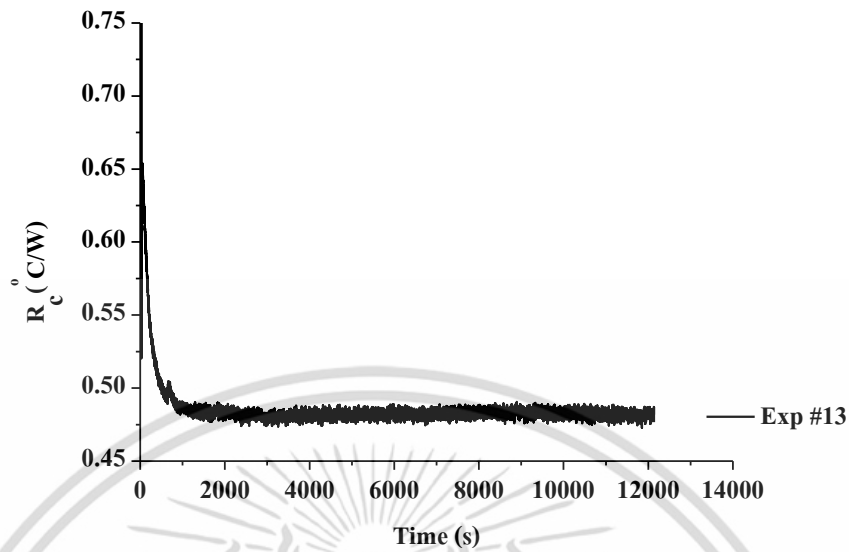


รูปที่ ข.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 12

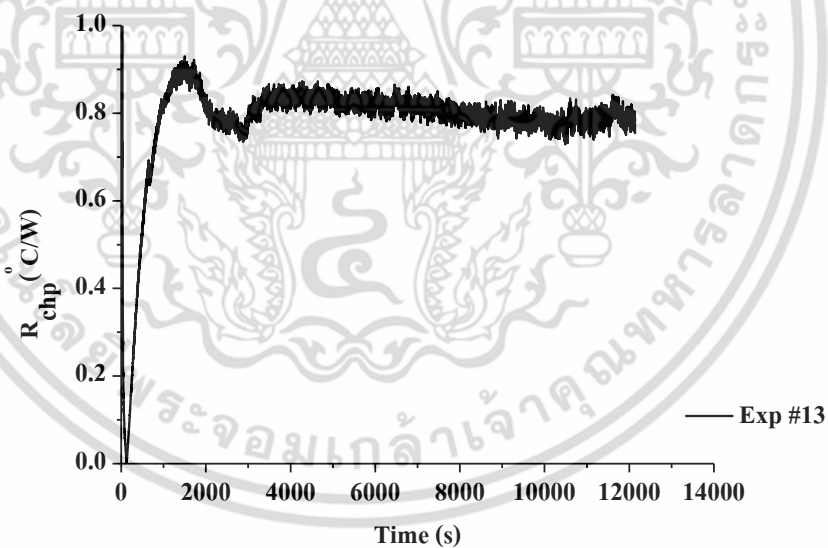


รูปที่ ข.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



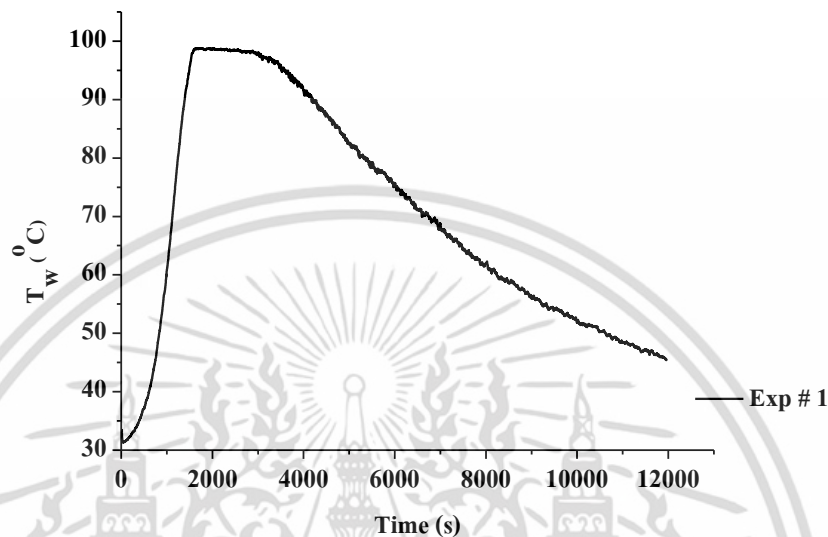
รูปที่ ข.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่อทองแดงกับเทอร์โมอิเล็กทริก (R_c) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 13



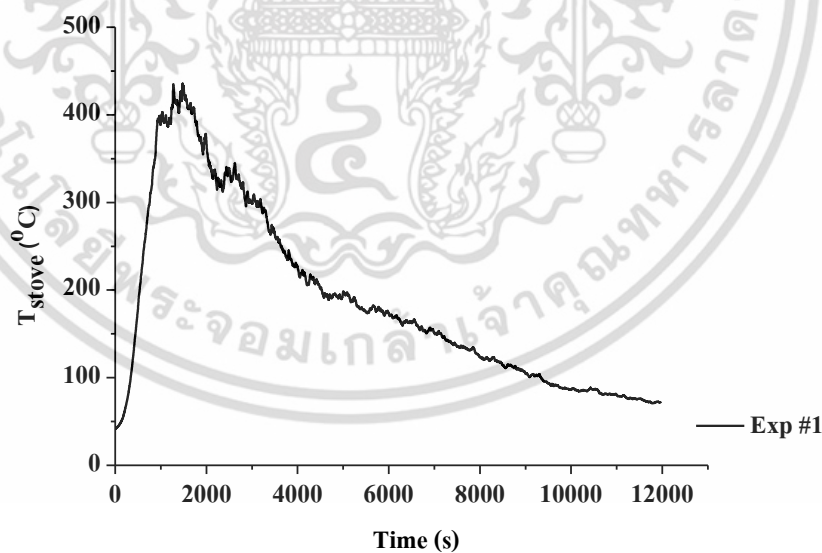
รูปที่ ข.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างรอยต่ออะลูมิเนียมกับท่อความร้อน (R_{chp}) กับเวลา การทดลองครั้งที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลา อุณหภูมิของเตาหุงต้มกับเวลา และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบกับเวลา ของการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง

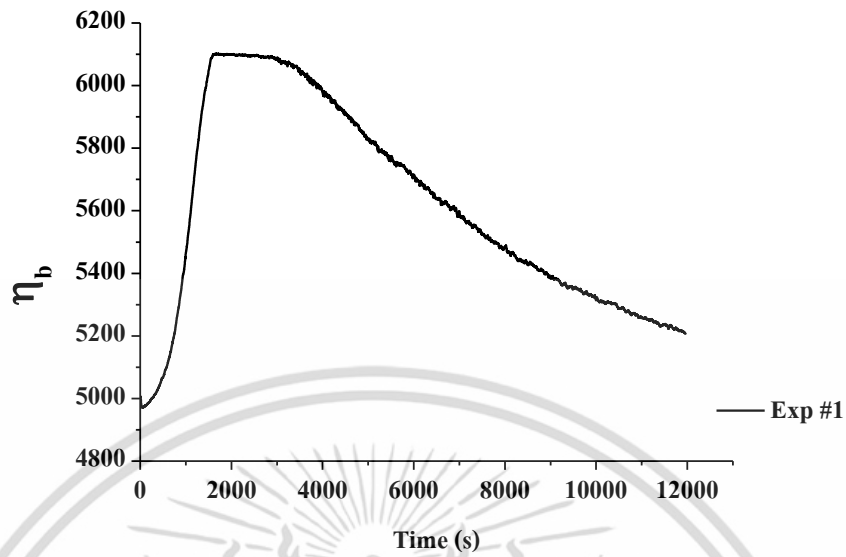


รูปที่ ข.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลา การทดลองครั้งที่ 1

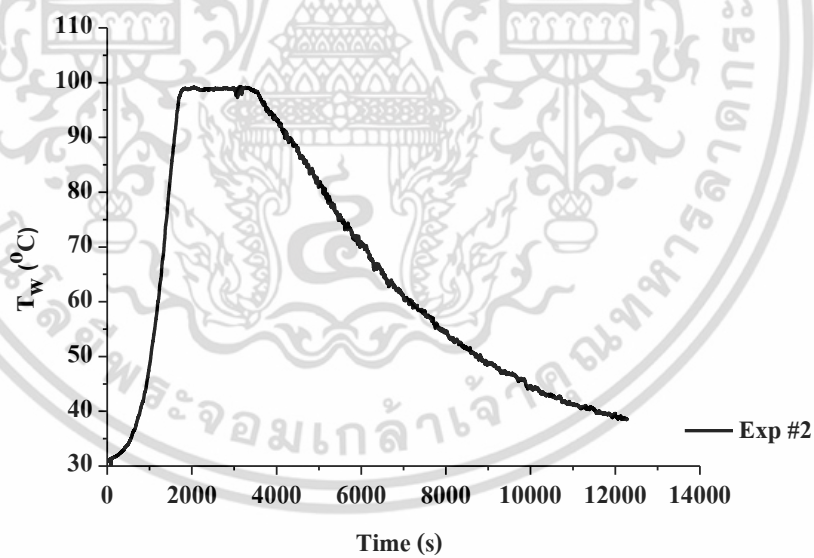


รูปที่ ข.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตาหุงต้มกับเวลา การทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

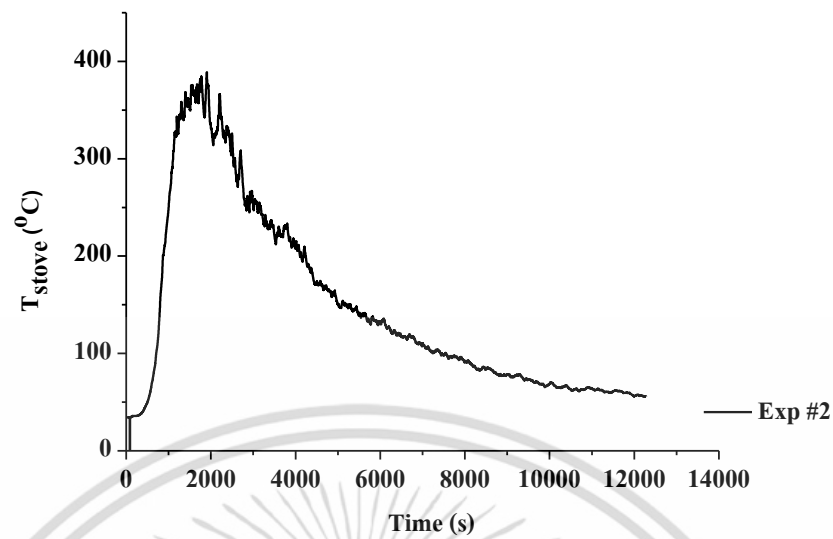


รูปที่ ข.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบ กับเวลา การทดลองครั้งที่ 1

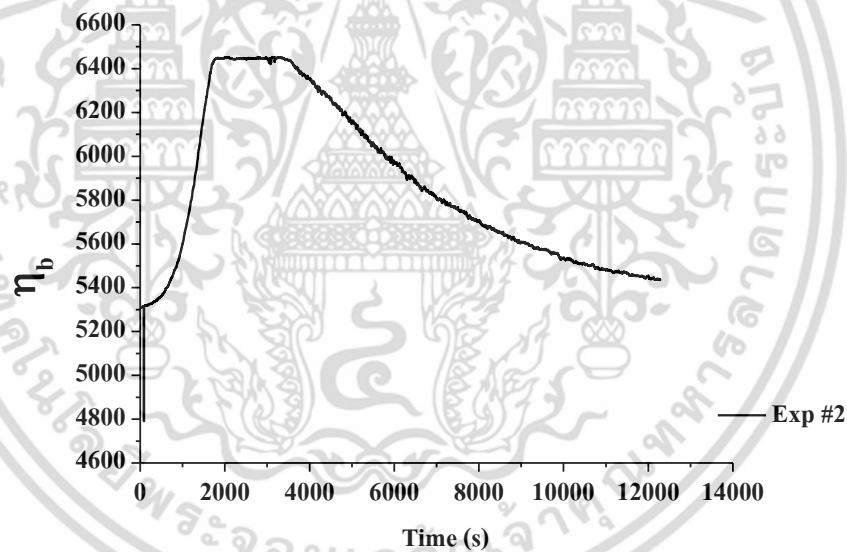


รูปที่ ข.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลา การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

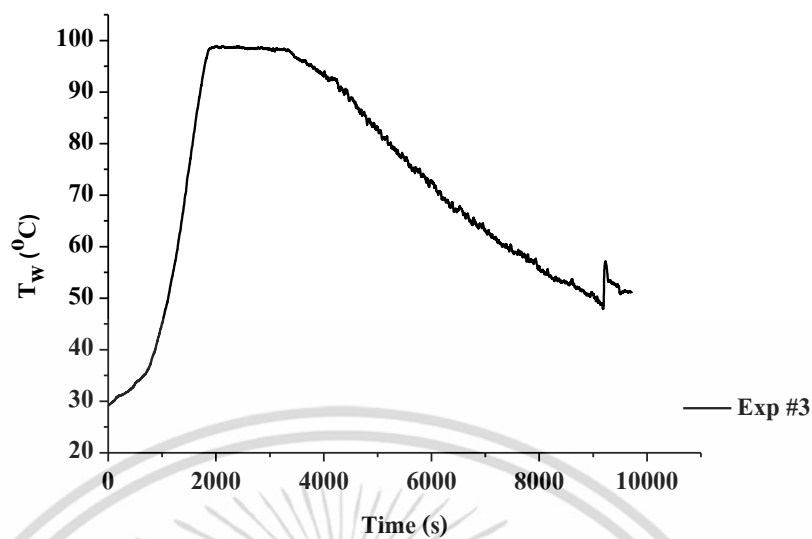


รูปที่ ข.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตาหุงต้มกับเวลา การทดลองครั้งที่ 2

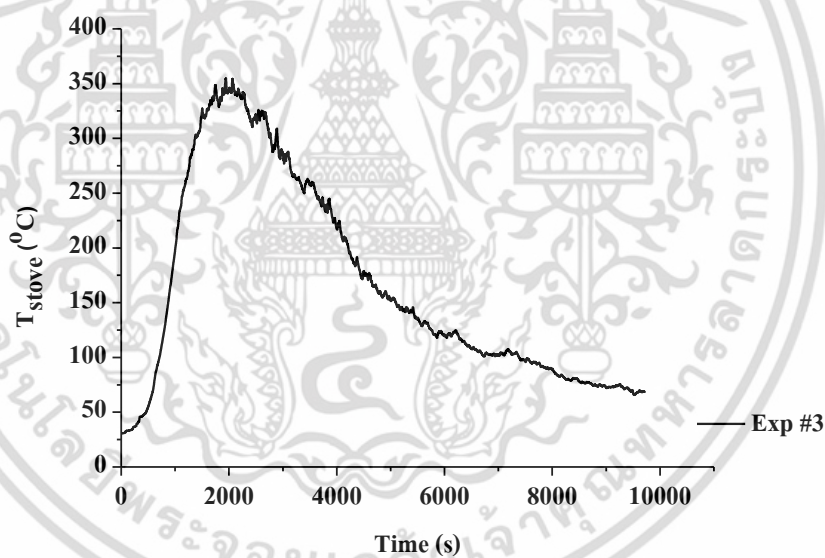


รูปที่ ข.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบกับเวลา การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

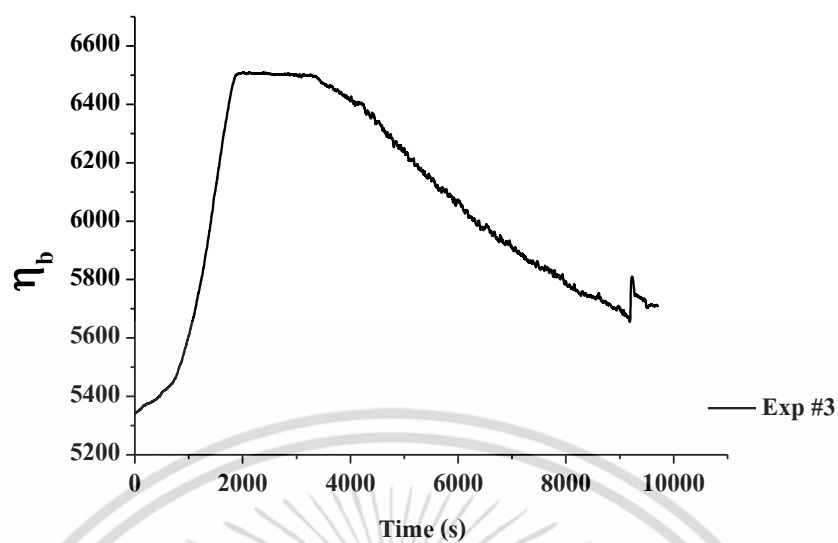


รูปที่ ข.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลา การทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ ข.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตาหุงต้มกับเวลา การทดลองครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มหลังติดตั้งระบบกับเวลา การทดลองครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว

Optimization condition for cook stove waste-heat recovery by response surface methodology

ศุภศักดิ์ คนชื่อ¹ และ อภาภรณ์ สุกุลภาวะเว²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาหุงต้มมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยพลังงานความร้อนบางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้หลักการของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และพลังงานความร้อนส่วนที่เหลือจะถูกนำไปผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในครัวเรือน ตัวแปรต้นที่ใช้ในการศึกษาคืออุณหภูมิ ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกและปริมาตรของน้ำซึ่งถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 150-250 องศาเซลเซียสและ 5-9 ลิตร ตามลำดับ ระบบที่ออกแบบจะประกอบไปด้วย ฮีตเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ฮีตไปป์ กล่องน้ำ และระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเคถูกติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิของระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) และข้อมูลที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้อธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ใช้ในระบบต่อกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำ ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิด้านร้อนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบมากกว่าปริมาณน้ำที่ใช้ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 4 วัตต์และอุณหภูมิของน้ำสูงสุดประมาณ 70 องศาเซลเซียส โดยประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอยู่ในช่วง 60-90%

ABSTRACT

In this work, a waste-heat recovery system was effectively designed and implemented for utilizing waste heat from a cook stove. Thermal energy was converted into electrical energy by a thermoelectric generator principle, and used in a waste-heat hot water boiler for household. Dependent variables were a hot-side temperature of thermoelectric module and a volume of water. The temperature ranged between 150 to 250 °C and the 5-9 liters volumes of water were investigated. The design system consists of a heater as heat source, thermoelectric module, heat-pipe, water tank, and data acquisition system for voltage, current and temperature measurements. K-type thermocouples were attached at interested locations. A respond surface methodology (RSM) based on a central composite design (CCD) was used to explain the influence of the hot-side temperature and the volumes of water on the electrical power generation and the hot-water temperature. The experimental results of system efficiency show that the hot-side temperature is more important than the volumes of water. The maximum power of 4 W and the hot-water temperature of 70 °C were achieved with the system efficiency of 60-90%.

คำสำคัญ: พลังงานความร้อนเหลือทิ้ง เตาหุงต้ม เทอร์โมอิเล็กทริก วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว

Keywords: Waste heat energy, cook stove, thermoelectric, response surface methodology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

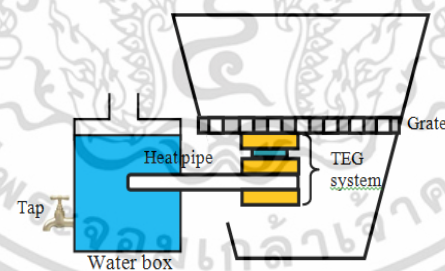
^{1,2} คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง e-mail: sam_toc@msn.com¹ aparporn.sa@kmitl.ac.th²

บทนำ

ปัญหาการเข้าถึงของระบบสายส่งไฟฟ้าในพื้นที่ชนบทของประเทศกำลังพัฒนาเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของประชาชนเป็นอย่างมาก [1,2] ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทดแทนที่เหมาะสม เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น [3-5] อย่างไรก็ตามประชากรส่วนใหญ่ในพื้นที่ชนบทยังคงใช้เตาหุงต้มเพื่อประกอบอาหาร โดยกิจกรรมดังกล่าวจะมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นและถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยเปล่าประโยชน์ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นนี้สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งมีผู้วิจัยได้ศึกษาการใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก [3-7] ทำการศึกษาโดยนำเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนความร้อนของเตาหุงต้มให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งระบบมีการระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก 2 แบบ คือ การระบายความร้อนแบบ active และแบบ passive พบว่าจุดเด่นแบบ active คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่าแบบ passive แต่มีจุดด้อย คือ ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนระบบจึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้น้อยลง

จากงานวิจัย Lertsatitthanakorn มีการใช้ความร้อนจากเตาหุงต้มเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยนำระบบที่ออกแบบไปติดตั้งทางด้านข้างของผนังเตา และมีการนำผนังเตาบางส่วนออกไปผลการทดลองพบว่าได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2.4 วัตต์ เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ 150 °C [7] จากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำความร้อนมาผลิตพลังงานไฟฟ้า

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดแสดงดังรูปที่ 1 โดยมีเงื่อนไขและจุดประสงค์ในการออกแบบระบบ ได้แก่ 1. การระบายความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นแบบ passive 2. ระบบที่ออกแบบสามารถติดตั้งร่วมกับเตาหุงต้มโดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของเตา 3. พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด



รูปที่ 1 การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน

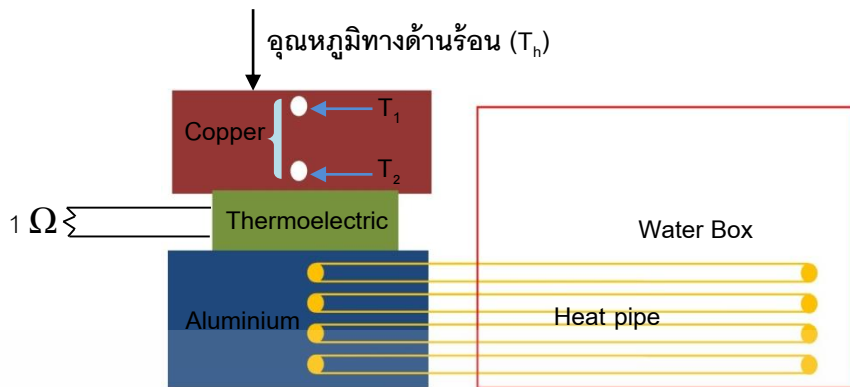
รูปที่ 1 การออกแบบระบบเพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาหุงต้มไปผลิตเป็นไฟฟ้าและน้ำร้อน ซึ่งออกแบบโดยนำระบบไปติดตั้งที่ใต้ผนังของเตา เมื่อมีความร้อนจากเตาหุงต้มทำให้ระบบสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกไปยังฮีตไปป์และความร้อนจากฮีตไปป์ระบายความร้อนไปยังน้ำเพื่อให้ได้น้ำร้อนและนำไปใช้ประโยชน์ในครัวเรือนต่อไป งานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรต้นของระบบ คือ อุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาณน้ำ และตัวแปรตาม คือ กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำ ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวและทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยความแปรปรวน (Anova)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ของงานวิจัยนี้ออกแบบโดยใช้แผ่นทองแดง หนา 2 เซนติเมตร ทำการเจาะรูแผ่นทองแดงทางด้านข้าง 2 รู ซึ่งมีระยะห่าง 1.2 เซนติเมตร ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2 สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาภายในระบบ (Q_{in}) จากนั้นจึงนำแผ่นทองแดงวางทางด้านบนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งงานวิจัยได้เลือกใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-24156-0.3 ผลิตจากบริษัท Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ถูกนำมาต่อกับความต้านทานที่เหมาะสมขนาด 1 โอห์ม ด้านล่างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลถูกประกบด้วยแผ่นอะลูมิเนียม โดยที่ด้านข้างของแผ่นอะลูมิเนียมทำการเจาะรูทั้งหมด 4 รู สำหรับใส่ฮีทไปป์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฮีทไปป์รุ่น 00C93480101 ผลิตจากบริษัทelement14 Thailand ความยาว 300 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น เพื่อให้ระบบสามารถระบายความร้อนได้ดีขึ้นจึงทำการสอดฮีทไปป์เข้าภายในกล่องน้ำ แสดงดังรูปที่ 2 โดยจะมีการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะประกอบไปด้วย NI9211 สำหรับวัดอุณหภูมิ, NI9201 สำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานขนาด 1 โอห์ม และ NI 9227 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า งานวิจัยจึงได้เลือกใช้โปรแกรม Lab View ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์และจัดเก็บข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3 เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถยอมรับได้ งานวิจัยได้ใช้วิธีการทางสถิติเพื่อออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 ซึ่งมีการกำหนดปัจจัย ระดับปัจจัย และตัวแปรผลตอบสนองที่ส่งผลกระทบต่อารออกแบบระบบ การกำหนดการออกแบบการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล และการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของระบบ

จากการศึกษาการออกแบบระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ ทำให้ผู้วิจัยพบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานในการผลิตระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ ซึ่งมีอยู่ 2 ปัจจัย ด้วยกัน คือ อุณหภูมิด้านร้อนที่ใช้ทดสอบ และปริมาตรของน้ำ โดยผู้วิจัยได้นำปัจจัยทั้งสองมากำหนดระดับปัจจัย คือ กำหนดอุณหภูมิด้านร้อนที่ใช้ทดสอบโดยมีค่าต่ำสุด 150 องศาเซลเซียส และสูงสุด 250 องศาเซลเซียส และกำหนดปริมาตรของน้ำโดยมีค่าต่ำสุด 5 ลิตร และสูงสุด 9 ลิตร จากนั้นตัวแปรผลตอบสนองที่ต้องการศึกษาสำหรับงานวิจัย มี 2 ตัวแปร คือ กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำ ซึ่งจะทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว โดยแบบที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองประเภทหนึ่งที่ยอมรับใช้กันมากสำหรับการสร้างแบบจำลองกำลังสองและนำไปสู่การแปรผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว [8] ดังนั้น งานวิจัยจึงได้การออกแบบการทดลองแบบ CCD ซึ่งมีปัจจัย 2 ตัวแปร และได้ชุดการทดลองทั้งหมดของระบบจำนวน 13 การทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4 เมื่อทำการทดลองครบทั้งหมดจะได้ตัวแปรผลตอบสนอง เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ความแปรปรวน (Anova) ซึ่งในการวิเคราะห์ยังสามารถแสดงผลการให้เห็นว่าปัจจัยกับตัวแปรผลตอบสนองมีความสัมพันธ์กันและการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของระบบ



รูปที่ 2 ระบบเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อนที่ออกแบบในงานวิจัยนี้



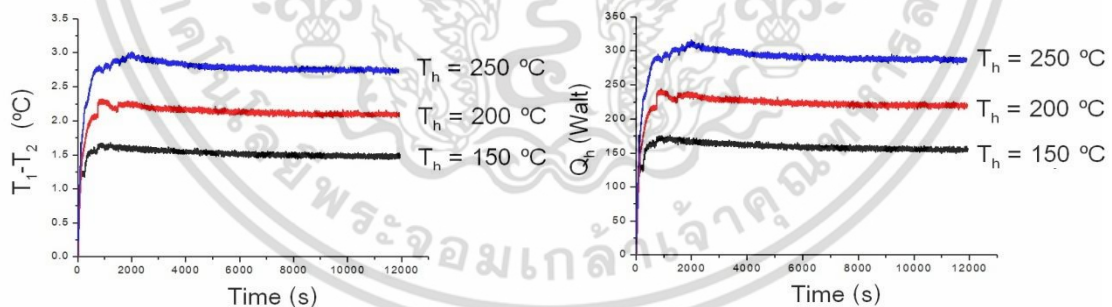
Std	Run	Factor 1 A: Temperature deg C	Factor 2 B: Volume Liter
9	1	200	7
12	2	200	7
7	3	200	4.17157
13	4	200	7
1	5	150	5
6	6	270.711	7
11	7	200	7
10	8	200	7
2	9	250	5
3	10	150	9
5	11	129.289	7
8	12	200	9.82843
4	13	250	9

รูปที่ 3 ชุดทดลองระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์

รูปที่ 4 การออกแบบเงื่อนไขในการทดลองโดยใช้การออกแบบประสมกลาง

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

1. การคำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h)



รูปที่ 5(ก) ความแตกต่างอุณหภูมิ T_1-T_2 กับเวลาที่อุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) 150 °C , 200 °C และ 250 °C

รูปที่ 5(ข) อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบที่อุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) 150 °C , 200 °C และ 250 °C

รูปที่ 4 แสดงการออกแบบเงื่อนไขในการทดลองโดยใช้การออกแบบประสมกลางซึ่งมีทั้งหมด 13 การทดลอง แต่ในส่วนการอธิบายผลนั้นได้เลือกมา 3 การทดลอง โดยมีอุณหภูมิทางด้านร้อน (T_h) 150 °C , 200 °C และ 250 °C และปริมาตรน้ำ (V_w) 9 ลิตร , 7 ลิตร และ 5 ลิตร ตามลำดับ จากการทดลองสามารถคำนวณอัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (Q_h) ได้จากการวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2 โดยใช้สมการ $Q_h = KA\Delta T/x$ เมื่อ K คือ การนำความร้อนของทองแดง (401 W/m·K), A คือพื้นที่หน้าตัดของเทอร์โมอิเล็กทริก (m^2), ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิ (T_1-T_2) (°C) และ x คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ T_1 กับ T_2 (cm) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) พบว่า เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 ไม่เท่ากันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุขัดแย้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ T_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อเวลาประมาณ 1500 วินาที (25 นาที)

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Anova)

การทดลอง	อุณหภูมิทางด้านร้อน	ปริมาตรน้ำ	กำลังไฟฟ้า	อุณหภูมิน้ำ
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	49.5
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	2.7	62.69
11	200	7	2.74	63.31
12	200	7	2.6	61.85
13	200	7	2.69	62.57

ตารางที่ 1 แสดงผลการวัดกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำเมื่อกำหนดอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรน้ำตามเงื่อนไขต่างๆ

จากตารางที่ 1 แสดงผลการวัดกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำเมื่อกำหนดอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรน้ำตามเงื่อนไขต่างๆ โดยมีตัวแปรผลตอบสนอง คือ กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ความแปรปรวน (Anova) แสดงดังตารางที่ 2 และ 3

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F	
Model Power	14.05	5	2.81	652.94	< 0.0001	significant
Lack of Fit	0.02	3	6.51 E-03	2.45	0.2029	not significant

standard deviation	0.066
Mean	2.6
R-Squared	0.9979
Adj R-Squared	0.9963

ตารางที่ 2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของกำลังไฟฟ้า (P)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F	
Model Temperature water	446.04	2	223.02	155.99	< 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 3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ของอุณหภูมิน้ำ (T_w)

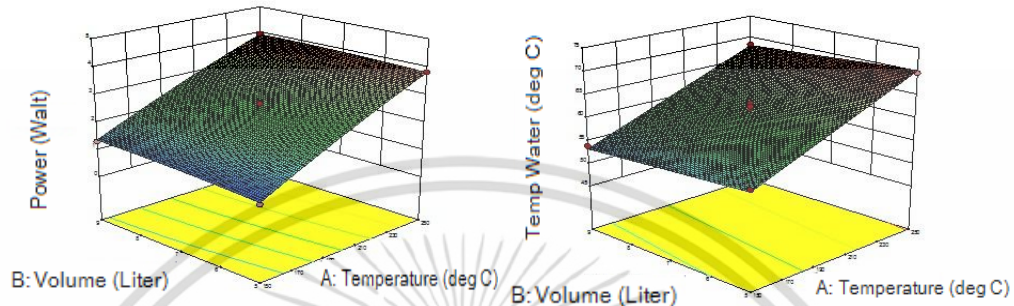
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ที่แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำ มีผลต่อกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากในแต่ละปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%) โดยที่ R^2 คือ สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ สามารถอธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่ได้เป็นผลมาจากอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำร้อยละ 99.79 และ 96.89 ตามลำดับ ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 0.21 และ 3.11 เป็นผลมาจากปัจจัยอื่นที่ไม่ทราบ จากตารางที่ 2 และ 3 พบว่าค่า Lack of fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.203 และ 0.055 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายความว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำในการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำ [8] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ (1) และ (2) โดยที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากระบบอยู่ในสภาวะสมดุล เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = -5.46918 + 0.043213 \cdot T_h + 0.29069 \cdot V_w - 4.50E-04 \cdot T_h \cdot V_w - 3.43E-05 \cdot T_h^2 - 0.010781 \cdot V_w \quad (1)$$

$$T_w = 35.9672 + 0.14782 \cdot T_h - 0.53154 \cdot V_w \quad (2)$$

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)



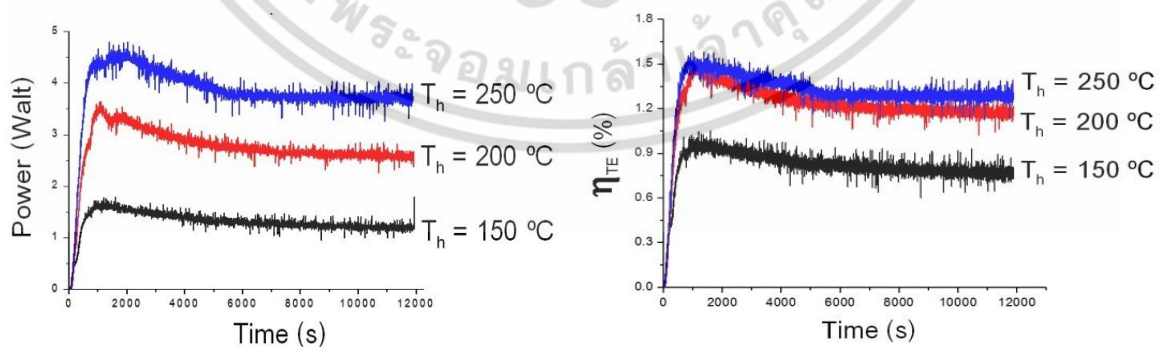
รูปที่ 6(ก) ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวระหว่าง
 ปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำ
 ที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า (P)

รูปที่ 6(ข) ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว
 ระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและ
 ปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ (T_w)

รูปที่ 6(ก) และ 6(ข) แสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวระหว่างปัจจัยอุณหภูมิทางด้านร้อนและปริมาตรของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำ เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มระหว่างปัจจัยกับตัวแปรผลตอบสนองว่าปัจจัยใดส่งผลต่อการออกแบบระบบ เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในส่วนของปริมาตรของน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำมากที่สุด คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน

3. ประสิทธิภาพของระบบ

3.1 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก



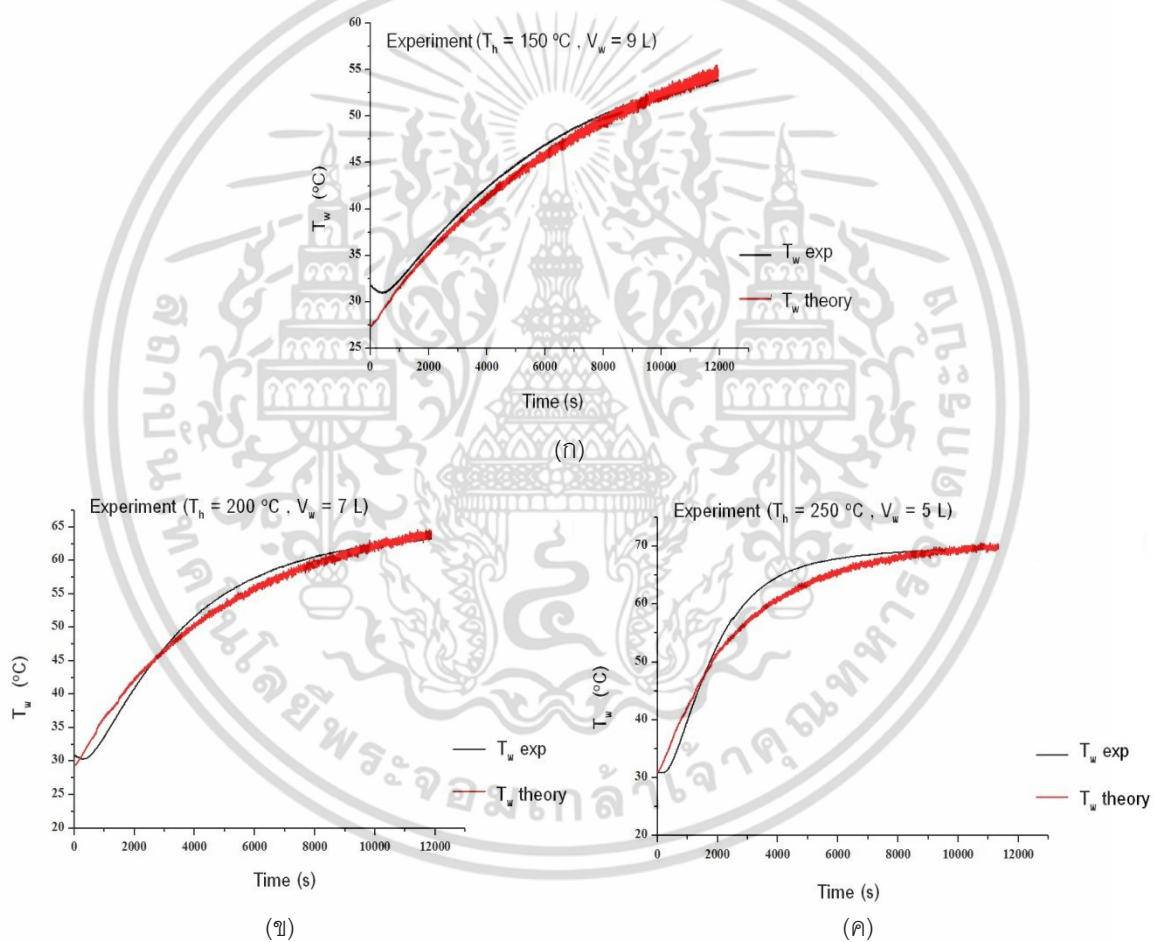
รูปที่ 7(ก) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับเวลา
 ที่อุณหภูมิทางด้านร้อน 150 $^{\circ}\text{C}$,
 200 $^{\circ}\text{C}$ และ 250 $^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 7(ข) ประสิทธิภาพที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก
 กับเวลา ที่อุณหภูมิทางด้านร้อน 150 $^{\circ}\text{C}$
 , 200 $^{\circ}\text{C}$ และ 250 $^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7(ก) และ 7(ข) แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบกับเวลาและประสิทธิภาพที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกกับเวลา (η_{TE}) จากความสัมพันธ์ $P = IV$ และ $\eta_{TE} = (P/Q_h)$ เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) และ V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) ดังนั้น จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 1.31 วัตต์ , 2.74 วัตต์ และ 3.83 วัตต์ เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนเท่ากับ 150 °C , 200 °C และ 250 °C ตามลำดับ ประสิทธิภาพที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก (η_{TE}) จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและสูงสุดเท่ากับ 1.00% , 1.40% และ 1.54% ที่เวลาประมาณ 1000 วินาที เมื่ออุณหภูมิทางด้านร้อนเท่ากับ 150 °C , 200 °C และ 250 °C หลังจากนั้นระบบก็เริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล

3.2 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ



รูปที่ 8(ก) (ข) และ (ค) เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี เมื่ออุณหภูมิด้านร้อนเท่ากับ 150 °C , 200 °C และ 250 °C

$$\text{อุณหภูมิน้ำของระบบที่สภาวะสมดุล สามารถคำนวณได้จาก } T_w = \left[T_i - \frac{Q_h + UA_s T}{UA_s} \right] \exp\left[-\frac{UA_s}{m \times C_p} t\right] + \left[\frac{Q_h + UA_s T}{UA_s} \right]$$

โดยทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) เพื่อให้ได้อุณหภูมิน้ำออกมาใกล้เคียงกับการทดลอง [9] เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (°C) , T_s คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C) , UA_s คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($W/°C$) , m คือ มวลของน้ำ (ลิตร) , และ C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ 4180 J/kg·K ดังนั้น จึงนำค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (UA_s) และอุณหภูมิน้ำของระบบที่สภาวะสมดุล เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการ

ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (Q_w) และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (η_w) ซึ่งหาได้จากสมการ $Q_w = UA_s(T_w - T_a)$ และ $\eta_w = (Q_w/Q_h)$ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยรูปที่ 8(ก) (ข) และ (ค) จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 4.10 W/°C , 5.30 W/°C และ 6.70 W/°C เพราะอุณหภูมิน้ำที่ได้จากระบบสูงขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิน้ำก็เริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิเท่ากับ 55 °C , 64 °C และ 70 °C ตามลำดับ อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 115 วัตต์ , 196 วัตต์ และ 281 วัตต์ และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 64% , 85% และ 93% ที่อุณหภูมิทางด้านร้อนเท่ากับ 150 °C , 200 °C และ 250 °C ตามลำดับ

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการนำพลังงานความร้อนเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและการผลิตน้ำร้อน ซึ่งมีตัวแปรต้นคือ อุณหภูมิทางด้านร้อน และปริมาตรของน้ำ จากนั้นตัวแปรผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา คือ กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิน้ำ จากผลการทดลองที่ได้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับตัวแปรผลตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ $P = -5.46918 + 0.043213 * T_h + 0.29069 * V_w - 4.50E-04 * T_h * V_w - 3.43E-05 * T_h^2 - 0.010781 * V_w$ และ $T_w = 35.9672 + 0.14782 * T_h - 0.53154 * V_w$ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำมากที่สุด คือ อุณหภูมิทางด้านร้อน จากระบบที่ออกแบบพบว่าประสิทธิภาพรวมของระบบอยู่ระหว่าง 60-90% ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทางด้านร้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สัญญาเลขที่ 2559 A11862013)

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2006, IEA Publications, France
- [2] URL: www.worldenergyoutlook.org/database_electricity/electricity_access_database.htm.last accessed June 2010.
- [3] Mastbergen D, Willson B. Generating Light from Stoves using a Thermoelectric Generator. Presented at the ETHOS International Stove Research Conference, 2005 Seattle Washington. Available at www.vrac.iastate.edu/ethos/ last accessed december 2010
- [4] Champier D, Bedecarrats JP, Rivaletto M, Strub F. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. Energy 2010;35, Issue 2:935-942.
- [5] Rinalde GF, Juanico LG, Tagliavere E, Gortari S, Molina MG. Development of thermoelectric generators for electrification of isolated rural homes. International Journal of Hydrogen Energy 2010;35 Issue 11: 5818-5822
- [6] D. Champier, J.P. Bédécarrats, T. Kouksou, M. Rivaletto, F. Strub, & P. Pignolet. (2011). Study of a Thermoelectric Generator incorporated in a multifunction wood stove. Energy, Elsevier, 2011, 36(3), 1518-1526. <http://doi:10.1016/j.energy.2011.01.012>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าระบบการใช้งานวิจัยหรือการตีพิมพ์งานวิจัยนี้ ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [7] C. Lertsatitthanakorn. (2006). *Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator : Bioresource Technology* , 2007 , 98, 1670–1674. Mahasarakham, Thailand: Mahasarakham University, Department of Engineering.
- [8] ปารเมศ ชูติมา. (2530). *การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] Ashwin Date. (2014). Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy , 2014 , 105 , 656-668. Welbournane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ศุภศักดิ์ คนชื่อ
วัน เดือน ปีเกิด	13 พฤษภาคม 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	26/6 ม.4 ต. นิคมสงเคราะห์ อ. เมือง จ. อุตรธานี 41000
ประวัติการศึกษา	(ปี 2557) สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต เกรดเฉลี่ย 3.02 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุน คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	The 40 th National Graduate Research Conference การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้