

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง
โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
Energy Storage Device from Waste Heat
using Phase Change Materials Integrated with Thermoelectric Generator



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง
โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY STORAGE DEVICE FROM WASTE HEAT
USING PHASE CHANGE MATERIALS INTEGRATED WITH
THERMOELECTRIC GENERATOR



A REPORT SUMMITED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR BACHELOR OF ENGINEERING PROGRAM IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง อุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟส ร่วมกับ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
โดย นายทศพร มากลับ
นางสาวปณิสดา อุ่นเรือง
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์
ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ธนวรรณ พิณรัตน์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์)

ญาณิพร พัชรวรโชติ

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ)

ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง อุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟส ร่วมกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

โดย นายทศพร มากลับ
นางสาวปณัสดา อุ่นเรือง

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

บทคัดย่อ

พลังงานความร้อนเหลือทิ้งเป็นพลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศหลังจากผ่านการใช้ประโยชน์ ซึ่งวัสดุเปลี่ยนเฟสถูกนำมาใช้สำหรับการกักเก็บพลังงานความร้อนเหลือทิ้งข้างต้น เนื่องจากเมื่อวัสดุเปลี่ยนเฟสได้รับพลังงานความร้อนจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และจะกลับสู่สถานะของแข็งได้อีกครั้ง เมื่อเกิดการคายพลังงานความร้อนในลักษณะของความร้อนแฝงออกมา และอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งวัสดุเปลี่ยนเฟสที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ซิฟังก์พาราฟิน C100PW, โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต และน้ำตาลอิริทริทอล เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่มีความเหมาะสมในการกักเก็บพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง โดยศึกษาความร้อนแฝงของการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และราคาผลการศึกษาพบว่าซิฟังก์พาราฟิน C100PW มีความเหมาะสม เนื่องจากอุณหภูมิในการเกิดผลึกเหมาะสมกับการนำมาใช้งาน ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำเพียงร้อยละ 7.50 รวมไปถึงไม่เกิดสถานะความเย็นยิ่งยวด และมีราคาไม่แพง จากนั้นจึงทำการศึกษาความหนาของชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟสที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยศึกษาที่ความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร, 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสที่มีความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตรนั้น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด เท่ากับ 467.64 มิลลิวัตต์ ในช่วงแรก แต่เมื่อเวลาผ่านไป 9 นาที พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะลดลงต่ำกว่า 100.00 มิลลิวัตต์ จากนั้นจึงนำครีบบรรบายความร้อนมาติดตั้งบริเวณแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลของการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การติดตั้งครีบบรรบายความร้อนทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับ 2,028.00 มิลลิวัตต์ เนื่องจากการติดตั้งครีบบรรบายความร้อนช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณแผ่นด้านเย็นไปสู่บรรยากาศได้ดี ซึ่งทำให้ผลต่างอุณหภูมิบนอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าการไม่ติดตั้งครีบบรรบายความร้อน

คำสำคัญ: วัสดุเปลี่ยนเฟส, ความร้อนเหลือทิ้ง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก, ครีบบรรบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Energy Storage Device from Waste Heat using Phase Change Materials Integrated with Thermoelectric Generator

By Thodsaporn Maklab
Panussada Uoonreng

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2022

Advisor Assistant Professor Tanawan Pinnarat, Ph.D.

ABSTRACT

Waste heat energy is energy that is discharged into the ambient after it has been used. Phase change materials (PCMs) are utilized for the waste heat energy storage since PCMs can store energy in terms of latent heat by releasing energy during phase change from liquid state to a solid state, then PCMs are connected with thermoelectric generator (TEG) to convert thermal energy into electrical energy. Phase change materials chosen for study were paraffin wax C100PW, sodium acetate trihydrate and erythritol sugar by investigating latent heat of fusion, crystallization temperature, percentage of volume change and price. The results demonstrated that paraffin wax C100PW was appropriate because of suitable crystallization temperature, while percentage of volume change is low at 7.50 percent, supercool state did not occur and the price is reasonable. For PCMs thickness for power generation was also investigated. The thicknesses of 20 mm, 25 mm, and 30 mm were used. The results showed that thermoelectric generator with thickness of 25 mm can initially give a maximum power of 467.64 mW, however after 9 minutes, the power produced is below 100.00 mW. In addition, the cooling fins were used on the cold side of thermoelectric generator, the results showed that the installation of heat sinks (cooling fins) generated power of 2,028.00 mW since it promotes heat transfer from the cold side to the ambient and increases temperature difference between thermoelectric generator and heat sink.

Keywords: phase change materials, waste heat, thermoelectric generator, cooling fins

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการส่งเสริม และการสนับสนุนจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาวรรณ พิณรัตน์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางในการแก้ไขปัญหา และการอนุเคราะห์ทุน ในการจัดซื้ออุปกรณ์อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้ความรู้ และประสบการณ์แก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ตลอดภาคการศึกษา

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์ คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ เพื่อช่วยให้ปริญญาานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคุณพิมใจ ภูชนะกิจ, คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ และคุณสุกานต์ภิรมย์ ศรีวงษ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การสนับสนุน และความช่วยเหลือในด้านเอกสารสำหรับการเบิกจ่ายต่างๆ และความช่วยเหลือในด้านอื่นๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนบุคคลภายในครอบครัวที่สนับสนุนด้านการศึกษา ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และให้กำลังใจกับผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ อาจารย์ภายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ได้ให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดี รวมทั้งเพื่อนนักศึกษาภายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี รุ่นที่ 26 ที่คอย ช่วยเหลือ และให้กำลังใจ ตลอดจนรุ่นพี่ และรุ่นน้องที่ให้กำลังใจ ซึ่งช่วยให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ และมีคุณค่าทางการศึกษาต่อผู้ที่สนใจ

นายทศพร มากลับ
นางสาวปณัสตา อุ้นเรือง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มา และความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	3
2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction)	11
2.3 ระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage)	12
2.4 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟส ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	23
3.2 การศึกษาชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการกักเก็บพลังงาน	26
3.3 การศึกษาความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟส และอุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล	
4.1 ชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการกักเก็บพลังงาน	30
4.2 ความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า	34
4.3 อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า	39
4.4 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเชิงตัวเลข	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ IV อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก. วิธีการคำนวณการออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	56
ภาคผนวก ข. ภาพฉายไอโซเมตริกของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	64
ภาคผนวก ค. ภาพกระบวนการทดลอง	71
ภาคผนวก ง. ผลการทดลอง	74
ภาคผนวก จ. สมการสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อน ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม	97
ภาคผนวก ฉ. ฟังก์ชัน และคำสั่งภายในซอฟต์แวร์ MATLAB R2016b	101



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สรุปข้อดี และข้อเสียของประเภทวัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทของแข็ง-ของเหลว	13
2.2 ตารางแสดงเกณฑ์การคัดเลือกวัสดุเปลี่ยนเฟส	14
2.3 สัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณคุณสมบัติของบิสมีเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3)	19
3.1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	24
4.1 จุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และอุณหภูมิที่เกิดการตกผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละชนิด	31
4.2 ความหนาแน่นจำเพาะในสถานะของเหลว และของแข็งของวัสดุเปลี่ยนเฟส	33
4.3 ตารางเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุเปลี่ยนเฟส	33
4.4 ราคาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อ 1 กิโลกรัม	34
4.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละกรณี	38
4.6 ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีกล่องสแตนเลสที่มีความสูงเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ระหว่างการไม่มีอุปกรณ์ระบายความร้อน และการติดตั้งครีบบระบายความร้อน	41
ก.1 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	57
ก.2 คุณสมบัติของซีดีซีพาราฟิน C100PW	58
ก.3 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบฉนวนความร้อน	62
ง.1 ประวัติทางความร้อนของซีดีซีพาราฟิน C100PW	74
ง.2 ประวัติทางความร้อนของโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต	76
ง.3 ประวัติทางความร้อนของอิริทริทอล	78
ง.4 การทดลองหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร	80
ง.5 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร	81
ง.6 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร	82
ง.7 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร	85
ง.8 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร	86
ง.9 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	89
ง.10 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.11 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน เมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อน กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร	93
ง.12 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อน กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อVIIถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกัน	6
2.2 พื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งฉากที่มีขอบเท่ากัน	6
2.3 ลักษณะพื้นผิวที่มีความสมมาตร	7
2.4 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับกรณีการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิว	8
2.5 แผนภาพแสดงสมดุลพลังงานของเตาเผา	12
2.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการให้ความร้อน และกระบวนการเย็นตัว ซึ่งประกอบไปด้วยผลจากสถานะความเย็นยิ่งยวด (a) การเกิดนิวคลีโอ (b) การไม่เกิดนิวคลีโอ	15
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ZT เทียบกับอุณหภูมิของวัสดุ TEG แต่ละชนิด	18
3.1 ชั้นของวัสดุภายในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง	23
3.2 ภาพฉายมุมที่สาม (Third Angle Projection) ของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	24
3.3 ภาพสามมิติอย่างง่ายของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ยังไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	24
3.4 ภาพสามมิติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง	25
4.1 เส้นโค้งประวัติทางความร้อนสำหรับการเกิดผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละชนิด	32
4.2 เส้นโค้งประวัติทางความร้อนในการทดลองของโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต	32
4.3 ความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในแต่ละสถานะภายในหลอดทดลอง	33
4.4 กราฟเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที	36
4.5 กราฟเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 30 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที	36
4.6 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที	36
4.7 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 30 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที	37
4.8 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที	38
4.9 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 30 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที	38
4.10 กราฟเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อน ในช่วง 60 นาที	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อน ในช่วง 60 นาที	40
4.12 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อน ในช่วง 60 นาที	40
4.13 เงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา	42
4.14 กราฟการกระจายอุณหภูมิซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในเตาถ่าน โดยการอาศัยวิธีผลต่างสืบเนื่องในการวิเคราะห์	43
4.15 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนภายในเตา ระหว่างผลที่ได้ จากการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง	44
4.16 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณเหนือกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ระหว่างผลที่ได้ จากการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง	44
4.17 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณฝาปิดของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ระหว่างผลที่ได้ จากการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง	45
ก.1 โครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งในแนวดิ่ง	57
ก.2 วงจรความร้อนสำหรับโครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งในแนวดิ่ง	57
ก.3 โครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งสำหรับฉนวนกันความร้อน	62
ก.4 วงจรความร้อนสำหรับโครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งสำหรับฉนวนกันความร้อน	62
ข.1 ภาพไอโซเมตริกแสดงภาพรวมของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	65
ข.2 ภาพฉายแสดงภาพรวมของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	66
ข.3 ภาพฉายแสดงส่วนของเตาถ่านภายในอุปกรณ์	67
ข.4 ภาพฉายแสดงส่วนของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส	68
ข.5 ภาพฉายแสดงส่วนของฝาปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส	69
ข.6 ภาพฉายแสดงส่วนของโครงอุปกรณ์สำหรับรองรับกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส	70
ค.1 การเตรียมการทดลองสำหรับการหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุเปลี่ยนเฟส	71
ค.2 การนำวัสดุเปลี่ยนเฟสไปรับความร้อนจากน้ำมัน และเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว เพื่อหาความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะของเหลว	71
ค.3 การนำวัสดุเปลี่ยนเฟสไประบายความร้อนภายในน้ำ และเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของแข็ง เพื่อหาความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะของแข็ง	71
ค.4 ชั้นเตาเผาถ่านภายในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง	72
ค.5 กล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.6 การติดตั้งกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสลงในช่องด้านล่างของเตาเผา	72
ค.7 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมเครื่องมือวัด	73
ค.8 การนำกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสวางลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีไม่ได้ติดตั้งครีบบระบายความร้อน	73
ค.9 การนำกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสวางลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีติดตั้งครีบบระบายความร้อน	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อX้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษ

a	ค่าคงที่ของฟังก์ชันพหุนาม
A	พื้นที่หน้าตัด (m^2)
A_s	พื้นที่หน้าตัด (m^2)
b	ค่าคงที่ของฟังก์ชันพหุนาม
c	ค่าคงที่ของฟังก์ชันพหุนาม
C	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะ และพื้นผิวของการพาความร้อน
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะ ($kJ/kg\cdot K$)
dT/dx	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหนึ่งหน่วยความยาว (K/m)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ $9.81 m/s^2$
Gr	เลขกราชอฟ
h	เอนทาลปีของความร้อนสัมผัส (kJ/kg)
h_c	สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน ($W/m^2\cdot K$)
h_r	สัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อน ($W/m^2\cdot K$)
h_{ref}	ความร้อนสัมผัสที่สภาวะอ้างอิง (kJ/kg)
H	เอนทาลปีของวัสดุเปลี่ยนเฟส (kJ/kg)
ΔH_{fus}	เอนทาลปีของการหลอมเหลว (kJ/kg)
I	กระแสไฟฟ้า (A)
k	ค่าการนำความร้อน ($W/m\cdot K$)
K	สภาพนำความร้อน (W/K)
L_t	ความยาวของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (m)
L	ความหนา (m)
L_c	คุณลักษณะความยาว (m)
L_{fus}	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)
n	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะ และพื้นผิวของการพาความร้อน
n_{TEG}	จำนวนคู่ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
Nu	เลขนัสเซลต์
P_{Pro}	กำลังไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (W)
Pr	เลขพรันด์เทิล
\dot{Q}_c	อัตราการปลดปล่อยความร้อนออกบริเวณด้านอุณหภูมิต่ำ (W)
\dot{Q}_{cond}	อัตราการนำความร้อน (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต่อ XI ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษ (ต่อ)

\dot{Q}_{conv}	อัตราการพาความร้อน (W)
\dot{Q}_H	อัตราความร้อนไหลเข้าบริเวณด้านอุณหภูมิสูง (W)
\dot{Q}_{rad}	อัตราการแผ่รังสีความร้อน (W)
R	ผลรวมของความต้านทานภายในของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี (Ω)
Ra	เลขเรย์ลี
R_{cond}	ความต้านทานความร้อนของการนำความร้อน (K/W)
R_{conv}	ความต้านทานความร้อนของการพาความร้อน (K/W)
R_{Load}	ความต้านทานภายในของโหลดตัวต้านทาน (Ω)
R_N	ความต้านทานภายในของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (Ω)
R_P	ความต้านทานภายในของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (Ω)
R_{rad}	ความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อน (K/W)
S_L	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (m^2)
T	อุณหภูมิ (K)
T_C	อุณหภูมิบริเวณด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (K)
T_H	อุณหภูมิบริเวณด้านร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (K)
$T_{liquidus}$	อุณหภูมิต่ำสุดที่วัสดุเปลี่ยนเฟสมีสถานะของเหลวทั้งหมด (K)
T_{ref}	อุณหภูมิอ้างอิง (K)
T_s	อุณหภูมิพื้นผิว (K)
T_{surr}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)
$T_{solidus}$	อุณหภูมิสูงสุดที่วัสดุเปลี่ยนเฟสมีสถานะเป็นของแข็งสมบูรณ์ (K)
T_∞	อุณหภูมิซึ่งไกลพื้นผิว (K)
V	ความต่างศักย์ (V)
ZT	ตัวแปรไร้มิติ หรือ Figure-of-merit

สัญลักษณ์ภาษากรีก

α	สัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัว (V/K)
α_p	สัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (V/K)
α_n	สัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (V/K)
α_{pn}	ผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี (V/K)
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (1/K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต่อXIIไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์ภาษากรีก (ต่อ)

γ	เศษส่วนของเหลว (Liquid fraction)
Δ	ความแตกต่าง
ε	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
η_{TEG}	ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
$\eta_{TEG, Max}$	ประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
κ	สภาพการนำไฟฟ้า (S/m)
ν	ความหนืดจลนศาสตร์ (m^2/s)
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)
σ	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K$

คำย่อ

CPCMs	วัสดุเปลี่ยนเฟสเชิงประกอบ (Composite Phase Change Materials)
CS	กะลามะพร้าว (Coconut shell)
EG	เอทิลีนไกลคอล ($C_2H_6O_2$)
ESS	ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage system)
ET	อีทริทอล ($C_4H_{10}O_4$)
GF	โฟมกราไฟต์ (Graphite Foam)
HP	ท่อความร้อน (Heat pipe)
LHTES	แหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนแฝง (Latent Heat Thermal Energy Storage)
MW	ไม้มะดัน (Madan wood)
PCMs	วัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase Change Materials)
PCT	อุณหภูมิในการเปลี่ยนวิภูภาค (Phase Change Temperature)
PV	โซลาร์เซลล์ (Photovoltaic)
PVC	พอลิไวนิลคลอไรด์ ($(C_2H_3Cl)_n$)
SAT	โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต ($CH_3COONa \cdot 3H_2O$)
SS	เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)
TE	วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)
TEC	เครื่องทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler)
TEG	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric generator)
TEH	เครื่องทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric heater)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ XIII จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

พลังงานความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat energy) เป็นพลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศหลังจากผ่านการใช้ประโยชน์ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแก๊ส หรือของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศ สามารถแบ่งออกเป็นพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานความร้อนถูกจัดเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า และอุตสาหกรรม [1] แหล่งกำเนิดความร้อนเหลือทิ้งโดยส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียความร้อนผ่านการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน [2] การนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่สามารถแบ่งประเภทตามอุณหภูมิกว่าคือความร้อนเหลือทิ้งคุณภาพสูงมีอุณหภูมิมากกว่า 400 °C จากกระบวนการเผาไหม้ ความร้อนเหลือทิ้งคุณภาพกลางมีอุณหภูมิระหว่าง 100 °C ถึง 400 °C จากไอเสียของหน่วยการเผาไหม้ และความร้อนเหลือทิ้งคุณภาพต่ำมีอุณหภูมิน้อยกว่า 100 °C จากชิ้นส่วน ผลิตภัณฑ์ และอุปกรณ์ภายในหน่วยปฏิบัติการ [3] ซึ่งหากความร้อนข้างต้นถูกนำกลับมาใช้ใหม่ จะส่งผลให้เกิดประโยชน์สูงสุด

การนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สไอเสีย กับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ การผลิตไอน้ำ และพลังงานไฟฟ้า หรือการใช้ความร้อนเหลือทิ้งร่วมกับท่อความร้อน เพื่อให้ความร้อน หรือความเย็นกับระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ หรือระบบที่สามารถแปลงพลังงานที่กักเก็บไว้ในรูปของพลังงานความร้อน, พลังงานเคมี, พลังงานเชิงกล, พลังงานไฟฟ้า, พลังงานไฟฟ้าเคมี และการกักเก็บพลังงานร่วมให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อต้องการใช้งาน [4] สำหรับเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage: TES) จัดเป็นการกักเก็บพลังงานในรูปของการทำความร้อน หรือความเย็น ภายในวัสดุตัวกลาง ซึ่งถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์สำหรับการประยุกต์ใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นเวลามากกว่า 20 ปี สามารถแบ่งประเภทออกได้ตามวิธีการที่ใช้กักเก็บพลังงานความร้อน ได้แก่ แหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝง และอุณหภูมิ ซึ่งวัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase Change Materials: PCMs) เป็นวัสดุที่อาศัยหลักการการเปลี่ยนวัฏภาคระหว่างสารจากของแข็ง และของเหลว โดยการอาศัยความร้อนแฝง (Latent heat) เมื่อวัสดุเปลี่ยนเฟสได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุดังกล่าวเกิดการดูดพลังงาน (Endothermic) และกักเก็บไว้ในวัสดุ ทำให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคจากของแข็งเป็นของเหลว และเมื่ออุณหภูมิภายนอกลดลงทำให้เกิดการคายพลังงาน (Exothermic) ทำให้วัสดุดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคกลับไปสู่ของแข็งอีกครั้ง [5] หรืออาจกล่าวได้ว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสสามารถควบคุมอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ โดยการให้พลังงานความร้อน ซึ่งได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรม [6] ทั้งนี้ การแปลงพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า จะอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator: TEG) ซึ่งเป็นวงจรลักษณะแบบโซลิดสเตท (Solid-state) บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ซีเบค ซึ่งจะสร้างแรงดันไฟฟ้าก็ต่อเมื่อบริเวณด้านหนึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอีกด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟส ร่วมกันกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น ยังไม่ได้รับการนำมาใช้ร่วมกันอย่างแพร่หลาย กล่าวคือจะเป็น การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้กับวัสดุเปลี่ยนเฟส หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเพียงชนิดเดียว หรือเป็นการศึกษาเชิงคำนวณเท่านั้น การศึกษาอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัย วัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกภายในปริภูมิงานนี้ จึงเป็นการจำลอง การนำความร้อนเหลือทิ้งที่ได้มาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้จากเตาเผา ซึ่งเป็นความร้อนเหลือทิ้งที่พบได้ ทั้งภายในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อเป็นการนำความร้อน เหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษา และออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับการกักเก็บพลังงานความร้อน โดยอาศัย วัสดุเปลี่ยนเฟส ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า
2. เพื่อเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อน รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น และการทดลองจากอุปกรณ์ต้นแบบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาอิทธิพลของการเลือกใช้วัสดุเปลี่ยนเฟส ได้แก่ ซีพิงพาราฟิน C100PW, โซเดียมอะซิเตท ไตรไฮเดรต และน้ำตาลอิริทริทอล ภายใต้ความหนาของชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟสที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่ 20 มิลลิเมตร, 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร สำหรับการนำมาใช้ในการกักเก็บพลังงาน ความร้อนเหลือทิ้งจากปฏิกิริยาการเผาไหม้
2. ศึกษาอิทธิพลของการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบายความร้อน ในการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับการกักเก็บพลังงานโดยการอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟส ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โม-อิเล็กทริก เพื่อศึกษาผลต่างอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนี้
 - 2.1 การไม่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน
 - 2.2 การติดตั้งครีระบายความร้อน
3. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์ต้นแบบ ภายใต้ การถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ และสภาวะไม่คงตัว (Unsteady-state)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. อุปกรณ์ต้นแบบ เพื่อเพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้า จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้ในการทำนายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบกักเก็บพลังงาน ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ หรือระบบที่สามารถแปลงพลังงานที่กักเก็บไว้ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อต้องการใช้งาน และสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าให้กลายเป็นรูปแบบอื่นเพื่อกักเก็บไว้ในเวลาที่ต้องการ ระบบดังกล่าวมีแนวโน้มได้รับความต้องการเพิ่มสูงขึ้นมากถึงร้อยละ 57 ภายในปีพุทธศักราช 2573 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเศรษฐกิจ ความต้องการดังกล่าวได้ผลักดันให้นักวิจัยได้พัฒนาวิธีการใหม่ในการกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพ ส่งผ่านพลังงานได้อย่างสม่ำเสมอ และควบคุมได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน พลังงานสามารถกักเก็บได้หลายรูปแบบ ซึ่งแบ่งออกตามหลักการทำงาน และคุณสมบัติในการกักเก็บพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วยการกักเก็บพลังงานความร้อนผ่านการทำความร้อน หรือความเย็นของวัสดุตัวกลาง, พลังงานเคมีผ่านการกักเก็บพลังงานจากการผลิตสารเคมี ซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป, พลังงานเชิงกลผ่านการเก็บพลังงานในรูปของพลังงานศักย์ หรือพลังงานกล, พลังงานไฟฟ้าผ่านการเก็บพลังงานในรูปแบบของสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก, พลังงานไฟฟ้าเคมีผ่านการกักเก็บพลังงานในรูปแบบพลังงานเคมี โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีเพื่อเป็นกลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างกัน รวมถึงการกักเก็บพลังงานร่วม [4]

ในการศึกษาอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบไปด้วยทฤษฎี และงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยมีลักษณะเกิดจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิ จึงถือเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ซึ่งหมายถึงความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหนึ่งหน่วยความยาว สำหรับพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ [7] แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อนขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น ความหนา, รูปร่าง, วัสดุของตัวกลาง ฯลฯ โดยอัตราการนำความร้อนจะเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งสมการความสัมพันธ์สำหรับการนำความร้อนผ่านผนังราบ 1 มิติ ภายใต้สภาวะคงตัวจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 รวมถึงการเขียนในรูปของความต้านทานความร้อนของการนำความร้อน และความต้านทานของการนำความร้อนผ่านพื้นผิว สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{R_{\text{cond}}} \quad (2.1)$$

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{kA} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การพาความร้อน (Heat Convection)

การพาความร้อนจัดเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งที่มีตัวกลางเคลื่อนที่ โดยสามารถแบ่งพฤติกรรมออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) และการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) สำหรับอัตราการพาความร้อนจะเป็นไปตามกฎของนิวตันสำหรับการทำความเย็น (Newton's law of cooling) สามารถแสดงดังสมการที่ 2.3 รวมถึงการเขียนในรูปของความต้านทานความร้อนของการนำความร้อน และความต้านทานของการพาความร้อน ผ่านพื้นผิว สามารถแสดงดังสมการที่ 2.4

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_c A_s (T_s - T_\infty) = \frac{\Delta T}{R_{\text{conv}}} \quad (2.3)$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h_c A_s} \quad (2.4)$$

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนตามธรรมชาติบนพื้นผิวจะขึ้นกับรูปร่างพื้นผิว รวมถึงการจัดวาง หรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิว และคุณสมบัติของของไหล โดยเลขนัสเซลต์ (Nusselt number: Nu) แสดงถึงอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับการนำความร้อนที่ของไหลชนิดเดียวกัน เลขนัสเซลต์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเลขกราชอฟ (Grashof number: Gr) และเลขพรันด์เทิล (Prandtl number: Pr) ซึ่งเป็นตัวเลขไร้มิติ (Dimensionless number) และสามารถเขียนรวมกันได้เป็นตัวแปรไร้มิติใหม่ เรียกว่าเลขเรย์ลี (Rayleigh number: Ra) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5 ขณะที่เลขเรย์ลีคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 และคุณสมบัติของของไหลจะถูกคำนวณจากอุณหภูมิฟิล์ม (Film temperature) ซึ่งนิยามโดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว และอุณหภูมิซึ่งไกลจากพื้นผิวออกไป

$$\text{Nu} = \frac{h_c L_c}{k} = C(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n = C\text{Ra}^n \quad (2.5)$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} \text{Pr} \quad (2.6)$$

ในกรณีของแผ่นปิดขนานที่วางตัวในแนวนอน (Horizontal rectangular enclosures) ซึ่งทำให้เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติไปในทิศทางที่อุณหภูมิสูงกว่าสู่อุณหภูมิต่ำกว่า และภายในด้านช่องปิดบรรจุของไหลอยู่ โดย Hollands และคณะ [8] ได้เสนอสหสัมพันธ์ในการคำนวณเลขนัสเซลต์ สำหรับพื้นผิวปิดที่มีของไหลบรรจุภายในเป็นอากาศ แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.7 สหสัมพันธ์ข้างต้นนั้น สามารถนำมาใช้ได้ก็ต่อเมื่อเลขเรย์ลีมีค่าน้อยกว่า 10^8 หากพจน์ภายใน $[]^+$ มีค่าเป็นลบแล้ว พจน์ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\text{Nu} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{\text{Ra}} \right]^+ + \left[\frac{\text{Ra}^{1/3}}{18} - 1 \right]^+ \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องการตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน และสามารถเกิดขึ้นได้ภายในวัสดุทุกชนิดซึ่งสามารถแผ่รังสีความร้อนออกมาได้ทั้งสิ้น ดังนั้นการแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้ระบบสุญญากาศ และการแผ่รังสีความร้อนมักจะเกิดขึ้นรวมกันกับการพาความร้อน สำหรับอัตราการแผ่รังสีความร้อนจะเป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann's law) ซึ่งสมการความสัมพันธ์สำหรับอัตราการแผ่รังสีความร้อนนั้น จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.8 หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรรความร้อน แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.9 รวมถึงการเขียนในรูปของความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อน โดยความต้านทานของการแผ่รังสีความร้อน สามารถแสดงดังสมการที่ 2.10 และสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.11

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2.8)$$

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_r A_s (T_s - T_{\text{surr}}) = \frac{\Delta T}{R_{\text{rad}}} \quad (2.9)$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{h_r A_s} \quad (2.10)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{\text{surr}}^2)(T_s + T_{\text{surr}}) \quad (2.11)$$

การวิเคราะห์ปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อนสำหรับพื้นผิวปิดอาจมีการระบุอุณหภูมิ หรืออัตราการถ่ายเทความร้อน หรือทั้งสองค่าพร้อมกันของพื้นผิวด้านหนึ่ง เพื่อให้สามารถคำนวณอุณหภูมิ หรืออัตราการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวอื่นที่ยังไม่ทราบค่าได้ การแก้ปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ กรณีที่มีการกำหนดอุณหภูมิที่พื้นผิวจะอาศัยสมการที่ 2.12 สำหรับการคำนวณหารังสีสุทธิที่ออกจากพื้นผิว (Radiosity) และกรณีที่มีการกำหนดอัตราการแผ่รังสีความร้อนจะอาศัยสมการที่ 2.13 สำหรับการคำนวณหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิ

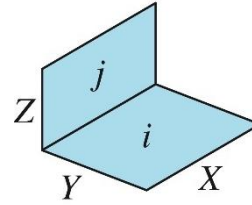
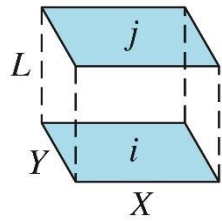
$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (2.12)$$

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (2.13)$$

2.1.3.1 แฟกเตอร์วิว (View Factor)

แฟกเตอร์วิวเป็นตัวแปรที่เปรียบเทียบเสมือนการเทียบค่าสัดส่วนของรังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิวหนึ่งสู่อีกพื้นผิวหนึ่ง ซึ่งพื้นผิวอาจจะมีรูปร่าง และการวางตัวในลักษณะใดก็ได้ สำหรับค่าแฟกเตอร์วิวสำหรับพื้นผิวราบที่มีการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นผิวของตัวเองจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และแฟกเตอร์วิวสำหรับพื้นผิวรูปทรง 3 มิติที่มีลักษณะการจัดวางตัวในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 สำหรับกรณีพื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกัน และกรณีพื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งฉากที่มีขอบเท่ากันตามลำดับ สามารถคำนวณแฟกเตอร์วิวได้ดังสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 พื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกัน [7] รูปที่ 2.2 พื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งฉากที่มีขอบเท่ากัน [7]

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\} \quad (2.14)$$

เมื่อ $\bar{X} = \frac{X}{L}$ และ $\bar{Y} = \frac{Y}{L}$

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \right. \right. \\ \left. \left. \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right\} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อ $H = \frac{Z}{X}$ และ $W = \frac{Y}{X}$

2.1.3.2 ความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์วิว

ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อนสามารถใช้ความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์วิวที่ทราบค่าแล้วช่วยในการคำนวณค่าแฟกเตอร์วิวของสองพื้นผิวอื่นที่วิเคราะห์ได้ เนื่องจากพื้นผิวปิดจำนวน N พื้นผิวนั้น จะต้องมีการประเมินแฟกเตอร์วิวจำนวน N^2 ค่า ซึ่งการประเมินดังกล่าวจะอาศัยเวลาในการคำนวณมากเมื่อคำนวณผ่านสมการโดยตรง การอาศัยความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์วิวจึงช่วยลดความจำเป็นในการประเมินแฟกเตอร์วิวทั้งหมดโดยตรง โดยความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์วิวที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ประกอบด้วยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ความสัมพันธ์ส่วนกลับ (The Reciprocity Relation)

แฟกเตอร์วิวระหว่างพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j และแฟกเตอร์วิวระหว่างพื้นผิว j ไปยังพื้นผิว i จะมีค่าไม่เท่ากัน ยกเว้นในกรณีพื้นที่ผิวของพื้นผิวทั้งสองมีค่าเท่ากัน หรือสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.16 หรือเขียนความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณแฟกเตอร์วิวในกรณีพื้นที่ผิวทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันได้ดังสมการที่ 2.17

$$F_{j \rightarrow i} = F_{i \rightarrow j} \quad \text{เมื่อ } A_i = A_j \quad (2.16)$$

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i} \quad (2.17)$$

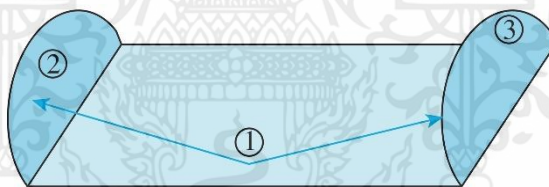
2) กฎของผลรวม (The Summation Rule)

แฟกเตอร์วิวจากพื้นผิว i สำหรับกรณีพื้นผิวปิดจำนวนเท่ากับ N พื้นผิวนั้น จะมีค่าเท่ากับ 1 โดยรวมกับพื้นผิวที่ทำการพิจารณา ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.18

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (2.18)$$

3) กฎความสมมาตร (The Symmetry Rule)

กฎความสมมาตรเกิดจากรูปร่าง และการวางตัวของพื้นผิว แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งหากพื้นผิวที่ 2 และ 3 มีการวางตัวในลักษณะสมมาตรกับพื้นผิวที่ 1 ค่าแฟกเตอร์วิวจากพื้นผิวที่ 1 ไปยังพื้นผิวที่ 2 จะมีค่าเท่ากับค่าแฟกเตอร์วิวจากพื้นผิวที่ 1 ไปยังพื้นผิวที่ 3 และความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับความสัมพันธ์ส่วนกลับดังที่ได้มีการกล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 2.3 ลักษณะพื้นผิวที่มีความสมมาตร [7]

2.1.4 วิธีการวิเคราะห์ปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อน

การวิเคราะห์ปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อนสำหรับพื้นผิวปิด อาจมีการกำหนดอุณหภูมิหรืออัตราการถ่ายเทความร้อน หรือทั้งสองค่าของพื้นผิวด้านหนึ่ง เพื่อให้สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิหรืออัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับพื้นผิวอื่นๆ ที่ไม่ทราบค่าได้ การวิเคราะห์ปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ กรณีพื้นผิวที่มีการกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อน จะอาศัยสมการที่ 2.19 ในการวิเคราะห์ปัญหาการแผ่รังสีความร้อน และกรณีที่มีการกำหนดอุณหภูมิบริเวณพื้นผิว จะอาศัยสมการที่ 2.20 ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านการแผ่รังสีความร้อน

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (T_i - T_j) \quad (2.19)$$

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (T_j - T_i) \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 เงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary and Initial Conditions)

การแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในตัวกลางมีความจำเป็นต้องทราบเงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา เช่น เงื่อนไขที่เวลาเริ่มต้น สำหรับพิกัดที่เปลี่ยนแปลงสามารถเขียนเงื่อนไขเริ่มต้นให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปแสดงได้ดังสมการที่ 2.21

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad (2.21)$$

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะ ดังต่อไปนี้

2.1.5.1 เงื่อนไขขอบเขตโดยการกำหนดอุณหภูมิ

อุณหภูมิของพื้นผิวสัมผัสสามารถวัดค่าได้โดยตรง วิธีที่ง่ายที่สุดในการระบุสถานะบนพื้นผิว คือการระบุอุณหภูมิ สำหรับการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติที่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังระนาบ ซึ่งมีความหนาเท่ากับ L สำหรับระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนในแนว 1 มิติ สามารถแสดงเงื่อนไขขอบเขตได้ดังสมการที่ 2.22

$$T(L, t) = T_1 \quad (2.22)$$

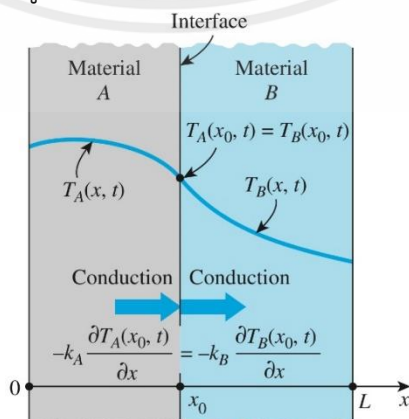
2.1.5.2 เงื่อนไขขอบเขตโดยการกำหนดฟลักซ์ความร้อน

การกำหนดฟลักซ์ความร้อนจัดเป็นการกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ โดยฟลักซ์ความร้อนสามารถเขียนในรูปกฎของฟูเรียร์ สำหรับกรณีพิเศษที่มีการกำหนดให้บริเวณด้านหนึ่งมีการหุ้มฉนวน หรือฟลักซ์ความร้อนมีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถแสดงเงื่อนไขขอบเขตได้ดังสมการที่ 2.23

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (2.23)$$

2.1.5.3 เงื่อนไขขอบเขตโดยการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิว

องค์ประกอบภายในอุปกรณ์บางชนิดถูกสร้างขึ้นด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนั้น ผลเฉลยของปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในตัวกลางนั้น จึงต้องการผลเฉลยภายในวัสดุแต่ละชั้น หรือต้องการข้อมูลจำเพาะของเงื่อนไขขอบเขตระหว่างรอยต่อของพื้นผิว ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตบริเวณดังกล่าว ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดให้บริเวณที่วัสดุทั้งสองสัมผัสกันต้องมีอุณหภูมิเท่ากัน และรอยต่อบริเวณพื้นผิวนั้น ไม่เกิดการสะสมพลังงาน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับกรณีการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิว [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดทั้งสองสำหรับเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว จะแสดงว่าฟลักซ์ความร้อน บริเวณทั้งสองพื้นผิวต้องมีค่าเท่ากัน เงื่อนไขขอบเขตบริเวณพื้นผิวทั้งสอง ณ จุดสัมผัส สามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 2.24

$$-k_A \frac{\partial T_A(x_0, t)}{\partial x} = -k_B \frac{\partial T_B(x_0, t)}{\partial x} \quad (2.24)$$

2.1.5.4 เงื่อนไขขอบเขตโดยทั่วไป

การถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปแล้วอาจเกิดขึ้นหลายรูปแบบพร้อมกัน เงื่อนไข ขอบเขตในกรณีดังกล่าวจะได้รับการพิจารณาจากสมดุลพลังงานบริเวณพื้นผิว แสดงดังสมการที่ 2.25

$$\text{การถ่ายเทความร้อนสู่พื้นผิว} = \text{การถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นผิว} \quad (2.25)$$

2.1.6 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods)

การวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนอย่างง่ายมักจะมีข้อกำหนดสมมติฐานตามรูปแบบ เช่น วัสดุที่มีด้านหนึ่งยาวมาก สามารถสมมติให้การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ ภายใต้สภาวะคงตัว รวมถึงกำหนดคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางให้มีค่าคงที่ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ หรือการตัดตัวแปร บางตัวแปรออก เพื่อความสะดวกต่อการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ปัญหาการถ่ายเทความร้อนมักไม่เป็นไปตาม ข้อกำหนด หรือข้อสมมติข้างต้น ดังนั้นการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เข้ามาช่วยในการคำนวณปัญหาการถ่ายเทความร้อน เช่น วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method: FDM), วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method: FEM) และวิธีปริมาตรควบคุม (Finite volume method: FVM) เป็นต้น มาช่วยในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละรูปแบบ

2.1.6.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมสำหรับสมการเชิงอนุพันธ์

วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์เป็นการแทนที่สมการเชิงอนุพันธ์ โดยสมการพีชคณิต กรณีของการนำวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมาใช้ นั้น จะเป็นการแทนที่อนุพันธ์ด้วยผลต่าง ซึ่งอนุพันธ์ หรือค่าการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันตามตัวแปรต้นสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังสมการที่ 2.26

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (2.26)$$

2.1.6.2 สมดุลพลังงานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข

พิจารณาสมการสมดุลพลังงานจะสามารถสรุปพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ที่เกิดขึ้นที่อีลิเมนต์ที่สนใจ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.27 เมื่อพิจารณาจากสมการดังกล่าวพบว่า กรณีที่การถ่ายเทความร้อนอยู่ภายใต้สภาวะคงตัว ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในอีลิเมนต์ หรือพจน์ ทางขวามือของสมการจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่อัตราการกำเนิดความร้อนภายในอีลิเมนต์สามารถ คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.28

$$\dot{Q}_{\text{left}} + \dot{Q}_{\text{right}} + \dot{E}_{\text{gen, element}} = \frac{\Delta E_{\text{element}}}{\Delta t} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\Delta E_{\text{element}}}{\Delta t} = \dot{e}_m V_{\text{element}} = \dot{e}_m A \Delta x \quad (2.28)$$

2.1.6.3 การถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะไม่คงตัว

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะไม่คงตัวสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขได้เช่นกัน เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานของกรณีดังกล่าว โดยกำหนดให้ค่า i เป็นคาบของเวลา ซึ่งมีความแตกต่างของเวลาเท่ากับ Δt ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.29

$$\sum_{\text{all-sides}} \dot{Q} + \dot{E}_{\text{gen, element}} = \rho V_{\text{element}} c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (2.29)$$

อุณหภูมิแต่ละโหนดสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะไม่คงตัว จะมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงของเวลา อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวอาจวิเคราะห์ได้จากคาบเวลาที่ i หรือคาบเวลาที่ $i + 1$ ซึ่งการวิเคราะห์ทั้งสองแนวทางเป็นการวิเคราะห์ที่สมเหตุสมผลและนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งวิธีผลต่างสืบเนื่องจากการวิเคราะห์จากคาบเวลาที่ i จะเรียกว่าวิธีชัดแจ้ง (Explicit method) แสดงได้ดังสมการที่ 2.30 ในขณะที่การวิเคราะห์จากคาบเวลาที่ $i + 1$ จะเรียกว่าวิธีโดยปริยาย (Implicit method) แสดงได้ดังสมการที่ 2.31

$$\sum_{\text{all-sides}} \dot{Q}^i + \dot{E}_{\text{gen, element}}^i = \rho V_{\text{element}} c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (2.30)$$

$$\sum_{\text{all-sides}} \dot{Q}^{i+1} + \dot{E}_{\text{gen, element}}^{i+1} = \rho V_{\text{element}} c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (2.31)$$

การวิเคราะห์ด้วยวิธีชัดแจ้ง และวิธีโดยปริยายมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับวิธีชัดแจ้งเป็นวิธีการที่ง่ายกว่า แต่ถูกจำกัดด้วยความแตกต่างของเวลา หรือคาบเวลา ซึ่งจำเป็นต้องมีการหาคาบเวลาที่สามารถใช้ได้ เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งของคำตอบ ในขณะที่วิธีโดยปริยายต้องมีการหาอุณหภูมิที่โหนด เพื่อแก้ปัญหานั้นในขั้นถัดไป หรือคาบเวลาถัดไป แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีโดยปริยายไม่ถูกจำกัดด้วยคาบเวลา ทั้งนี้ระยะคาบเวลาที่สั้นจะให้ค่าความถูกต้องที่แม่นยำมากกว่า

2.1.6.4 เกณฑ์เสถียรภาพสำหรับวิธีชัดแจ้ง

การวิเคราะห์ด้วยวิธีชัดแจ้งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ง่าย แต่หากมีการกำหนดความแตกต่างของเวลามากเกินไป จะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างไปจากค่าจริง ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณช่วงจำกัดของความแตกต่างของเวลา หรือคาบเวลาก่อน โดยตัวแปรที่ถูกนำมาใช้สำหรับการนำเสนอคาบของเวลาที่เปลี่ยนแปลงคือค่าเลขฟูเรียร์ (Fourier number: Fo) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่สามารถมองได้ในรูปของอัตราส่วนการนำความร้อนต่อการเก็บความร้อนในวัตถุ แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.32

$$\tau = \frac{kL^2(1/L)}{\rho c_p L^3 / t} \frac{\Delta T}{\Delta T} = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมี โดยมีองค์ประกอบคือเชื้อเพลิง ออกซิเจน และความร้อน โดยค่าความร้อนของชีวมวล หรือสารอินทรีย์จะขึ้นกับองค์ประกอบของสารเชื้อเพลิง ธาตุหลัก 2 ธาตุภายในสารเชื้อเพลิง ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอน และไฮโดรเจน เมื่อคาร์บอน 1 โมล ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล จะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล [9] สามารถแสดงสมการของปฏิกิริยาเคมีได้ดังสมการที่ 2.33 และไฮโดรเจน 2 โมล ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล จะได้ไอน้ำ 2 โมล สามารถแสดงสมการของปฏิกิริยาเคมีได้ดังสมการที่ 2.34

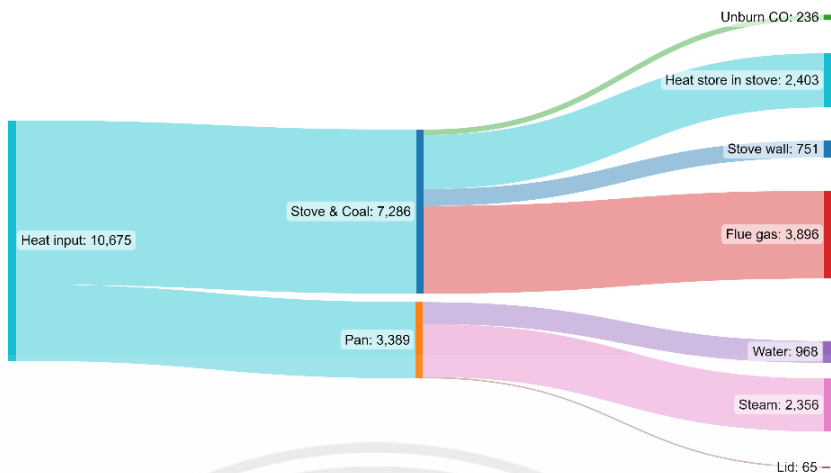


เมื่อคาร์บอน และไฮโดรเจนเกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์จะให้ค่าความร้อน 33,053.60 kJ/kg และ 142,256.00 kJ/kg ตามลำดับ ในทางปฏิบัติพบว่าการผสมของถ่านหิน และออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก จึงไม่ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด อนุภาคบางส่วนของถ่านหินจึงมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนมากเกินไป และบางส่วนจะสัมผัสไม่เพียงพอ คาร์บอนที่เกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งให้ค่าความร้อนเพียง 8,792.28 kJ/kg เท่านั้น [10] ทั้งนี้ถ่านที่มีค่าความร้อนของการสันดาปสูงถือว่าเป็นถ่านคุณภาพดี แต่การใช้งานภายในครัวเรือน ไม่จำเป็นต้องมีค่าความร้อนของการสันดาปสูง เช่น ถ่านไม้โกงกางที่มีค่าความร้อนระหว่าง 25,120.8 kJ/kg ถึง 27,214.2 kJ/kg

ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ และคณะ (2020) ได้ทำการผลิตถ่านอัดแท่งจากของเสียทางการเกษตร 2 ชนิด ได้แก่ ไม้มะดัน (Madan wood: MW) และกะลามะพร้าว (Coconut shell: CS) โดยนำของเสียทั้งสองมาบดเพื่อผสมเข้าด้วยกันกับแป้งมันสำปะหลัง แล้วขึ้นรูปก่อนนำไปผึ่งลม ซึ่งใช้อัตราส่วนของของเสียระหว่าง MW ต่อ CS ในการผสมแตกต่างกัน ได้แก่ 100:0, 80:20, 50:50 และ 0:100 แล้วจึงนำไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมี ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าถ่านอัดแท่งจากไม้มะดันจะมีค่าความร้อนมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27,706.45 kJ/kg ในขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวมีค่าความร้อนเท่ากับ 26,401.04 kJ/kg และอัตราการการเผาไหม้ (Burning rate) ของถ่านไม้มะดัน และถ่านกะลามะพร้าวเท่ากับ 0.53 g/min และ 0.44 g/min ตามลำดับ [11]

Dunn และคณะ (1982) ได้ระบุว่าความร้อนจากการเผาถ่านมีอุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 1,000 °C และแก๊สเผาไหม้ (Flue Gas) มีอุณหภูมิระหว่าง 500 ถึง 750 °C โดยความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ภายในเตาเผาอธิบายได้จากทฤษฎีของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมมูลความร้อน รูปที่ 2.5 แสดงถึงสมมูลความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา พบว่าถ่านปริมาณ 340 กรัม จะให้พลังงานความร้อน 10,675 kJ โดยสัดส่วนพลังงานไปยังแต่ละส่วน ได้แก่ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาสันดาปไม่สมบูรณ์เท่ากับ 236 kJ, ความร้อนที่สะสมภายในเตาถ่านเท่ากับ 2,403 kJ, ความร้อนบริเวณผนังด้านข้างเตาเผาเท่ากับ 751 kJ, ความร้อนที่ไปยังแก๊สเผาไหม้เท่ากับ 3,896 kJ และความร้อนในส่วนองกระหะเท่ากับ 3,389 kJ แบ่งออกเป็นสัดส่วน ได้แก่ ความร้อนจากกระหะไปยังน้ำภายในกระหะเท่ากับ 968 kJ, ความร้อนของน้ำที่กลายเป็นไอน้ำเท่ากับ 2,356 kJ และความร้อนบริเวณฝามีค่าเท่ากับ 65 kJ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงสมดุลพลังงานของเตาเผา [12]

2.3 ระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage)

ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนจัดเป็นวิธีการที่มีความนิยม และนำมาใช้งานมากที่สุด เพื่อใช้ในการกักเก็บพลังงาน และใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วย ความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝง และอุณหภูมิ ช่วงระยะหลังพบว่าแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนแฝง (Latent Heat Thermal Energy Storage: LHTEs) ได้รับความสนใจสูงขึ้น เนื่องจากความหลากหลายในการดำเนินงาน และวัสดุมีความหลากหลาย วัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase Changes Materials: PCMs) จึงถูกนำมาใช้สำหรับการกักเก็บพลังงานในรูปแบบของการดูดซับพลังงานความร้อนแฝงที่ปรากฏขึ้น และนำไปสู่การเปลี่ยนวัฏภาคซึ่งถือเป็นรอบการชาร์จ (Charging cycle) และเมื่อความร้อนที่ถูกดูดซับไว้ปลดปล่อยออกมาจะเกิดการเปลี่ยนกลับสู่วัฏภาคเดิมซึ่งถือเป็นรอบการใช้ (Discharging cycle) [13] นอกจากนี้วัสดุเปลี่ยนเฟสยังใช้ปริมาณวัสดุน้อยกว่าสารชนิดอื่นในการกักเก็บพลังงาน 1 เมกะจูล

2.3.1 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนเฟส (Classification of PCMs)

วัสดุเปลี่ยนเฟสจะสามารถแบ่งประเภทออกได้ตามประเภทของการเปลี่ยนวัฏภาค และวัสดุที่ใช้ในการกักเก็บพลังงาน [14,15] วัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทของเหลว-แก๊ส และของแข็ง-แก๊ส มักจะไม่ถูกนำมาใช้ภายในการกักเก็บ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากขณะเกิดการเปลี่ยนวัฏภาค ในกรณีนี้วัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid PCMs) จะถูกนำมาใช้งานมากกว่า เนื่องจากความหนาแน่นในการกักเก็บพลังงานสูง และใช้งานได้ภายในช่วงอุณหภูมิที่หลากหลาย [16] โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งต่างมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.1

2.3.2 เกณฑ์การคัดเลือกวัสดุเปลี่ยนเฟส (PCMs Selection Criteria)

การเลือกวัสดุเปลี่ยนเฟสมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนแฝงภายในอุปกรณ์ทางการแพทย์ สิ่งก่อสร้าง แหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ในการคัดเลือกวัสดุเปลี่ยนเฟสสามารถจำแนกได้เป็น 5 คุณสมบัติหลัก แสดงดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สรุปข้อดี และข้อเสียของประเภทวัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทของแข็ง-ของเหลว [17-20]

ประเภท	ข้อดี		ข้อเสีย	ตัวอย่างกลุ่มสารประกอบ
สารอินทรีย์ (4 - 150 °C)	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เกิดสภาวะความเย็นยิ่งยวด - ไม่เกิดการแยกระหว่างวัฏภาค - ความดันไอต่ำ - ช่วงอุณหภูมิในการใช้งานสูง - เกิดนิ่วคลีไอได้ด้วยตัวเอง 	<ul style="list-style-type: none"> - เข้ากันได้กับวัสดุก่อสร้างทั่วไป - มีความเสถียรทางเคมี - นำไปรีไซเคิลได้ - ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ติดไฟได้ - ค่าการนำความร้อนต่ำ - ความจุความร้อนแฝงเชิงปริมาตรต่ำ - ช่วงจุดหลอมเหลวมีความกว้าง 	<ul style="list-style-type: none"> - สารพาราฟิน - กรดไขมัน - แอลกอฮอล์ - เอสเทอร์
สารอนินทรีย์ (8 - 900 °C)	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าการนำความร้อนสูง - ราคาถูก - ไม่ติดไฟ 	<ul style="list-style-type: none"> - การเปลี่ยนวัฏภาคเกิดอย่างชัดเจน - ความจุความร้อนแฝงเชิงปริมาตรสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - การกัดกร่อนกับโลหะ - สภาวะความเย็นยิ่งยวด - การแยกระหว่างวัฏภาค - การเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูง - ความเสถียรต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - เกลือ - เกลือไฮเดรต - โลหะผสม
สารยูเทคติก (12 - 600 °C)	<ul style="list-style-type: none"> - จุดหลอมเหลวชัดเจน - ปรับแต่งคุณสมบัติได้ตามต้องการ 	<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นในการจัดเก็บความร้อนเชิงปริมาตรสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - คุณสมบัติทางเทอร์โมฟิสิกส์ยังมีจำกัด - สำหรับการผสมจำนวนมาก - ราคาแพง 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์-สารอินทรีย์ - สารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ - สารอนินทรีย์-สารอนินทรีย์

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงเกณฑ์การคัดเลือกวัสดุเปลี่ยนเฟส [21–23]

คุณสมบัติ	เกณฑ์การคัดเลือก
ทางเทอร์โมไดนามิกส์	<ul style="list-style-type: none"> - จุดหลอมเหลวอยู่ภายในช่วงที่ต้องการ - ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสูง - ความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่นสูง - การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ เมื่อเกิดการเปลี่ยนวัฏภาค - ระดับสถานะความเย็นยิ่งยวด และความดันไอต่ำ ณ อุณหภูมิที่ใช้
ทางจลนพลศาสตร์	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราการเกิดนิวเคลียส และการขยายตัวของผลึกสูง
ทางเคมี	<ul style="list-style-type: none"> - รอบการแข็งตัว และหลอมเหลวสามารถผันกลับได้ - เกิดความเสถียรทางเคมี ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน - ไม่เกิดการย่อยสลายภายหลังการแข็งตัว และหลอมเหลว - ไม่เป็นพิษ จุดติดไฟได้ หรือเกิดการระเบิด
ทางเศรษฐศาสตร์	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนราคาต่ำ และสามารถหาได้ง่าย
ทางสิ่งแวดล้อม	<ul style="list-style-type: none"> - ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ นำไปรีไซเคิลได้

2.3.3 การคำนวณที่เกี่ยวข้องภายในวัสดุเปลี่ยนเฟส

การคำนวณเอนทัลปีภายในวัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid PCMs) เป็นผลรวมระหว่างความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) และความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 2.35 โดยที่ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และความร้อนสัมผัสสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 2.36 และ 2.37 ตามลำดับ และความร้อนแฝงของการหลอมเหลวจะมีค่าระหว่าง 0 สำหรับวัสดุเปลี่ยนเฟสในวัฏภาคของแข็ง และ L สำหรับวัสดุเปลี่ยนเฟสในวัฏภาคของเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับเศษส่วนของเหลว (Liquid fraction) โดยถูกกำหนดในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในวัสดุเปลี่ยนเฟส ดังสมการที่ 2.38 [24]

$$H = h + \Delta H_{\text{fus}} \quad (2.35)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT \quad (2.36)$$

$$\Delta H_{\text{fus}} = \gamma L_{\text{fus}} \quad (2.37)$$

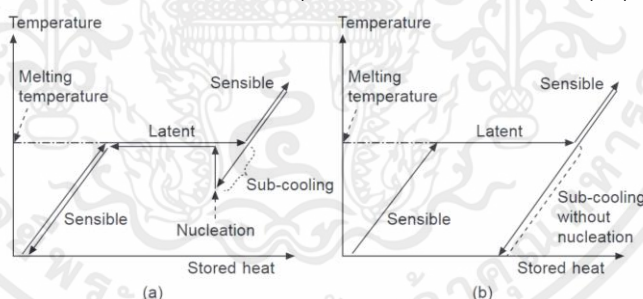
$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{กรณี } T \leq T_{\text{solidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} & \text{กรณี } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \\ 1 & \text{กรณี } T \geq T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abu-Hamdeh และ Alnefaie (2019) ได้ศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของ PCMs สำหรับกักเก็บพลังงานเพื่อใช้ในการให้ความร้อนภายในเตาแสงอาทิตย์ โดยเลือกใช้อะเซทาไมด์ (CH_3CONH_2) บรรจุลงในแคปซูลอะลูมิเนียม แล้วนำไปปรับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยการนำไปวางไว้บริเวณจานสะท้อนแบบพาราโบลา เพื่อดูดซับความร้อนจากการสะท้อน และเมื่อหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์จึงนำแคปซูลติดตั้งภายในเตาแสงอาทิตย์ เพื่อให้ความร้อนสำหรับการประกอบอาหาร ซึ่งจะทำการศึกษาภายใต้สภาวะที่ไม่มีการป้อนอากาศ และมีการป้อนอากาศในอัตราการไหลแตกต่างกัน กล่าวคือ 60, 90 และ 120 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยดำเนินการวัดอุณหภูมิของแคปซูล อาหาร และสิ่งแวดล้อมทุก 10 นาที รวมระยะเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าในช่วง 20 นาทีแรก อุณหภูมิของแคปซูลลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของอาหารจะเพิ่มขึ้นภายใต้อัตราที่รวดเร็ว จากนั้นอุณหภูมิของแคปซูลและอาหารจะใกล้เคียงกัน ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น [25]

2.3.4 สภาวะความเย็นยิ่งยวด (Supercooling)

สภาวะความเย็นยิ่งยวดเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ และจัดเป็นคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนเฟสซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจาก ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก พบว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสยังคงอยู่ภายใต้สถานะของเหลว นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ผลึกไม่สามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้กระบวนการเย็นตัว เนื่องจากส่งผลทำให้เกิดการป้องกันการปลดปล่อยความร้อนแฝง ซึ่งจัดเป็นข้อเสียเปรียบของวัสดุเปลี่ยนเฟส สภาวะความเย็นยิ่งยวดสามารถเกิดขึ้นได้กับวัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทสารอินทรีย์หรือสารยูเทคติกภายในแต่ละระบบ สภาวะดังกล่าวส่งผลทำให้ความร้อนแฝงที่กักเก็บไว้ไม่สามารถปลดปล่อยได้ ซึ่งอาจเป็นปัญหาสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านการควบคุมอุณหภูมิ [26]



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการให้ความร้อน และกระบวนการเย็นตัว ซึ่งประกอบไปด้วยผลจากสภาวะความเย็นยิ่งยวด (a) การเกิดนิวคลีโอ (b) การไม่เกิดนิวคลีโอ [27]

ระดับของสภาวะความเย็นยิ่งยวดจะแสดงถึงช่วงของอุณหภูมิที่วัสดุเปลี่ยนเฟสยังคงอยู่ภายในสถานะของเหลวซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ระดับดังกล่าวถูกกำหนดโดยความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดเริ่มต้นของกระบวนการหลอมเหลว และกระบวนการแข็งตัว แสดงดังสมการที่ 2.39

$$\Delta T = T_m - T_f \quad (2.39)$$

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดขึ้น และระดับของสภาวะความเย็นยิ่งยวดนั้น ได้แก่ อัตราการทำ ความเย็น ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ประวัติทางความร้อน (T-history) ของวัสดุเปลี่ยนเฟส และการใช้สารเติมแต่ง (Additive) เป็นต้น [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric: TE) เป็นโมดูลที่เกิดจากการนำเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก ทั้งจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) ประกอบเป็นโมดูลด้วยกัน โดยสารกึ่งตัวนำของแต่ละด้านถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบร่วมกัน แล้วประกบด้วยแผ่นตัวนำความร้อนทั้งบริเวณด้านบน และด้านล่างถัดจากขั้วไฟฟ้า [29]

2.4.1 ปรากฏการณ์ภายในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถจำแนกได้ดังนี้

2.4.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ บนปลายทั้งสองด้านของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก กล่าวคือปลายด้านหนึ่งอุณหภูมิสูง อีกปลายด้านหนึ่ง อุณหภูมิต่ำกว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัสดุทำให้ประจุไฟฟ้าปลายด้านร้อนมีพลังงานจลน์ มากกว่าปลายด้านเย็น แล้วเกิดการแพร่ไปรวมตัวกันที่ปลายด้านเย็น ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น ระหว่างจุดปลายทั้งสองด้าน โดยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) จะมีประจุพาส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน ในขณะที่สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) จะมีประจุพาส่วนใหญ่เป็นประจุบวก หรือโฮล [30]

2.4.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect)

ปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นปรากฏการณ์ย้อนกลับของปรากฏการณ์ซีเบค โดยเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุ จะส่งผลให้เกิดอัตราการสร้างความร้อน หรือความเย็นต่อหนึ่งวินาที ภายในวัสดุ กล่าวคือพาหะนำไฟฟ้าอิเล็กตรอน หรือโฮลในวัสดุทำหน้าที่เป็นตัวพาความร้อนจากด้านหนึ่งของวัสดุไปสู่อีกด้านหนึ่ง ส่งผลให้อุณหภูมิด้านที่ถูกดึงความร้อนออกไปเย็นตัวลง และอุณหภูมิด้านวัสดุ ที่ถูกนำความร้อนไปทิ้งจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น [31]

2.4.1.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

ปรากฏการณ์ทอมสันเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการปล่อย หรือดูดความร้อน ภายในวัสดุได้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุในขณะที่วัสดุจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้น [31]

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสามปรากฏการณ์ข้างต้น ทำให้สามารถนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric generator: TEG), เครื่องทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler: TEC) และเครื่องทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric heater: TEH) โดยปริยญาณิพนธ์นี้จะอธิบายเฉพาะส่วนของ TEG เท่านั้น เนื่องจากวัสดุดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator: TEG)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจัดเป็นวงจรลักษณะแบบโซลิดสเตท (Solid-state) โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องกลไฟฟ้า และไม่ทำให้ชิ้นส่วนเคลื่อนที่

[1,32] ความต่างศักย์ภายใน TEG สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.40 [33] ซึ่งสัมพันธ์ซีเบคจัดเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ เนื่องจากการบ่งบอกถึงการผันพลังงานของวัสดุ หากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก มีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิน้อย แสดงว่าวัสดุมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลง พลังงานไฟฟ้าสูง ดังนั้นวัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีต้องเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูง ในกรณีที่ ขาของเอ็น และขาของพีเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน และมีความยาว รวมไปถึงพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ส่งผลให้ มีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าการนำความร้อนจะมีค่าเท่ากัน จึงสามารถ คำนวณหาความต้านทานภายใน และสภาพนำความร้อนได้ดังสมการที่ 2.41 และ 2.42 ตามลำดับ [34] และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใน TEG แสดงดังสมการที่ 2.43 [33]

$$\Delta V = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot (T_H - T_C) \quad (2.40)$$

$$R = n_{TEG} \cdot 2\rho \cdot L_L \cdot (S_L)^{-1} \quad (2.41)$$

$$K = n_{TEG} \cdot 2k \cdot S_L \cdot (L_L)^{-1} \quad (2.42)$$

$$I = \frac{\alpha_{PN} \cdot \Delta T}{R_p + R_n + R_{Load}} \quad (2.43)$$

เมื่อพิจารณาจากสมดุลพลังงาน พบว่าอัตราความร้อนไหลเข้าบริเวณด้านอุณหภูมิสูง และ อัตราการปลดปล่อยความร้อนออกบริเวณด้านอุณหภูมิต่ำของระบบ จะขึ้นกับปรากฏการณ์เพลเทียร์ การนำความร้อน และปรากฏการณ์ของจูล ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.44 และ 2.45 ตามลำดับ [35] และ กำลังไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นภายใน TEG ซึ่งส่งขึ้นไปยังโหลดไฟฟ้าภายนอก (R_{Load}) สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ 2.46 และ 2.47 [36]

$$\dot{Q}_H = (\alpha_p - \alpha_n)IT_H - K(T_H - T_C) - 0.5RI^2 \quad (2.44)$$

$$\dot{Q}_C = (\alpha_p - \alpha_n)IT_C - K(T_H - T_C) + 0.5RI^2 \quad (2.45)$$

$$P_{Pro} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C \quad (2.46)$$

$$P_{Pro} = I^2 \cdot R_{Load} \quad (2.47)$$

การประเมินประสิทธิภาพของ TEG สามารถประเมินได้จากอัตราส่วนระหว่าง กำลังไฟฟ้า ที่ถูกผลิตขึ้นภายใน TEG ต่ออัตราความร้อนไหลเข้าบริเวณด้านอุณหภูมิสูง แสดงดังสมการที่ 2.48 [33] และประสิทธิภาพสูงสุดของ TEG ที่สามารถแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า แสดงดัง สมการที่ 2.49 [37]

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{Pro}}{\dot{Q}_H} \quad (2.48)$$

$$\eta_{TEG, Max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \left(\frac{T_C}{T_H}\right)} \quad (2.49)$$

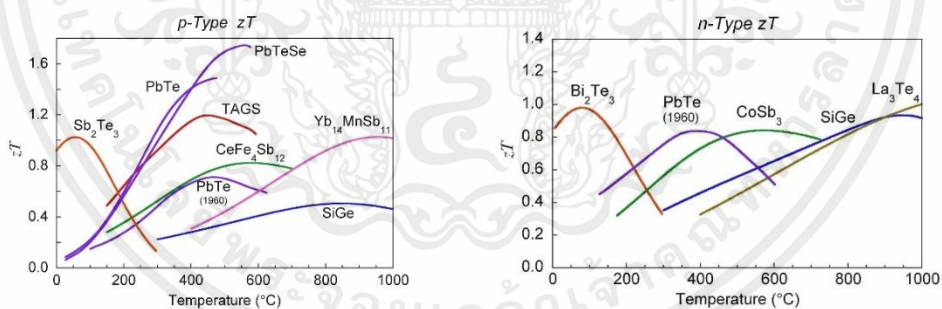
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า ZT หรือ Figure-of-merit จัดเป็นตัวแปรไร้มิติซึ่งแสดงความสามารถ หรือศักยภาพ ในการเปลี่ยนแปลงรูปพลังงาน แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.50 หรืออาจเขียนในรูปของสภาพนำ ไฟฟ้า แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.51 โดยและค่า ZT ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก หรือ ZT_{TEG} จะขึ้นอยู่กับค่า ZT ข้างต้น และสภาพต้านทานไฟฟ้า แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.52 เมื่อมี ความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นภายใน TEG ดังนั้นประสิทธิภาพของ TEG จึงมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับ ค่า ZT และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัสดุ [38] ซึ่งวัสดุที่มีค่า ZT สูงจะต้องมีคุณสมบัติ กล่าวคือสัมประสิทธิ์ซีเบคสูง และมีความต้านทานไฟฟ้า และค่าการนำความร้อนต่ำ รูปที่ 2.7 แสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ZT เทียบกับอุณหภูมิของวัสดุ TEG แต่ละชนิด ซึ่งแสดงว่าวัสดุ TEG ที่ผลิตมา จากแอนติโมนีเทลลูไรด์ (Sb_2Te_3) และบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็น ตามลำดับ มีความเหมาะสมในการใช้งานช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า $150\text{ }^{\circ}C$ และ ณ อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ ค่า ZT สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.8 [39]

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot T}{\rho \cdot k} \quad (2.50)$$

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma \cdot T}{k} \quad (2.51)$$

$$ZT_{TEG} = \frac{L}{(L + 2\sigma\rho_a)} \cdot ZT \quad (2.52)$$



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ZT เทียบกับอุณหภูมิของวัสดุ TEG แต่ละชนิด [40]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลิตมาจากบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) สำหรับสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี และชนิดเอ็นนั้น ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในบริเวณนี้ เนื่องจาก ความเหมาะสมในการใช้งานช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า $150\text{ }^{\circ}C$ ซึ่งคุณสมบัติของ TEG ในรูปของฟังก์ชันพหุนาม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิได้ถูกนำมาอธิบายประสิทธิภาพของ TEG แสดงสมการในรูปทั่วไปของฟังก์ชัน พหุนาม แสดงดังสมการที่ 2.53 และตารางที่ 2.3 แสดงสัมประสิทธิ์หน้าแต่ละพจน์ของฟังก์ชันพหุนาม สำหรับการคำนวณคุณสมบัติ

$$f(T) = aT^2 + bT + c \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณคุณสมบัติของบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) [41]

คุณสมบัติของวัสดุ	ชนิดของสารกึ่งตัวนำ	สัมประสิทธิ์หน้าแต่ละพจน์ของฟังก์ชันพหุนาม		
		T^2	T^1	T^0
ค่าการนำความร้อน (k , W/m•K)	ชนิดพี	3.61558×10^{-5}	-0.02635	6.22162
	ชนิดเอ็น	3.34545×10^{-5}	-0.0233	5.60633
สภาพการนำไฟฟ้า (κ , $\times 10^2$ S/m)	ชนิดพี	1.56017×10^{-2}	-15.70805	4466.38095
	ชนิดเอ็น	1.05714×10^{-2}	-10.16048	3113.71423
สัมประสิทธิ์ซีเบค (α , $\times 10^{-6}$ V/K)	ชนิดพี	-3.63810×10^{-3}	2.74381	-296.21429
	ชนิดเอ็น	1.53073×10^{-3}	-1.08059	-28.33810

Gao และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษา และประเมินผลความสามารถภายในระบบโซลาร์เซลล์ (Photovoltaic: PV) และ TEG ร่วมกับ PCMs ภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Transient condition) และสภาวะความเข้มของแสงไม่เท่ากัน (Non-uniform radiation condition) โดยทำการศึกษาอิทธิพลจากความสูงของ PCMs ชนิด Rubitherm 28HC และตำแหน่งการแทรกของ PCMs ระหว่างบริเวณด้านเย็นของ TEG และบริเวณระหว่าง PV กับ TEG ผลที่ได้จากการศึกษาโดยการแบ่งแบบจำลองออกเป็นโครงตาข่าย (Mesh) พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ PV จะลดลงเมื่อความหนาของ PCMs เพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดของ PV เท่ากับ 343 K เมื่อความหนาของ PCMs เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และผลต่างอุณหภูมิระหว่างบริเวณด้านร้อน และด้านเย็นของ TEG จะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาดำเนินไป ในด้านของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ PV จะพบได้ว่าค่าเริ่มมีการลดลง เมื่อระยะเวลาดำเนินไป และสมรรถภาพทางไฟฟ้าของ PV จะสามารถทำให้สูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มความหนาของ PCMs และเมื่อพิจารณาผลของตำแหน่งการแทรกของ PCMs ระหว่างกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นบริเวณด้านเย็นของ TEG และกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นบริเวณระหว่าง PV กับ TEG จะพบว่ากรณีที่ 2 มีการผันแปรของอุณหภูมิบริเวณเซลล์น้อยกว่ากรณีที่ 1 และอุณหภูมิเฉลี่ยของเซลล์ในกรณีที่ 2 จะมีค่าต่ำกว่า 320 K ในขณะที่กรณีที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ 337.5 K นอกจากนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณด้านร้อน และด้านเย็นของ TEG ของกรณีที่ 2 จะมีความเสถียรมากกว่ากรณีที่ 1 ปรากฏการณ์นี้สามารถนำมาประกอบกับข้อเท็จจริงว่าเมื่อ PCMs ถูกแทรกระหว่าง PV กับ TEG จะพบว่า PCMs สามารถกักเก็บพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง และบรรเทาผลกระทบจากความผันผวนของความเข้มแสงอาทิตย์ รวมไปถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก PV ในกรณีที่ 2 จะสูงกว่ากรณีที่ 1 ในขณะที่ความสามารถในการแปลงพลังงานไฟฟ้าในกรณีที่ 2 จะมีแนวโน้มลดลงน้อยกว่ากรณีที่ 1 เนื่องจากตำแหน่งการจัดวางในกรณีที่ 1 จะทำให้ TEG กีดขวางการนำความร้อนจาก PV ไปยัง PCMs จึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเซลล์เพิ่มสูงขึ้น [41]

Selvam และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาเชิงคำนวณในการจัดการความร้อนของ TEG ร่วมกับ PCMs ซึ่งได้พัฒนาแบบจำลองผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics สำหรับการจัดการความร้อน โดยอาศัยแผนกระจายความร้อนร่วมกับ PCMs ชนิด OM32 ผ่านการแปรผันของปริมาณความร้อนขาเข้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ 0.1 วัตต์ถึง 0.2 วัตต์ และปริมาณของ PCMs ซึ่งมีความสูงตั้งแต่ 0.75 มิลลิเมตรถึง 3 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณความร้อนเข้าเท่ากับ 0.2 วัตต์ การใช้ PCMs ซึ่งมีความสูงเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร จะสามารถทำให้อุณหภูมิบริเวณด้านเย็นของ TEG คงที่ได้เป็นเวลา 28 วินาที ในขณะที่การใช้ PCMs ซึ่งมีความสูงเท่ากับ 3 มิลลิเมตร จะสามารถทำให้อุณหภูมิบริเวณด้านเย็นของ TEG คงที่ได้เป็นเวลา 40 วินาที และความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณด้านร้อน และด้านเย็นของ TEG ระหว่างช่วงการเปลี่ยนวัฏภาคของ PCMs จะมีค่าสูงกว่าช่วงภายหลังการเปลี่ยนวัฏภาค นอกจากนี้เมื่อ PCMs ละลายทั้งหมด ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณด้านร้อน และด้านเย็นของ TEG มีความใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีการใช้ PCMs และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของ TEG ณ เวลา 23 วินาที สำหรับกรณีการใช้ PCMs ซึ่งมีความสูงเท่ากับ 3 มิลลิเมตร จะทำให้ประสิทธิภาพของ TEG เพิ่มขึ้น 30.0%, 33.8% และ 36.7% สำหรับปริมาณความร้อนเข้าเท่ากับ 0.10 วัตต์, 0.15 วัตต์ และ 0.20 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้ PCMs [42]

Yu และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟสเชิงประกอบ (Composite Phase Change Materials: CPCMs) ภายในระบบเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งอาศัยโพรแกรไฟต์ (Graphite foam: GF) เป็นวัสดุรองรับ พร้อมกับบรรจุลงในฟอยล์อะลูมิเนียม เพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยวางลงบนบริเวณด้านร้อนของ TEG เพื่อรับความร้อนจากฮีตเตอร์ ซึ่งให้ความร้อนปริมาณ 200 วัตต์ รวมถึงการควบคุมอุณหภูมิ และอาศัยน้ำในการหล่อเย็นบริเวณด้านเย็นของ TEG เพื่อควบคุมให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวยังคงที่ ซึ่งจะทำการศึกษาโดยการเลือกใช้น้ำตาลอิริทริทอล ($C_4H_{10}O_4$: ET) เป็น PCMs ผสมกับ GF ซึ่งมีค่าการนำความร้อนตั้งแต่ 50 W/m·K ถึง 200 W/m·K และความพรุนตั้งแต่ 0.8 ถึง 0.95 ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าเมื่อ CPCMs มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 200 W/m·K จะส่งผลทำให้ TEG มีอุณหภูมิสูงเกิน 100 °C อย่างรวดเร็ว จนนำไปสู่การเกิดความร้อนสูงเกินไป (Overheating) ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าสามารถเพิ่มสูงขึ้นได้มากถึง 69.27% อย่างไรก็ตามเมื่อ CPCMs มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 150 W/m·K และ 200 W/m·K จะทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปที่เวลา 44 และ 54 วินาที ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อ CPCMs มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 100 W/m·K จะทำให้ TEG ได้รับการปกป้องระหว่างรอบการใช้งาน และพลังงานไฟฟ้าได้ถูกผลิตขึ้นภายในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้การเพิ่มค่าการนำความร้อนทำให้ CPCMs ละลายได้อย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าจะเริ่มลดลง และเมื่อพิจารณาผลของความพรุนของ GF ต่ออัตราการหลอมเหลวพบว่าอัตราการหลอมเหลวเข้าใกล้ 100% เมื่อความพรุนเท่ากับ 0.9 และสภาวะการหลอมเหลวจะยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ เมื่อความพรุนมากกว่า 0.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความพรุนของ GF เพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาในการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อความพรุนลดลงจะทำให้ค่าการนำความร้อนรวม และพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดความพรุนลงจาก 0.95 เป็น 0.8 จะทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมากถึง 114% แต่ยังคงการเกิดความร้อนสูงเกินไปขึ้นที่เวลา 79 วินาที ในขณะที่เมื่อ CPCMs มีความพรุนเท่ากับ 0.9 จะทำให้ TEG ได้รับการปกป้องระหว่างรอบการใช้งานเช่นกัน [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Li และคณะ (2023) ได้ทำการศึกษาการทำความเย็นแบบพาสซีฟ การกักเก็บความร้อน และการผลิตพลังงานของ TEG ผ่าน PCMs ชนิดพาราฟินที่ได้รับการฝังตัวลงบนโพลีโพรพิลีน ร่วมกับการใช้ท่อความร้อนช่วย (Heat pipe: HP) โดยการนำ CPCMs บรรจุลงในกล่องอะคริลิก แล้วจึงนำไปติดกับพื้นผิวทองแดง และฮีตเตอร์แบบฟิล์ม รวมไปถึงการเพิ่มท่อความร้อนแบบบริเวณด้านล่าง เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปยัง TEG ที่มีการติดตั้งบล็อกน้ำ เพื่อให้ น้ำเกิดการไหลเวียนบริเวณด้านเย็นของ TEG ซึ่งการศึกษานี้จะพิจารณาผลจากการเลือกใช้โพลีโพรพิลีน การเลือกใช้ท่อความร้อน ความพรุนภายในโพลีโพรพิลีนในการเปลี่ยนวัฏภาค และการเลือกใช้ระบบระบายความร้อน ผลที่ได้จากการศึกษาในส่วนแรกพบว่า การเลือกใช้โพลีโพรพิลีนเพียงอย่างเดียวจะทำให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนเพิ่มสูงสุดถึง 85 °C ที่เวลา 50 นาที และจะเริ่มคงตัว ในขณะที่ CPCMs จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ช้ากว่า และภายในกระบวนการทำความเย็นพบว่า การใช้โพลีโพรพิลีนเพียงอย่างเดียว จะใช้เวลาที่น้อยกว่าในการทำให้อุณหภูมิลดลงไปยังอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และสามารถผลิตความต่างศักย์ และกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า การใช้ CPCMs สำหรับการเลือกใช้ CPCMs เปรียบเทียบกับการใช้พาราฟินบริสุทธิ์ จะพบว่าแหล่งความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่วง 15 นาทีแรก และยังคงอยู่ในวัฏภาคของแข็ง ในขณะที่ การใช้ CPCMs จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะพบได้ว่า PCMs บริสุทธิ์จะมีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย และเริ่มคงที่ ในขณะที่ CPCMs จะยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้มากกว่าประมาณ 10 °C เมื่อพิจารณาผลของการใช้ HP จะพบว่า การใช้ CPCMs ที่ไม่มีการใช้ HP จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 43 °C ในช่วงเวลา 20 นาที และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ที่ 47 °C ทั้งนี้ การใช้ HP ร่วมกับ CPCMs จะมีผลดีในการควบคุมอุณหภูมิ และในช่วงของการเย็นตัวพบว่า การใช้ HP จะใช้เวลาในการทำให้อุณหภูมิลดลงไปยังอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า ในด้านการผลิตความต่างศักย์ และกำลังไฟฟ้าพบว่า การไม่ใช้ HP จะทำให้ผลิตได้มากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่สูงกว่า และหากพิจารณาผลของความพรุนภายในโพลีโพรพิลีน โดยการใช้ CPCMs ที่มีความพรุนเท่ากับ 0.82 และ 0.96 จะพบว่าในช่วง 20 นาทีแรกนั้น จะมีอุณหภูมิด้านร้อนของ HP ที่เพิ่มขึ้นอย่างควบคุมกันไป โดยการถ่ายเทความร้อนในช่วงแรกจะขึ้นอยู่กับกระแสวิกฤตของสารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นหลัก หลังจากนั้น CPCMs ที่มีความพรุนเท่ากับ 0.96 จะมีอุณหภูมิด้านร้อนของ HP และ TEG ต่ำกว่า CPCMs ที่มีความพรุนเท่ากับ 0.82 ภายหลังจากหลอมเหลวพบว่า CPCMs ที่มีความพรุนเท่ากับ 0.96 จะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการผลิตความต่างศักย์ และกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจาก CPCMs ที่มีความพรุนเท่ากับ 0.96 จะมีค่ามากกว่า CPCMs ที่มีความพรุนเท่ากับ 0.82 ในขณะที่ผลของอุณหภูมิในการเปลี่ยนวัฏภาค (Phase Change Temperature: PCT) โดยการใช้ CPCMs ที่มี PCT เท่ากับ 32.7, 49.4 และ 59.9 °C พบว่าตัวอย่างที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า จะทำให้บริเวณด้านร้อนของ TEG มีอุณหภูมิมากกว่าเช่นกัน เมื่อพิจารณาประวัติทางความร้อน (T-history) พบว่า ในกระบวนการทำความร้อนของ CPCMs ที่มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 32.7 °C จะมีความแตกต่างเล็กน้อย กล่าวคือการเพิ่มคุณสมบัติทางความร้อนส่งผลให้ CPCMs ที่มีจุดหลอมเหลวนำเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคได้เร็วกว่า ทำให้เกิดการหลอมเหลวทั้งหมด ในขณะที่ตัวอย่างอีกสองชนิดยังคงเกิดการหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงบางส่วน และในกระบวนการเย็นตัวจะพบว่าตัวอย่างที่มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ $32.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะใช้เวลาในการทำให้อุณหภูมิลดลงไปยังอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมากกว่า ในขณะที่ความต่างศักย์จะผลิตได้เพียง 15 mV เท่านั้น สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงการแข็งตัวของ CPCMs จะมีความแตกต่างกันไม่มากที่สุดท้ายเป็นผลของการทำความเย็นบริเวณด้านเย็นของ TEG ระหว่างการไหลเวียนของน้ำผ่านบล็อกน้ำที่อุณหภูมิ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และครีบริบายความร้อน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าการใช้ครีบริบายความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีอุณหภูมิ $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้น้ำไหลเวียน ในขณะที่การใช้ครีบริบายความร้อนส่งผลให้ใช้เวลามากกว่าในการทำให้อุณหภูมิลดลงไปยังอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และการใช้น้ำไหลเวียนสามารถทำให้บริเวณด้านเย็นของ TEG มีอุณหภูมิต่ำที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ รวมไปถึงผลต่างของอุณหภูมิจุดด้านร้อน และด้านเย็นของ TEG ที่มีค่ามากกว่าการใช้ครีบริบายความร้อน แต่จะแตกต่างกันไม่มากภายใต้กระบวนการเย็นตัว ส่งผลให้ความต่างศักย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าเช่นกัน รวมไปถึงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการใช้น้ำไหลเวียนมีค่าเท่ากับ 3.7 J ซึ่งมากกว่าการใช้ครีบริบายความร้อนประมาณ 3 เท่า ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการใช้ CPCMs ที่มีความพรุนสูง และจุดหลอมเหลวต่ำจะมีความเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่ำมากกว่า [44]

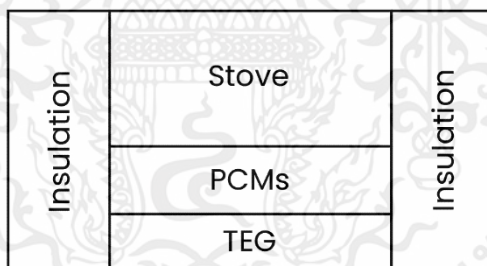
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก โดยศึกษาอิทธิพลของการเลือกใช้ชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟส ความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟส สำหรับการนำมาใช้ในการกักเก็บพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ รวมไปถึงการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบายความร้อนบริเวณด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

3.1 การออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

การออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งภายในปริญญานิพนธ์นี้ จะเลือกใช้เตาถ่านมาเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยการออกแบบเบื้องต้นจะแบ่งจำนวนชั้นแนวตั้งของอุปกรณ์ข้างต้นออกได้เป็น 3 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นเตาถ่าน ชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟส และชั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก และสามารถจำแนกชั้นของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นเตาเผา ซึ่งเป็นชั้นของอากาศ ชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟส และชั้นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และชั้นฉนวนความร้อน ซึ่งเลือกใช้ใยหิน (Rockwool) เป็นฉนวนกันความร้อน เพื่อป้องกันความร้อนถ่ายเทออกไปยังบริเวณด้านข้างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง



รูปที่ 3.1 ชั้นของวัสดุภายในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง

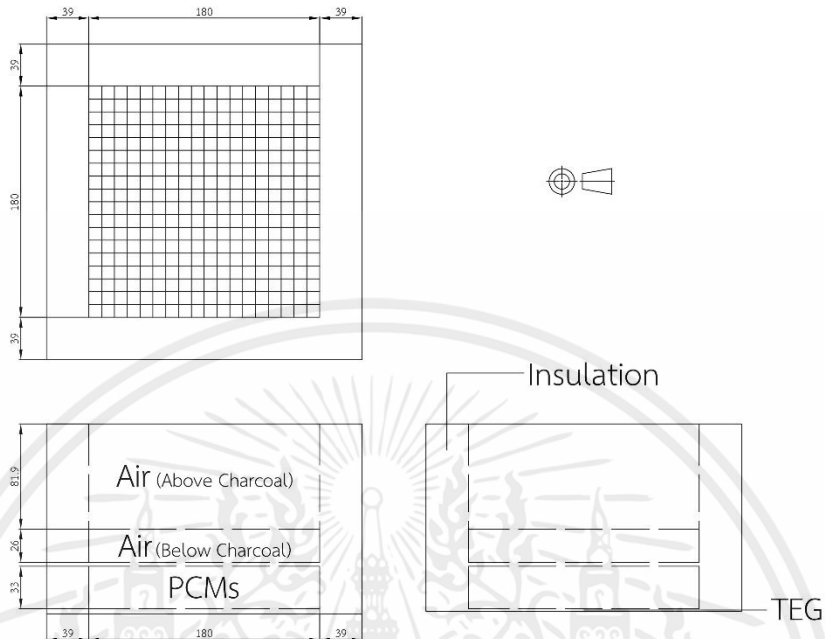
การคำนวณขนาดภายในแต่ละชั้นของวัสดุภายในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งจะคำนวณภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) การถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state)
- 2) การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ (One-dimensional heat transfer) จากบนลงล่าง
- 3) ไม่คิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer is negligible.)
- 4) อากาศมีพฤติกรรมเป็นแก๊สอุดมคติ (Air is an ideal gas.)

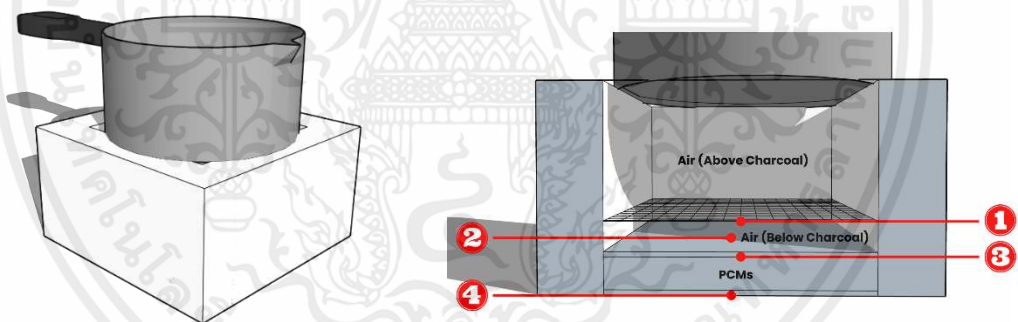
การคำนวณความกว้าง ความยาว และความสูงของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งภายในแต่ละชั้นจะแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก. และสามารถกำหนดลักษณะ รวมไปถึงขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นภาพฉายมุมที่สาม (Third Angle Projection) ของอุปกรณ์ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 แสดงถึงภาพสามมิติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ยังไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง ซึ่งถูกกำหนดไว้ ณ บริเวณแต่ละตำแหน่งเพื่อวัดค่าของข้อมูลที่เกี่ยวข้อง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ภาพฉายมุมที่สาม (Third Angle Projection) ของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.3 ภาพสามมิติอย่างง่ายของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ยังไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

จุด	ตำแหน่งการวัด	ค่าของข้อมูลที่วัด
1	รูรั้งฝั่งสำหรับรองถ่าน	อุณหภูมิถ่าน
2	รอยต่อระหว่างชั้นอากาศ และ SS304	อุณหภูมิก่อนการนำความร้อนภายในวัสดุที่เป็นของแข็ง
3	รอยต่อระหว่างฝาปิดกล่อง PCMs และ PCMs	อุณหภูมิบริเวณพื้นผิวด้านบน PCMs
4	ฐานกล่อง PCMs	อุณหภูมิบริเวณพื้นผิวด้านล่าง PCMs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

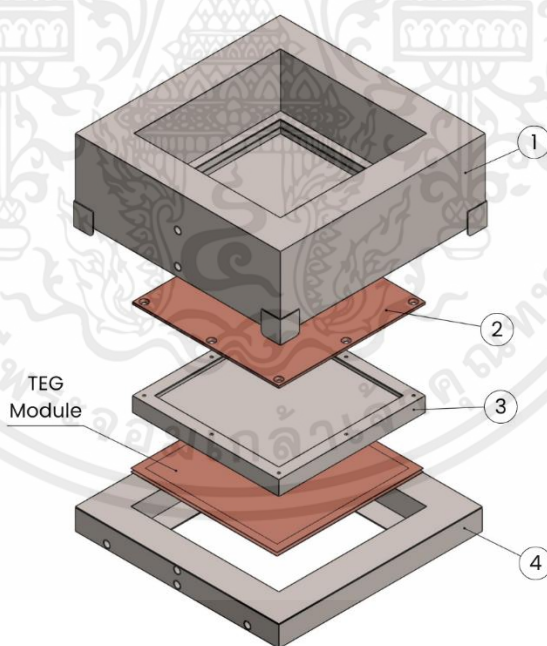
อุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งภายหลังได้รับการออกแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงถึงภาพสามมิติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีลักษณะการจัดวางของอุปกรณ์อยู่ในแนวตั้ง เพื่อใช้สำหรับการกักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง และมีการติดตั้งโยหินซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังด้านข้างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานออกไปยังสิ่งแวดล้อมในด้านข้าง เพื่อให้สมมติฐานในส่วนของ การถ่ายเทความร้อนภายในแนว 1 มิติ ยังคงสามารถใช้ในการคำนวณ และการทดลอง สำหรับภาพถ่าย และการกำหนดขนาดของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานอย่างละเอียดนั้น สามารถแสดงได้ภายในภาคผนวก ข. โดยอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งประกอบด้วย ส่วนประกอบ ดังนี้

หมายเลข 1 คือเตาเผาสำหรับการเผาไหม้ ภายในมีชั้นคั่นสำหรับการวางตะแกรง เพื่อใช้รองรับ ถ่านกะลามะพร้าวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งมีการติดตั้งฉนวนความร้อนภายในอุปกรณ์

หมายเลข 2 คือแผ่นทองแดงสำหรับปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส

หมายเลข 3 คือกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ซึ่งประกอบไปด้วยกล่องบรรจุซึ่งมีความสูงแตกต่างกัน จำนวน 3 กล่อง ได้แก่ 20 มิลลิเมตร, 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร

หมายเลข 4 คือโครงอุปกรณ์สำหรับบรรจุกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสในช่วงระหว่างการเผาไหม้ และการคายความร้อน ซึ่งมีการติดตั้งฉนวนความร้อนภายในอุปกรณ์



รูปที่ 3.4 ภาพสามมิติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง

3.2 การศึกษาชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการกักเก็บพลังงาน

3.2.1 สารเคมี

- 1) ซึ่ผึ้งพาราฟิน C100PW
- 2) โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต ($\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$: SAT)
- 3) น้ำตาลอิริทริทอล ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_4$: ET)
- 4) น้ำ
- 5) น้ำมันพืช

3.2.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 2) หลอดทดลอง
- 3) ปีกเกอร์
- 4) ภาชนะบรรจุน้ำ และน้ำมัน
- 5) เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อนแบบดิจิตอล
- 6) แท่งแม่เหล็กกวนสาร พร้อมด้วยแท่งดูดแม่เหล็ก
- 7) เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล
- 8) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ พร้อมด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K
- 9) สแตน พร้อมด้วยฐานเหล็ก และที่จับหลอดทดลอง
- 10) ตะแกรงใส่หลอดทดลอง
- 11) แท่งแก้วคนสาร
- 12) ไม้บรรทัด

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ชั่งวัสดุเปลี่ยนเฟสตัวอย่างชนิดละ 5 กรัม ลงในหลอดทดลอง
- 2) ตั้งค่าอุณหภูมิน้ำมันปริมาณ 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 140 °C และน้ำสำหรับหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 30 °C โดยนำแท่งแม่เหล็กกวนสารลงไปภายในอ่างน้ำมัน จากนั้นจึงเปิดเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อนแบบดิจิตอลที่มีความเร็วรอบให้มีค่าเท่ากับ 750 รอบต่อนาที และ 500 รอบต่อนาที ตามลำดับ เพื่อให้อุณหภูมิของสารเกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงทั้งหมด
- 3) นำหลอดทดลอง ซึ่งบรรจุซึ่ผึ้งพาราฟิน C100PW, โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต และน้ำตาลอิริทริทอลไปละลายภายในอ่างที่บรรจุน้ำมันในข้อ 2) จนกระทั่งสารตัวอย่างละลายทั้งหมด จากนั้นจึงวัดความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะของเหลวภายในหลอดทดลอง
- 4) นำหลอดทดลองไปทำให้เย็นตัวลงภายในอ่างน้ำหล่อเย็น จนกระทั่งสารตัวอย่างเกิดการแข็งตัว จากนั้นวัดความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะของแข็งอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง เพื่อหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตร
- 6) นำหลอดทดลองไปละลายภายในอ่างที่บรรจุน้ำมันในข้อ 2) อีกครั้ง เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยจดบันทึกอุณหภูมิของสารตัวอย่างทุก 1 นาที จนกระทั่งสารตัวอย่างละลายทั้งหมด
- 7) นำหลอดทดลองออกจากอ่างน้ำมัน เพื่อนำไปทำให้เย็นตัวลงในอ่างน้ำหล่อเย็น โดยจดบันทึกอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไปของสารตัวอย่างทุก 1 นาที จนกระทั่งสารตัวอย่างเกิดการแข็งตัวอีกครั้ง
- 8) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้งต่อวัสดุเปลี่ยนเฟส 1 ชนิด
- 9) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาที่เปลี่ยนไปของสารตัวอย่าง และคำนวณร้อยละของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

3.3 การศึกษาความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟส และอุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

3.3.1 สารเคมี

- 1) วัสดุเปลี่ยนเฟสที่ได้จากการคัดเลือกผ่านคุณสมบัติร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในหัวข้อ 3.2

3.3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น SP1848-27145 พร้อมด้วยแผ่นทองแดง
- 3) มัลติมิเตอร์ พร้อมด้วยปากจระเข้สำหรับหนีบสายไฟ
- 4) อุปกรณ์จุดไฟ
- 5) แอลกอฮอล์แข็งชนิดก้อน
- 6) ที่คีบสแตนเลส
- 7) ถังมือกันความร้อน
- 8) เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล
- 9) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ พร้อมด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K
- 10) เตาถ่านสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า
- 11) ถ่านกะลามะพร้าว
- 12) ครีบระบายความร้อน

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์เตาถ่านสำหรับการกักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง ซึ่งในส่วนของ การกักเก็บพลังงานโดยใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสนั้น จะสามารถบรรจุเข้า และนำออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) บรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสลงในกล่องบรรจุแต่ละขนาด โดยความหนาที่ใช้สำหรับการศึกษาคือ 20 มิลลิเมตร, 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร แล้วนำกล่องบรรจุกลับเข้าไปติดตั้งยังเตาถ่าน
- 3) นำมัลติมิเตอร์ต่อเข้ากับ TEG
- 4) นำเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลวัดค่าบริเวณแผ่นด้านเย็นของ TEG
- 5) นำถ่านกะลามะพร้าวปริมาณ 300 กรัม บรรจุลงในเตาถ่าน และให้ความร้อน
- 6) จดบันทึกอุณหภูมิบริเวณถ่านกะลามะพร้าว เหนือแผ่นทองแดงด้านบน แผ่นทองแดงด้านบนที่ใช้สำหรับการปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส และด้านล่างของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ซึ่งแสดงตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิดังรูปที่ 3.3 โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 1 นาที จนกระทั่งครบ 30 นาที แล้วนำถ่านออก
- 7) วางกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสไว้จนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณฐานกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสหรือตำแหน่งที่ 4 ดังรูปที่ 3.3 มีค่าเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อนสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ ขณะเดียวกันให้จดบันทึกอุณหภูมิบริเวณแผ่นทองแดงด้านบนที่ใช้สำหรับการปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส และด้านล่างของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ทุก 1 นาที
- 8) นำกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสวางลงบนบริเวณแผ่นด้านร้อนของ TEG จดบันทึกอุณหภูมิบริเวณแผ่นทองแดงด้านบนที่ใช้สำหรับการปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ด้านล่างของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ซึ่งแสดงตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิดังรูปที่ 3.3 และบริเวณแผ่นด้านเย็นของ TEG พร้อมบันทึกความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าจาก TEG ทุก 1 นาที จนกระทั่งครบ 60 นาที
- 9) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำกับความหนาอื่น
- 10) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก TEG จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกำลังไฟฟ้า เมื่อเวลาทดลองเปลี่ยนแปลงไป สำหรับความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละขนาด
- 11) เมื่อได้ความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่เหมาะสมแล้ว นำวัสดุเปลี่ยนเฟสบรรจุให้เต็มพอดีกับกล่องบรรจุ โดยคำนึงถึงร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตร แล้วนำกล่องบรรจุกลับเข้าไปยังเตาถ่าน
- 12) ติดตั้งครีบบระบายความร้อนบริเวณแผ่นด้านเย็นของ TEG
- 13) นำมัลติมิเตอร์ต่อเข้าด้วยกันกับ TEG
- 14) นำเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลไปวัดค่าบริเวณแผ่นด้านเย็นของ TEG
- 15) นำถ่านกะลามะพร้าวปริมาณ 300 กรัม บรรจุลงในเตาถ่าน แล้วให้ความร้อน
- 16) จดบันทึกอุณหภูมิบริเวณถ่านกะลามะพร้าว เหนือแผ่นทองแดงด้านบน แผ่นทองแดงด้านบนที่ใช้สำหรับการปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส และด้านล่างของกล่องบรรจุวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปลี่ยนเฟส แสดงตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิดังรูปที่ 3.3 โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 1 นาที จนกระทั่งครบ 30 นาที แล้วนำถ่านออก
- 17) วางกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสไว้จนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณฐานกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสหรือตำแหน่งที่ 4 ดังรูปที่ 3.3 มีค่าเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้ TEG มีอุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อนสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ ขณะเดียวกันให้จดบันทึกอุณหภูมิบริเวณแผ่นทองแดงด้านบนที่ใช้สำหรับการปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส และด้านล่างของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส แสดงตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิดังรูปที่ 3.3 โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 1 นาที
- 18) นำกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสวางลงบนบริเวณแผ่นด้านร้อนของ TEG จดบันทึกอุณหภูมิจากบริเวณแผ่นทองแดงด้านบนที่ใช้สำหรับการปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ด้านล่างของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ซึ่งแสดงตำแหน่งในการบันทึกอุณหภูมิดังรูปที่ 3.3 และบริเวณแผ่นด้านเย็นของ TEG พร้อมบันทึกความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าจาก TEG ทุก 1 นาที จนกระทั่งครบ 60 นาที
- 19) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
- 20) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก TEG จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกำลังไฟฟ้า เมื่อเวลาทดลองเปลี่ยนแปลงไป

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

การออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยอาศัยวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจะอาศัยสมการการนำความร้อน ซึ่งอาศัยสมมติฐานของการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว และการถ่ายเทความร้อนภายในแนว 1 มิติ ทั้งนี้การนำวัสดุเปลี่ยนเฟสมาใช้สำหรับการกักเก็บพลังงานภายในอุปกรณ์ จะพิจารณาชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่มีจุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว อุณหภูมิที่เกิดการตกผลึก ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อเกิดการเปลี่ยนวัฏภาค และราคาที่เหมาะสมสำหรับการกักเก็บพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่าน และเมื่อบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสที่มีความเหมาะสมลงในกล่องสำหรับบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสข้างต้นเรียบร้อยแล้ว จึงนำอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วมาทำการทดลอง เพื่อทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยความหนาที่เหมาะสมสำหรับชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่นำมาเลือกใช้ โดยทดสอบที่ความหนาแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ระยะเวลานาน และปริมาณมากที่สุด และอุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนบริเวณแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อศึกษาผลต่างของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นการไม่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน และการติดตั้งครีระบายความร้อน

4.1 ชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการกักเก็บพลังงาน

การเลือกวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการกักเก็บพลังงานสำหรับแหล่งกักเก็บพลังงานความร้อนแฝงนั้น จะพิจารณาจากคุณสมบัติที่เหมาะสม ซึ่งประกอบไปด้วยจุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว อุณหภูมิที่เกิดการตกผลึก ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อเกิดการเปลี่ยนวัฏภาค และราคา แต่ยังคงมีจุดหลอมเหลวที่มีความเหมาะสม สามารถนำมาใช้งานกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยคุณสมบัติที่พิจารณานั้น ประกอบไปด้วยคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

4.1.1 จุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และอุณหภูมิที่เกิดการตกผลึก

คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนเฟสในด้านจุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และอุณหภูมิที่เกิดการตกผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่ทำการศึกษาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ซึ่ผึ้งพาราฟิน C100PW, โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต และน้ำตาลอิทริทอล แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าซึ่ผึ้งพาราฟิน C100PW และโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรตมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง เมื่อพิจารณาจากผลที่ได้จากการคำนวณในภาคผนวก ก. จะพบว่าน้ำตาลอิทริทอลมีช่วงจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง แต่ในการคำนวณจะคำนวณภายใต้สมมติฐานซึ่งไม่พิจารณาถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นสภาวะในการทดลองจริงอาจไม่เหมาะสมกับการนำน้ำตาลอิทริทอลมาใช้ในการกักเก็บพลังงาน เนื่องจากความร้อนบางส่วนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนออกไปด้วยการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งอาจจะทำให้อุณหภูมิบริเวณกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสน้อยกว่าจุดหลอมเหลวของน้ำตาลอิทริทอล หรืออาจทำให้หลอมเหลวได้เพียงบางส่วน

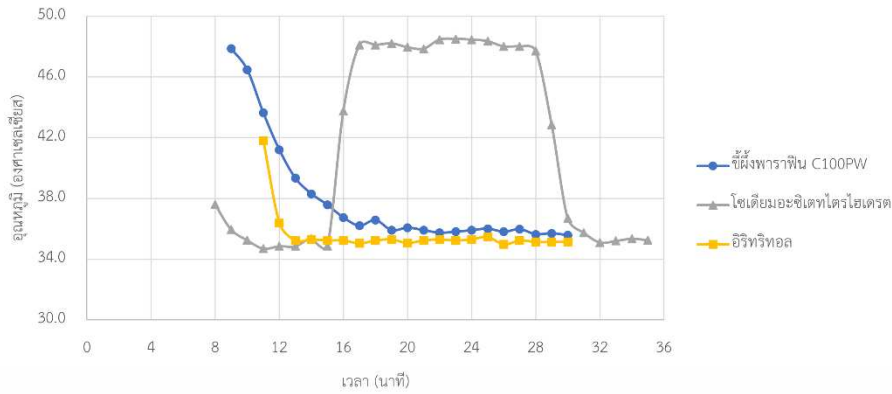
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 จุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และอุณหภูมิที่เกิดการตกผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละชนิด

วัสดุเปลี่ยนเฟส	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	อุณหภูมิที่เกิดการตกผลึก (°C)	อ้างอิง
ซีพิงพาราฟิน C100PW	48.0 - 68.0	209.0 - 269.0	48.62 ± 0.41	[45,46]
โซเดียมอะซิเตท ไตรไฮเดรต	58.0	264.0	-15	[47,48]
น้ำตาลอิริทริทอล	117.0 - 120.0	315.0 - 379.58	46.85 - 86.85	[49,50]

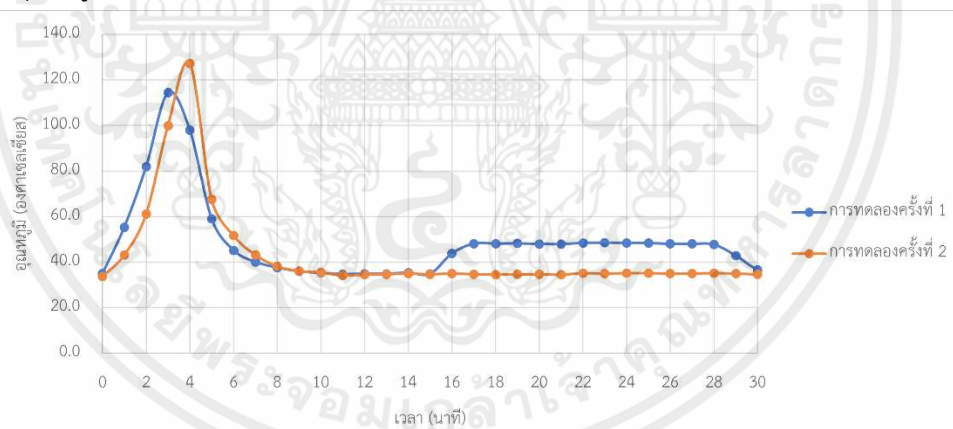
4.1.2 เส้นโค้งประวัติทางความร้อนสำหรับการเกิดผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟส

การศึกษาเส้นโค้งประวัติทางความร้อนสำหรับการเกิดผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่ทำการศึกษาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ซีพิงพาราฟิน C100PW, โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต และน้ำตาลอิริทริทอล เพื่อศึกษาลักษณะการคายพลังงาน เมื่อวัสดุเปลี่ยนเฟสเริ่มเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในวัสดุเปลี่ยนเฟส โดยการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสทั้ง 3 ชนิดข้างต้น เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง กลายเป็นของเหลว จากนั้นนำวัสดุเปลี่ยนเฟสแช่ลงในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพื่อให้วัสดุเปลี่ยนเฟสเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งอีกครั้ง และคายพลังงานความร้อน และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิกับเวลา เส้นโค้งประวัติทางความร้อนสำหรับการเกิดผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟสทั้ง 3 ชนิดแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าซีพิงพาราฟิน C100PW จะเริ่มเกิดการคายพลังงาน และเริ่มเกิดผลึกของแข็งที่เวลา 9 นาที ที่อุณหภูมิ 47.9 องศาเซลเซียส ในขณะที่โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรตจะเริ่มเกิดการคายพลังงาน และมีอุณหภูมิ 35.7 องศาเซลเซียส ที่เวลา 9 นาที เป็นต้นไป แต่เมื่อเวลา 15 นาที จะพบได้ว่าอุณหภูมิภายในโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรตนั้น จะเริ่มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากสารดังกล่าวได้รับการกระตุ้นขึ้นโดยการนำแท่งแก้วคนสารตกลงภายในหลอดทดลอง จึงทำให้สารดังกล่าวเกิดการคายพลังงานความร้อนออกมาอีกครั้ง เพื่อทำให้สถานะของสารเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวกลับมาเป็นของแข็ง จากนั้นอุณหภูมิของสารจึงลดลงอีกครั้ง ตั้งแต่เวลา 28 นาที เป็นต้นไป และน้ำตาลอิริทริทอลจะเริ่มเกิดการคายพลังงาน และเริ่มเกิดผลึกของแข็งขึ้นที่เวลา 11 นาที โดยอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการตกผลึก คือ 41.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 เส้นโค้งประวัติทางความร้อนสำหรับการเกิดผลึกของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละชนิด

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 ซึ่งจัดเป็นเส้นโค้งประวัติทางความร้อนในการทดลองของซิลิคอนอะซิเตทไตรไฮเดรตทั้ง 2 การทดลอง จะพบได้ว่าเมื่อทำการทดลองครั้งที่ 2 ทำให้พบได้ว่าการใช้ซิลิคอนอะซิเตทไตรไฮเดรตบริสุทธิ์สามารถทำให้สารได้รับการกระตุ้น จนกระทั่งทำให้สถานะของสารเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวกลับมาเป็นของแข็งได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น เนื่องมาจากสารข้างต้นที่เลือกใช้ในการทดลองจัดเป็นวัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทของแข็ง-ของเหลว ในรูปแบบของสารอนินทรีย์ ซึ่งสารมักจะเกิดสภาวะความเย็นยิ่งยวด ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิในการทำให้สารเกิดการแข็งตัวขึ้นได้นั้นจะต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าการทดลองครั้งแรก

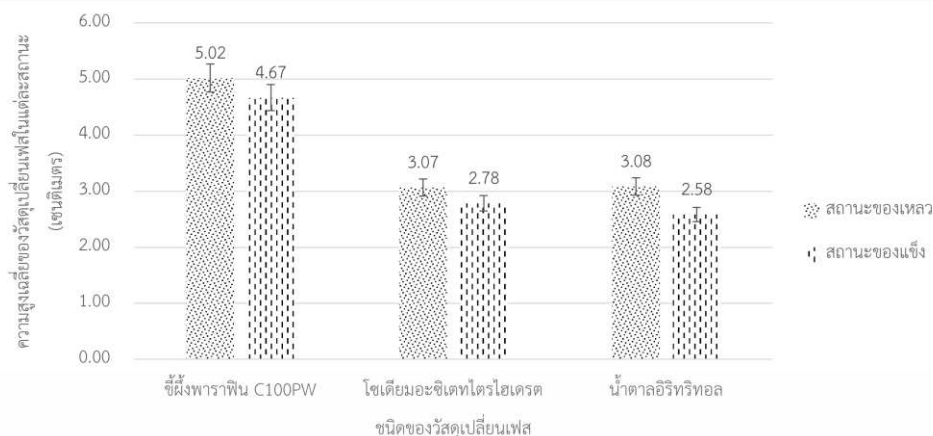


รูปที่ 4.2 เส้นโค้งประวัติทางความร้อนในการทดลองของซิลิคอนอะซิเตทไตรไฮเดรต

4.1.3 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุเปลี่ยนเฟส

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุเปลี่ยนเฟสระหว่างสารในสถานะของแข็ง และของเหลวของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่ทำการศึกษาทั้ง 3 ชนิดนั้น จะพิจารณาจากปริมาตรของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะของแข็ง และของเหลว แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มได้ว่าเมื่อวัสดุเปลี่ยนเฟสเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว วัสดุเปลี่ยนเฟสจะเกิดการขยายตัวมากขึ้น ในขณะที่เมื่อวัสดุเปลี่ยนเฟสเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับมาเป็นของแข็งอีกครั้ง จะทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสเกิดการหดตัวอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในแต่ละสถานะภายในหลอดทดลอง

เมื่อนำผลการทดลองข้างต้นที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละชนิด และนำค่าความหนาแน่นจำเพาะจากทฤษฎีแสดงดังตารางที่ 4.2 และการทดลองมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.3 จะพบว่าซีฟิ่งพาราฟิน C100PW จะมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนเฟสประเภทของแข็ง-ของเหลว ในรูปแบบของสารอินทรีย์

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นจำเพาะในสถานะของเหลว และของแข็งของวัสดุเปลี่ยนเฟส

วัสดุเปลี่ยนเฟส	ความหนาแน่นจำเพาะในสถานะของเหลว (m^3/g)	ความหนาแน่นจำเพาะในสถานะของแข็ง (m^3/g)	อ้างอิง
ซีฟิ่งพาราฟิน C100PW	1.212	1.111	[51]
โพลีเอทิลีนไตรไฮเดรต	0.781	0.690	[52]
น้ำตาลอิริทริทอล	0.769	0.676	[49]

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุเปลี่ยนเฟส

วัสดุเปลี่ยนเฟส	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรทางทฤษฎี	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการทดลอง	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
ซีฟิ่งพาราฟิน C100PW	9.09	7.50	17.50
โพลีเอทิลีนไตรไฮเดรต	13.28	10.18	23.35
น้ำตาลอิริทริทอล	13.85	19.35	39.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวสทหรบการรงงานเพอการศกษาแทนน น มอนุญาตหนาไปเชประยชนดานการคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ราคาของวัสดุเปลี่ยนเฟส

เมื่อพิจารณาจากความเหมาะสมในด้านต้นทุนของวัสดุเปลี่ยนเฟส เพื่อนำมาใช้สำหรับการกักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งซีฟิ่งพาราฟิน C100PW จะมีราคาต่อ 1 กิโลกรัมถูกที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุเปลี่ยนเฟสอีกสองชนิด

ตารางที่ 4.4 ราคาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อ 1 กิโลกรัม

วัสดุเปลี่ยนเฟส	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
ซีฟิ่งพาราฟิน C100PW	126.00
โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต	850.00
น้ำตาลอิริทริทอล	289.00

จากการศึกษาผลของชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการกักเก็บพลังงาน เพื่อนำมาใช้ทดสอบสำหรับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผา ทำให้เลือกใช้ซีฟิ่งพาราฟิน C100PW เป็นวัสดุเปลี่ยนเฟสที่ใช้สำหรับการทดลองต่อไป เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ใช้ในการบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสเพื่อใช้รับพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาถ่าน ไม่เกิดสภาวะความเย็นยิ่งยวด และเมื่อสารเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวแล้ว จะเกิดการขยายตัวซึ่งส่งผลให้ปริมาตรของสารมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และไม่เกิดการเดือดของสารที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาเกิดการถ่ายเทความร้อนลงมาบริเวณกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส เพื่อกักเก็บพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง เมื่อเทียบกับโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต จะพบได้ว่าในช่วงอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส จะมีการเดือดของสารเกิดขึ้น เนื่องจากจุดเดือดของสารมีค่าเท่ากับ 123 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.1 และน้ำตาลอิริทริทอลยังไม่เกิดการละลายกลายเป็นของเหลวทั้งหมดในระยะเวลาที่กำหนด และจากการศึกษาระยะเวลาในการคายพลังงานความร้อนพบว่า ซีฟิ่งพาราฟิน C100PW นั้นมีระยะเวลาในการคายพลังงานที่นานกว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอื่น ก่อนจะมีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิแวดล้อม นอกจากนี้ซีฟิ่งพาราฟิน C100PW ยังเป็นสารที่มีราคาไม่แพง

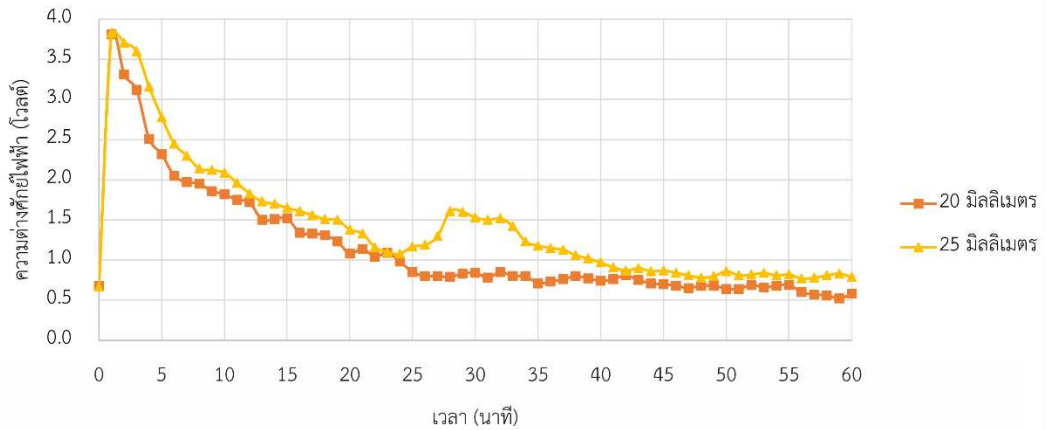
4.2 ความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

เมื่อนำซีฟิ่งพาราฟิน C100PW บรรจุภายในกล่องสแตนเลสที่มีความหนาของพาราฟินแตกต่างกัน จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 20 มิลลิเมตร, 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร จากการศึกษารายงานพบว่า ปริมาณซีฟิ่งพาราฟิน C100PW ที่ใช้ในการบรรจุลงภายในกล่องบรรจุจะค้ำึงถึงร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เพื่อนำร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรนั้น ไปใช้ในการคำนวณปริมาณสำหรับการบรรจุซีฟิ่งพาราฟิน C100PW เนื่องจากเมื่อสารได้รับความร้อนจากเตาถ่าน และอุณหภูมิของสารถึงจุดหลอมเหลว สารจะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ซึ่งสารจะเกิดการขยายตัวเชิงปริมาตรเช่นกัน เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการกักเก็บพลังงาน และการถ่ายเทความร้อน

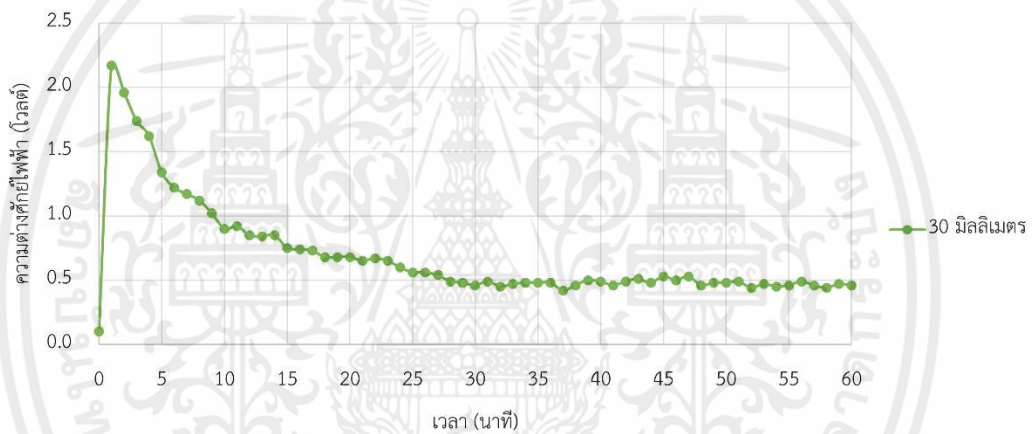
รวมไปถึงผลลัพธ์เมื่อนำเตาถ่านออกจากกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟส แล้วนำกล่องดังกล่าวไปวางลงบนอุปกรณ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก จะส่งผลต่อความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้ จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 ได้มีการกำหนดให้อุณหภูมิของซีมีงพาราฟิน C100PW ทั้ง 3 ขนาดมีอุณหภูมิขณะเริ่มนำไปวางลงบนแผ่นด้านร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถรับได้ โดยกล่องที่มีการบรรจุซีมีงพาราฟินลงภายในกล่องสแตนเลสสูง 25 มิลลิเมตร สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 3.83 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 122.10 มิลลิแอมแปร์ เมื่อเปรียบเทียบกับกล่องที่บรรจุซีมีงพาราฟินลงภายในกล่องสแตนเลสสูง 20 มิลลิเมตร สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 3.81 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 118.10 มิลลิแอมแปร์ และวัสดุเปลี่ยนเฟสที่บรรจุลงภายในกล่องสแตนเลสสูง 30 มิลลิเมตร สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 2.17 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 56.40 มิลลิแอมแปร์ โดยอุณหภูมิสูงสุดของการทดลองของกล่องสแตนเลสสูง 30 มิลลิเมตรเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส เนื่องจากการทดลองได้กำหนดให้ปริมาณของถ่านกะลามะพร้าวเท่ากับ 300 กรัม และทำการเผาไหม้เป็นระยะเวลา 30 นาที แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่ากล่องสแตนเลสสูง 30 มิลลิเมตร ไม่สามารถกักเก็บพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาถ่านจนทำให้อุณหภูมิ ณ จุดล่างสุดของกล่องบรรจุซีมีงพาราฟินเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสได้ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากซีมีงพาราฟินยังละลายไม่หมด ณ สภาวะข้างต้น และเมื่อเวลาผ่านไป จะพบว่าแนวโน้มของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้เริ่มลดลง โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ต่อเวลาสูง และเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อย่างไรก็ตามภายในช่วงนาที่ที่ 1 ของการทดลองจะพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตจากกรณีกล่องสแตนเลสสูง 30 มิลลิเมตรกลับมีค่าต่ำที่สุด และในช่วงนาที่ที่ 2 ของการทดลอง จะพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกรณีกล่องสแตนเลสสูง 30 มิลลิเมตร จะมีค่าสูงกว่ากรณีของกล่องสแตนเลสความสูงอื่น อย่างไรก็ตามความต่างศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ในช่วงนาที่ที่ 3 ของการทดลองจะเริ่มมีแนวโน้มของความต่างศักย์ไฟฟ้าเหมือนกับช่วงแรกของการทดลอง กล่าวคือวัสดุเปลี่ยนเฟสที่บรรจุลงภายในกล่องสแตนเลสสูง 25 มิลลิเมตรสามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากที่สุด รองลงมาเป็นกรณีกล่องสแตนเลสสูง 20 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตรตามลำดับ ทั้งนี้ความแตกต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น จะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น

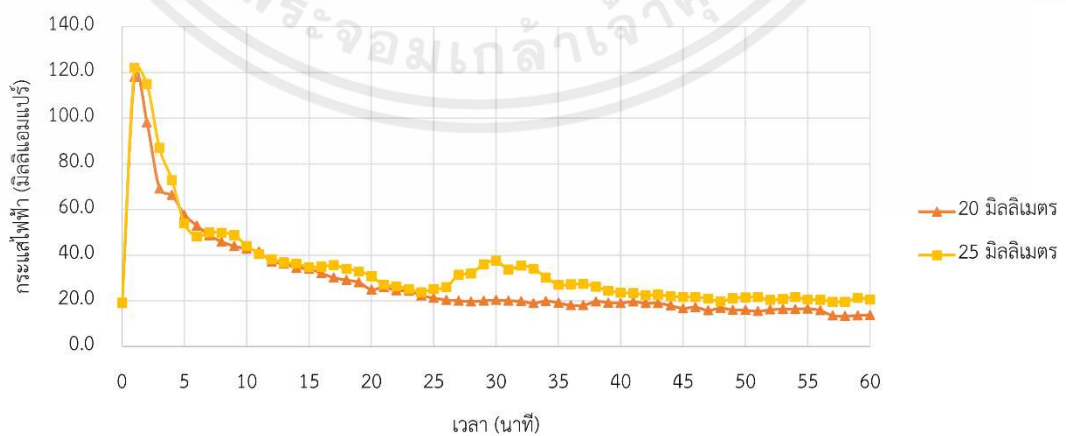
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกกรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที

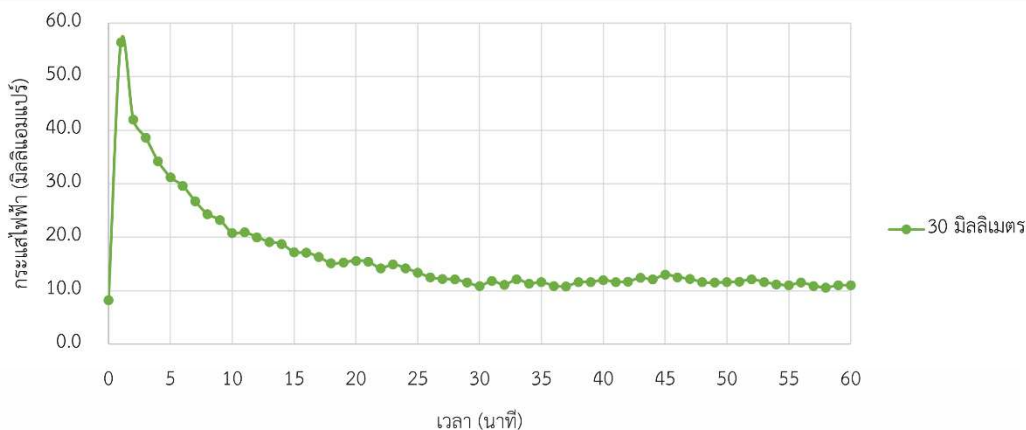


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกกรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 30 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที



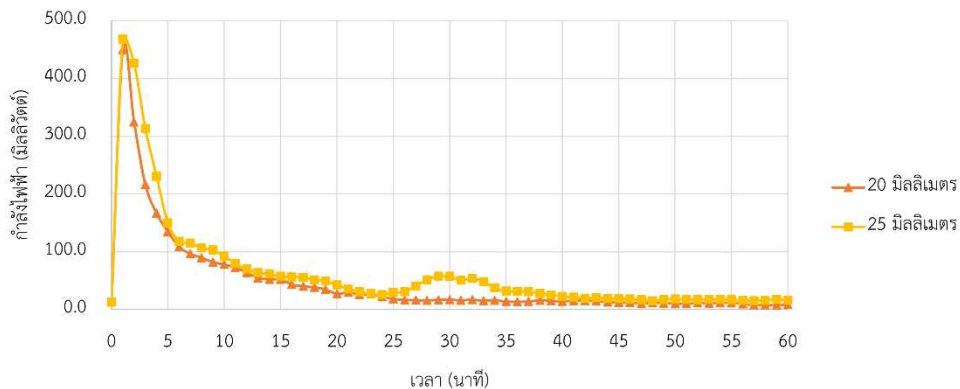
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกกรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

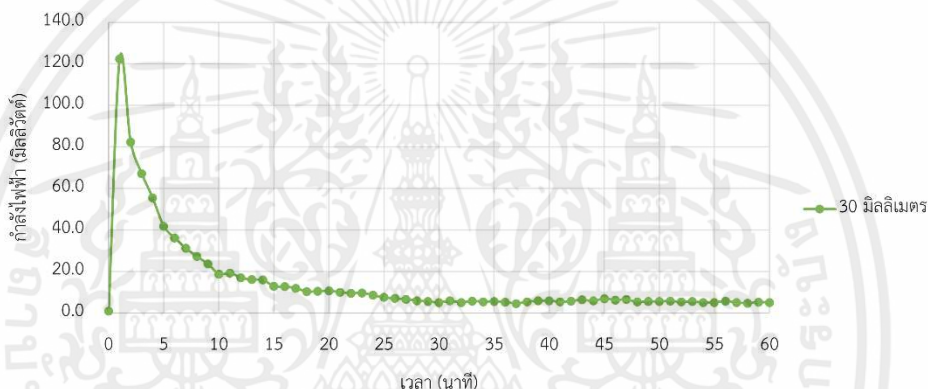


รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 30 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะพบว่ากรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสที่บรรจุลงในกล่องสแตนเลสสูง 25 มิลลิเมตร จะสามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 467.64 มิลลิวัตต์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกล่องสแตนเลสสูง 20 มิลลิเมตร จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้รองลงมาเท่ากับ 449.69 มิลลิวัตต์ และกรณีกล่องสแตนเลสสูง 30 มิลลิเมตร จะเป็นกรณีกล่องที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยที่สุดเท่ากับ 122.39 มิลลิวัตต์ เมื่อพิจารณาจากการศึกษาที่มีตัวแปรควบคุมเป็นการจำกัดระยะเวลาในการเผาไหม้ถ่านให้เท่ากันภายในการทดลองแต่ละครั้ง คือระยะเวลา 30 นาที และอุณหภูมิบริเวณด้านล่างของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ขณะเริ่มวางลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากกรณีกล่องสแตนเลสที่มีความสูงเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณการบรรจุที่น้อยที่สุด ทำให้สามารถกักเก็บพลังงานความร้อนได้น้อยกว่า และการถ่ายเทความร้อนหลังจากนำมาวางบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเกิดขึ้นได้อย่างเร็ว ส่งผลต่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตกคร่อมบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่ากรณีกล่องสแตนเลสที่มีความสูงเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และในกรณีกล่องสแตนเลสที่มีความสูงเท่ากับ 30 มิลลิเมตร พบว่าอุณหภูมิสุดท้ายก่อนนำมาวางลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณชีผึ้งพาราฟินที่มีการบรรจุมากที่สุด รวมถึงปริมาณของถ่านกะลามะพร้าว และระยะเวลาในการเผาไหม้ถ่านที่กำหนด ซึ่งไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของชีผึ้งพาราฟินที่บรรจุในกล่องสแตนเลสมีค่าเท่ากับกรณีกล่องสแตนเลสที่มีความสูงเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตรได้ ซึ่งส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตกคร่อมบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าน้อยที่สุด และทำให้ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยที่สุดใน 3 กรณี



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกกรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกกรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนา 30 มิลลิเมตร ในช่วง 60 นาที

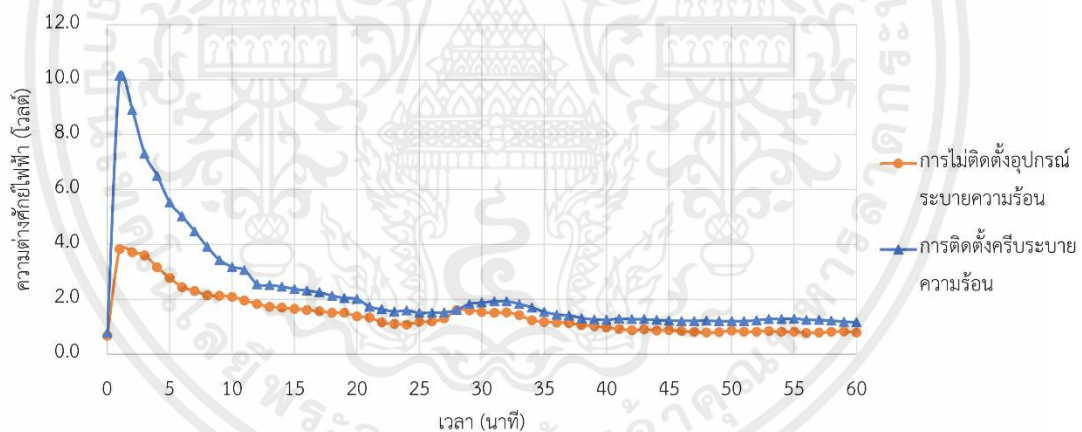
ผลที่ได้จากการศึกษาความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเลือกใช้ซีพิ้งพาราฟิน C100PW มาเป็นวัสดุเปลี่ยนเฟส สำหรับการกักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านภายในเตาถ่าน ทำให้ทราบว่า การเลือกใช้ซีพิ้งพาราฟินที่มีความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ส่งผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละกรณี

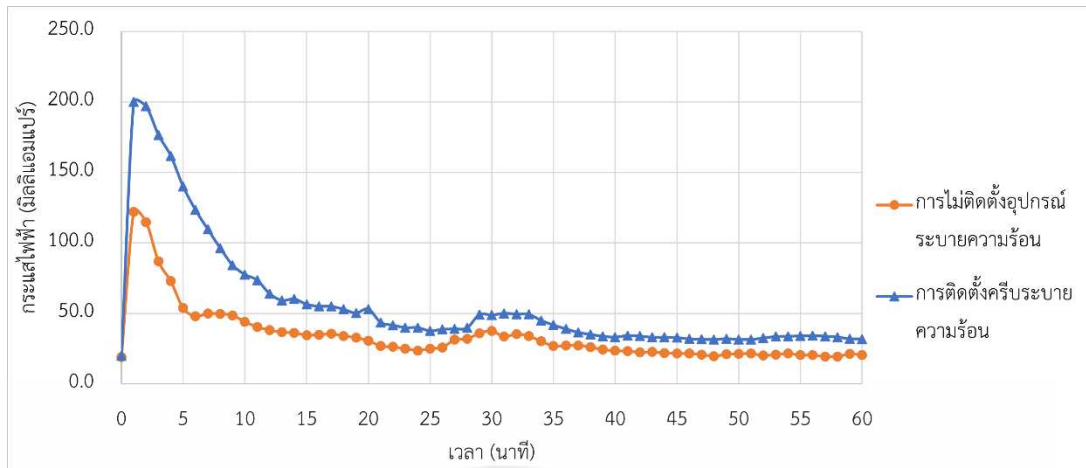
ความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟส (มิลลิเมตร)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)
20	3.81	118.10	449.96
25	3.83	122.10	467.64
30	2.17	56.40	122.39

4.3 อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

เมื่อทำการศึกษาผลของชนิดของวัสดุเปลี่ยนเฟส และความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้ว จะเลือกใช้ซีพียูพาราฟิน C100PW ที่มีความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร มาศึกษาต่อในส่วนของผลของอุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนต่อการผลิตไฟฟ้า โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการไม่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน และการติดตั้งครีระบายความร้อน ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างการไม่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน และการติดตั้งครีระบายความร้อน พบว่าในช่วงแรกขณะเริ่มวางกล่องสแตนเลสลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน จะสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ประมาณ 3.83 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าประมาณ 122.10 มิลลิแอมแปร์ ในขณะที่เริ่มวางกล่องสแตนเลสลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีการติดตั้งครีระบายความร้อน จะสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ประมาณ 10.14 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าประมาณ 200 มิลลิแอมแปร์ หลังจากนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทั้งสองกรณีจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แต่กรณีการติดตั้งครีระบายความร้อนจะยังคงสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากกว่า อย่างไรก็ตามผลต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้จากทั้งสองกรณี จะเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

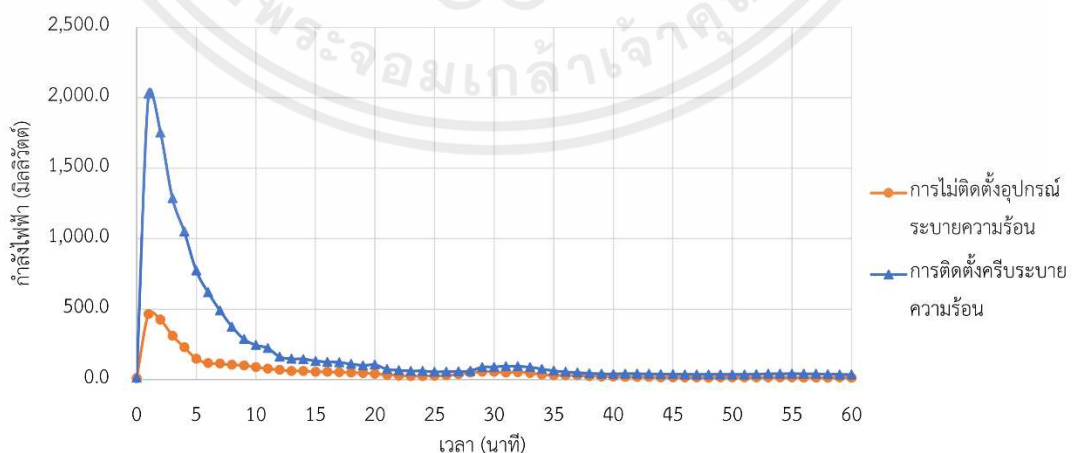


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อน ในช่วง 60 นาที



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อน ในช่วง 60 นาที

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนจากรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าระหว่างการไม่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน และการติดตั้งครีบบระบายความร้อน พบว่าในช่วงแรกขณะเริ่มวางกล่องสแตนด์เลสบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 467.64 มิลลิวัตต์ ในขณะที่เริ่มวางกล่องสแตนด์เลสบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีการติดตั้งครีบบระบายความร้อน จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 2,028.00 มิลลิวัตต์ หลังจากนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทั้งสองกรณีจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แต่กรณีการติดตั้งครีบบระบายความร้อนจะยังคงสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า อย่างไรก็ตามผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้จากทั้งสองกรณีจะเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และตารางที่ 4.6 แสดงถึงความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้ากรณีกล่องสแตนด์เลสที่มีความสูง 25 มิลลิเมตร ระหว่างการไม่มีอุปกรณ์ระบายความร้อน และการติดตั้งครีบบระบายความร้อน



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก กรณีการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อน ในช่วง 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีกล่องสแตนเลสที่มีความสูงเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ระหว่างการไม่มีอุปกรณ์ระบายความร้อน และการติดตั้งครีบบระบายความร้อน

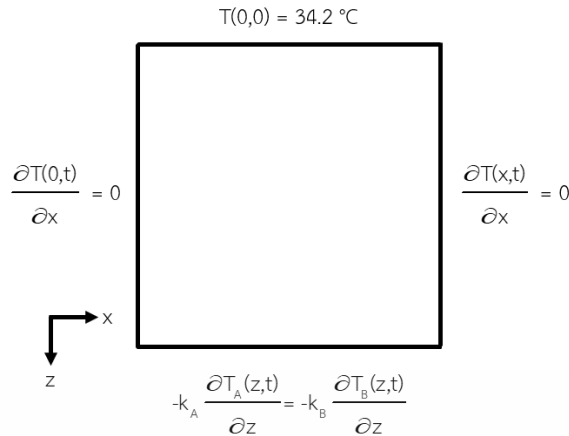
การติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)
ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน	3.81	118.10	449.96
การติดตั้งครีบบระบายความร้อน	10.14	200.00	2,028.00

ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าผลต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้จากทั้งสองกรณีจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป มีสาเหตุมาจากในช่วงแรกของการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น พบว่าความร้อนที่วัสดุเปลี่ยนเฟสเกิดการคายพลังงานออกมาจะสามารถระบายออกไปยังสิ่งแวดล้อมได้ดีมากขึ้นเมื่อมีการใช้ครีบบระบายความร้อน จึงช่วยทำให้ผลต่างระหว่างบริเวณแผ่นด้านร้อน และแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าลดลง เนื่องจากผลต่างระหว่างบริเวณแผ่นด้านร้อน และแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าน้อยลง แต่ในกรณีการติดตั้งครีบบระบายความร้อนจะยังคงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า ซึ่งมีสาเหตุจากการที่ครีบบระบายความร้อนไม่สามารถระบายความร้อนออกไปยังสิ่งแวดล้อมได้รวดเร็ว จึงส่งผลทำให้ความร้อนเกิดการสะสมอยู่บริเวณแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

4.4 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเชิงตัวเลข

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเชิงตัวเลขภายในปริภูมิงานป้อนฉบับนี้ มีการพิจารณาแหล่งกำเนิดความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านปริมาณ 300 กรัม โดยการวางถ่านไว้ในบริเวณตะแกรงสำหรับรองรับถ่าน จากนั้นเริ่มให้ความร้อนแก่ถ่านดังกล่าว ความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านจะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยกลไกต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยสมมติฐานที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจะกำหนดให้การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติจากบนลงล่าง และเป็นการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady state หรือ Transient state) สำหรับเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ณ จุดดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขเริ่มต้นบริเวณด้านบนของเตาเผา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.2 องศาเซลเซียส เงื่อนไขขอบเขตโดยการกำหนดฟลักซ์ความร้อนให้มีค่าเท่ากับ 0 บริเวณผนังด้านข้างของเตาเผา เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน และเงื่อนไขขอบเขตโดยการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวของอากาศ และทองแดงบริเวณด้านล่างของเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์ถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา

อุณหภูมิ ณ โหนดที่ 1 หรือจุดแรกที่ทำกรวิเคราะห์นั้น คืออุณหภูมิบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่าน ซึ่งจะพิจารณาพลังงานขาเข้าซึ่งประกอบไปด้วยฟลักซ์ความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่าน และพลังงานขาออกซึ่งประกอบไปด้วยฟลักซ์จากการนำความร้อน การพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในช่องขนานปิด และการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นผิวปิด สำหรับสมการดุลพลังงานบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อน แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\dot{Q}_{\text{coal}} - \dot{Q}_{\text{rad}} - \dot{Q}_{\text{conv}} - \dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\Delta E_{\text{element}}}{\Delta t} \quad (4.1)$$

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ จุดถัดมาที่ทำกรวิเคราะห์ คืออุณหภูมิ ณ โหนดต่างๆ ภายในอุปกรณ์เตาเผา ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่าน ซึ่งจะพิจารณาให้กลไกการถ่ายเทความร้อนเฉพาะการนำความร้อนในส่วนของพลังงานขาเข้า และพลังงานขาออกเท่านั้น สำหรับสมการดุลพลังงานบริเวณโหนดต่างๆ ภายในอุปกรณ์เตาเผา นั้น แสดงดังสมการที่ 4.2

$$\dot{Q}_{\text{cond, left}} - \dot{Q}_{\text{cond, right}} = \frac{\Delta E_{\text{element}}}{\Delta t} \quad (4.2)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละกรณีแทนลงในสมการที่ 4.1 และ 4.2 เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิบริเวณโหนดต่างๆ ในแต่ละคาบเวลา โดยอาศัยวิธีผลต่างสลับเนื่องมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีชัดแจ้ง จึงทำให้สามารถเขียนสมการสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่าน อุณหภูมิบริเวณโหนดที่ 2 ถึงโหนดที่ 55 และโหนดที่ 56 ในคาบเวลาถัดไปแสดงดังสมการที่ 4.3 ถึงสมการที่ 4.5 ตามลำดับ

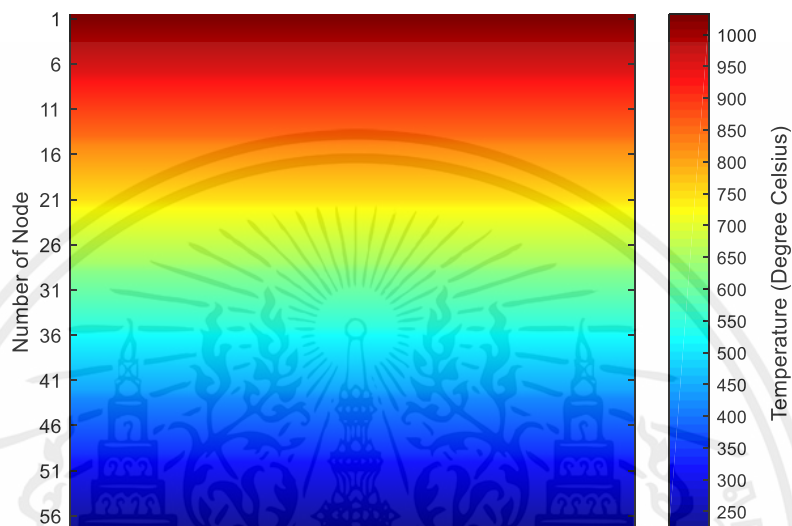
$$T_m^{i+1} = (1 - \tau)T_m^i + \tau T_{m+1}^i + \frac{\tau \Delta x}{k} (\dot{q}_{\text{coal}} - \dot{q}_{\text{rad}} - \dot{q}_{\text{conv}}) \quad (4.3)$$

$$T_m^{i+1} = \tau T_{m-1}^i - (1 - 2\tau)T_m^i + \tau T_{m+1}^i \quad (4.4)$$

$$T_m^{i+1} = \frac{2\tau_A \tau_B k_A (T_{m-1}^i - T_m^i) - 2\tau_A \tau_B k_B (T_m^i - T_{m+1}^i)}{\tau_B k_A + \tau_A k_B} \quad (4.5)$$

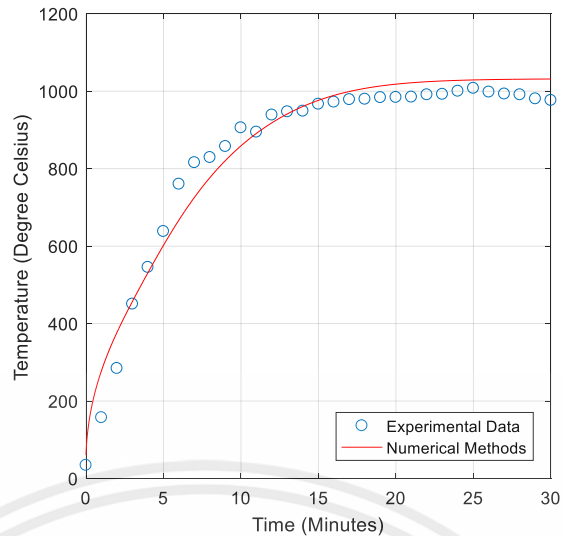
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ 4.3 และ 4.4 ข้างต้น ร่วมกับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนด้วยกลไกต่างๆ ไปเขียนเป็นฟังก์ชัน และคำสั่งลงในไฟล์สคริปต์ภายในซอฟต์แวร์ MATLAB R2016b ส่งผลให้สามารถแสดงผลอุณหภูมิภายในเตาถ่าน ณ เวลา 30 นาที ก่อนการนำเตาถ่านออกจากกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ที่เกิดการถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่าอุณหภูมิบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านจะมีอุณหภูมิ ณ คาบเวลาสุดท้ายเท่ากับ 1,032.16 องศาเซลเซียส และความร้อนจากจุดดังกล่าวจะเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังแต่ละส่วนภายในเตาถ่าน



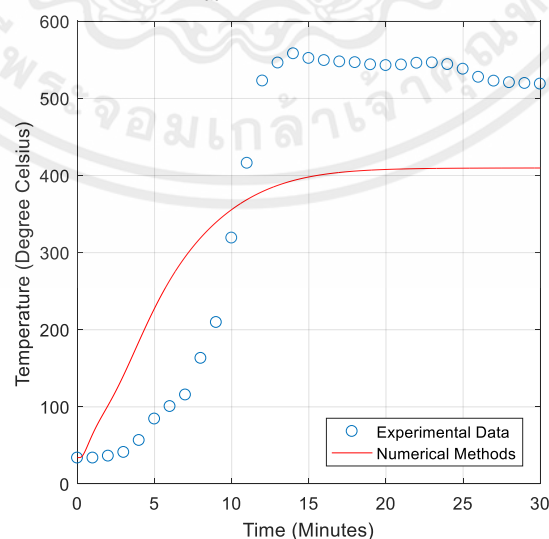
รูปที่ 4.14 กราฟการกระจายอุณหภูมิซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในเตาถ่าน โดยการอาศัยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านระหว่างการทดลองจากการบันทึกอุณหภูมิผ่านเครื่องบันทึกอุณหภูมิ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิบริเวณจุดดังกล่าว ณ คาบเวลาต่างๆ จากการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้ม และทำนายอุณหภูมิบริเวณจุดดังกล่าวได้ กล่าวคือในช่วงแรกอุณหภูมิบริเวณจุดดังกล่าวค่อนข้างมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เนื่องจากถ่านมีอัตราการปลดปล่อยเชื้อเพลิงสูง แต่ผลที่ได้จากการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมพบว่ายังคงมีความผิดพลาดไป เมื่อเทียบกับผลการทดลอง เมื่อระยะเวลาในการเผาไหม้ของถ่านเพิ่มมากขึ้นจะพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลาลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าจะเริ่มมีความใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น



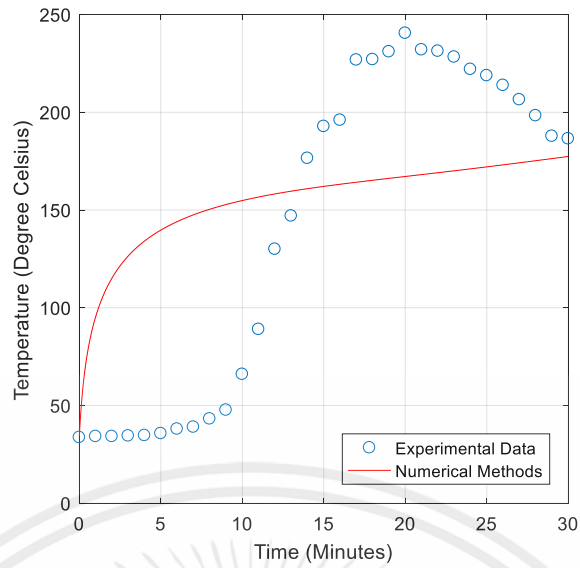
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนภายในเตา ระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณเหนือกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส และรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณฝาปิดของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ระหว่างการทดลองจากการบันทึกอุณหภูมิผ่านเครื่องบันทึกอุณหภูมิ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิบริเวณทั้งสองจุดดังกล่าว ณ คาบเวลาต่างๆ จากการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม พบว่าสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มของอุณหภูมิ แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายอุณหภูมิ บริเวณจุดดังกล่าวได้ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการกำหนดสมมติฐานของการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ ซึ่งสมมติฐานดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในกรณีที่ระนาบอื่นของการถ่ายเทความร้อนเป็นอนันต์ รวมไปถึงการวิเคราะห์กลไกการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ซึ่งอาจจะมีกลไกการถ่ายเทความร้อนอื่นเกิดขึ้นพร้อมกัน และฟลักซ์ความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านอาจมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณเหนือกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณฝาปิดของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนแปลงระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา และการออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง ซึ่งเป็นการจำลองแหล่งความร้อนทิ้ง โดยการอาศัยเตาถ่านมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน จากนั้นจึงอาศัยประโยชน์ และคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่สามารถกักเก็บพลังงานความร้อนเอาไว้ โดยการเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งให้กลายเป็นของเหลว และจะเกิดการปลดปล่อยพลังงาน โดยการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวให้กลับมาเป็นของแข็งอีกครั้ง ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์ซีเบคซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้น เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิบนปลายทั้งสองด้านของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยปริญญานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาคูสมบัติของวัสดุเปลี่ยนเฟส 3 ชนิด ได้แก่ ซีดีฟาราฟีน C100PW, โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต และน้ำตาลอิริทริทอล เพื่อศึกษาคูสมบัติ ซึ่งจะประกอบไปด้วยจุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว เส้นโค้งประวัติทางความร้อน ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และราคาของวัสดุเปลี่ยนเฟส โดยผลที่ได้จากการศึกษาจะพบว่า ซีดีฟาราฟีน C100PW มีความเหมาะสมในการนำมาเลือกใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนเฟส เนื่องจากมีช่วงของจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงอุณหภูมิภายในเตาถ่านที่เกิดการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และเกิดการถ่ายเทความร้อนลงไปยังบริเวณที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส ในขณะที่จุดเดือดของซีดีฟาราฟีน C100PW มีค่าอยู่ระหว่าง 350 ถึง 430 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสอีกสองชนิด ในขณะที่มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเท่ากับร้อยละ 7.50 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอื่น และมีราคาต่ำ ในขณะที่น้ำตาลอิริทริทอลมีความไม่เหมาะสม เนื่องจากมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และจุดหลอมเหลวของสารมีค่าสูงประมาณ 117 ถึง 120 องศาเซลเซียส ซึ่งในระยะเวลาการทดลองในการเผาถ่านกะลามะพร้าวปริมาณ 300 กรัม ไม่สามารถละลายน้ำตาลอิริทริทอลได้หมด หรือโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรตที่เมื่อทำการทดลองในครั้งถัดมา พบว่าสารดังกล่าวเกิดสภาวะความเย็นยิ่งยวด ดังนั้นจึงนำซีดีฟาราฟีน C100PW ไปศึกษาผลของความหนาของวัสดุเปลี่ยนเฟสต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการบรรจุซีดีฟาราฟีนลงในกล่องบรรจุ ซึ่งมีความหนาของซีดีฟาราฟีนเท่ากับ 20 มิลลิเมตร, 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร โดยการทดลองเผาถ่านกะลามะพร้าว ปริมาณ 300 กรัม โดยใช้ระยะเวลาในการเผาถ่านเป็นจำนวนเวลา 30 นาที และให้อุณหภูมิของซีดีฟาราฟีนสูงอยู่ที่ 120 องศาเซลเซียส เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถใช้งานได้โดยมีอุณหภูมิไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงนำกล่องสแตนเลสที่บรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสวางลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก และอ่านค่าอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟส ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นเวลา 60 นาที เพื่อศึกษาว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่าใดที่มีความเหมาะสม

ในการนำมาใช้ในการกักเก็บพลังงานต่อการผลิตกระแสไฟฟ้ามากที่สุด ผลที่ได้พบว่าวัสดุเปลี่ยนเฟส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ทำให้สามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 3.83 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 122.10 มิลลิแอมแปร์ และมีกำลังไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 467.64 มิลลิวัตต์ จากนั้นจึงนำขั้วฝังพาราฟิน C100PW ที่มีความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร มาเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการติดตั้งครีบบระบายความร้อนบริเวณแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าเมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อนแล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 10.14 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 200 มิลลิแอมแปร์ และมีกำลังไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 2,028.00 มิลลิวัตต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นมากกว่าการติดตั้งการไม่ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าบริเวณแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับบริเวณแผ่นด้านร้อน การติดตั้งครีบบระบายความร้อนบริเวณแผ่นด้านเย็นจึงมีส่วนช่วยในการทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน และแผ่นด้านเย็นยังคงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นภายในช่วงระยะเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตามครีบบระบายความร้อนไม่สามารถระบายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้เมื่อบริเวณผ่านไปแล้ว อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน และแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น จะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน และทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อยลงเช่นเดิม นอกจากนี้เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยการเปรียบเทียบบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนภายในเตา บริเวณเหนือกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส และบริเวณฝาปิดของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมสามารถนำไปวิเคราะห์แนวโน้มของอุณหภูมิทั้งสามบริเวณได้ แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวสามารถนำไปทำนายอุณหภูมิได้เฉพาะบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนภายในเตาเท่านั้น ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์แนวโน้มอุณหภูมิบริเวณเหนือกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส และบริเวณฝาปิดของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสได้ แต่ไม่อาจนำไปใช้ในการทำนายอุณหภูมิได้ เนื่องจากอาจจะต้องมีการพิจารณาผลกระทบการถ่ายเทความร้อนอื่นพร้อมกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วัสดุเปลี่ยนเฟสที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นวัสดุเปลี่ยนเฟสบริสุทธิ์ที่ยังไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น ค่าการนำความร้อน ระดับของสถานะความเย็นยิ่งยวด เป็นต้น ดังนั้นจึงควรศึกษาผลของสารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติข้างต้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากถึงแม้สถานะความเย็นยิ่งยวดจะเป็นคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมในการคัดเลือกวัสดุเปลี่ยนเฟส แต่คุณสมบัติดังกล่าวอาจนำมาใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยพลังงานของวัสดุเปลี่ยนเฟสเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในระยะเวลาที่ต้องการ
2. การออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งนั้น ควรมีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กกว่า และน้ำหนักเบากว่าอุปกรณ์ต้นแบบ เพื่อให้สามารถพกพาได้ง่ายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การต่อวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกภายในปริศนาปริทัศน์นี้ เป็นการต่อวงจรแบบอนุกรม ซึ่งทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงเมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมาต่อรวมกันมากกว่า 1 ตัว แต่กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังคงมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงควรศึกษาผลของการต่อวงจร โดยอาจดำเนินการต่อวงจรในลักษณะวงจรแบบผสมระหว่างวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม และแบบขนาน ซึ่งส่งผลทำให้ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รวมถึงการใช้โมดูลเพื่อปรับเพิ่ม หรือลดแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้ เพื่อให้ความต่างศักย์มีความเหมาะสมกับช่วงในการใช้งาน เช่น การชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์ ที่มีช่วงความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5 โวลต์ และ 1 แอมแปร์ ตามลำดับ เป็นต้น
4. วิธีการระบายความร้อนบริเวณแผ่นด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่เลือกนั้น เป็นเพียงหนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามควรศึกษาวิธีการอื่นในการระบายความร้อนบริเวณแผ่นด้านเย็น ยกตัวอย่างเช่น การใช้พัดลมขนาดเล็ก การใช้น้ำหล่อเย็น น้ำแข็ง หรือการใช้ของเหลวอื่นที่มีอนุภาคนาโน (Nanofluid) เป็นต้น
5. การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์อาจทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในแนว 3 มิติ โดยการอาศัยซอฟต์แวร์ MATLAB ได้เช่นเดิม ผ่านการใช้กล่องเครื่องมือสำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation Toolbox: PDE Toolbox) หรือการใช้ซอฟต์แวร์แอนซิส (ANSYS) หรือซอฟต์แวร์อื่นๆ ในการวิเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Fernández-Yáñez, V. Romero, O. Armas, G. Cerretti, Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery, *Appl Therm Eng.* 196 (2021) 117291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291>.
- [2] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, S.A. Tassou, Waste heat recovery technologies and applications, *Thermal Science and Engineering Progress.* 6 (2018) 268–289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>.
- [3] C. Forman, I.K. Muritala, R. Pardemann, B. Meyer, Estimating the global waste heat potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 57 (2016) 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.
- [4] J. Mitali, S. Dhinakaran, A.A. Mohamad, Energy storage systems: a review, *Energy Storage and Saving.* 1 (2022) 166–216. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>.
- [5] E.M. Shchukina, M. Graham, Z. Zheng, D.G. Shchukin, Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems, *Chem Soc Rev.* 47 (2018) 4156–4175. <https://doi.org/10.1039/C8CS00099A>.
- [6] R. Al-Shannaq, M.M. Farid, C.A. Ikutegebe, Methods for the Synthesis of Phase Change Material Microcapsules with Enhanced Thermophysical Properties—A State-of-the-Art Review, *Micro.* 2 (2022) 426–474. <https://doi.org/10.3390/micro2030028>.
- [7] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 6th ed., Mc-Graw-Hill Education, New York, United States of America, 2020.
- [8] K.G.T. Hollands, T.E. Unny, G.D. Raithby, L. Konicek, Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers, *J Heat Transfer.* 98 (1976) 189–193. <https://doi.org/10.1115/1.3450517>.
- [9] D.A. Granados, F. Chejne, J.M. Mejía, Oxy-fuel combustion as an alternative for increasing lime production in rotary kilns, *Appl Energy.* 158 (2015) 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.075>.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Y. Zhang, Y. Li, Y. Huang, S. Li, W. Wang, Characteristics of mass, heat and gaseous products during coal spontaneous combustion using TG/DSC-FTIR technology, *J Therm Anal Calorim.* 131 (2018) 2963–2974.
<https://doi.org/10.1007/s10973-017-6738-x>.
- [11] N. Kongprasert, P. Wangphanich, A. Jutilarptavorn, Charcoal Briquettes from Madan Wood Waste as an Alternative Energy in Thailand, *Procedia Manuf.* 30 (2019) 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.019>.
- [12] P.D. Dunn, P. Samootsakorn, N. Joyce, The performance of Thai charcoal stove, 1982.
- [13] H. Nazir, M. Batool, M. Ali, A.M. Kannan, Fatty acids based eutectic phase change system for thermal energy storage applications, *Appl Therm Eng.* 142 (2018) 466–475. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.025>.
- [14] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran, Latent Thermal Energy Storage, in: *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, Elsevier, 2014: pp. 83–126.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417291-3.00005-0>.
- [15] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 13 (2009) 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [16] R.K. Sharma, P. Ganesan, V.V. Tyagi, H.S.C. Metselaar, S.C. Sandaran, Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage, *Energy Convers Manag.* 95 (2015) 193–228. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.084>.
- [17] G. Peng, G. Dou, Y. Hu, Y. Sun, Z. Chen, Phase Change Material (PCM) Microcapsules for Thermal Energy Storage, *Advances in Polymer Technology.* 2020 (2020) 1–20. <https://doi.org/10.1155/2020/9490873>.
- [18] G. Gholamibozanjani, M. Farid, A Critical Review on the Control Strategies Applied to PCM-Enhanced Buildings, *Energies (Basel).* 14 (2021) 1929.
<https://doi.org/10.3390/en14071929>.
- [19] A. Nematpour Keshteli, M. Sheikholeslami, Nanoparticle enhanced PCM applications for intensification of thermal performance in building: A review, *J Mol Liq.* 274 (2019) 516–533. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.151>.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [20] S. Koochi-Fayegh, M.A. Rosen, A review of energy storage types, applications and recent developments, *J Energy Storage*. 27 (2020) 101047. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>.
- [21] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications, *J Energy Storage*. 33 (2021) 101913. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>.
- [22] I. Sarbu, C. Sebarchievici, A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage, *Sustainability*. 10 (2018) 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
- [23] C. Wang, Y. Zhu, Experimental and Numerical Studies on Phase Change Materials, in: *Phase Change Materials and Their Applications*, InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76807>.
- [24] A. Kazemian, A. Salari, A. Hakkaki-Fard, T. Ma, Numerical investigation and parametric analysis of a photovoltaic thermal system integrated with phase change material, *Appl Energy*. 238 (2019) 734–746. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.103>.
- [25] N.H. Abu-Hamdeh, K.A. Alnefaie, Assessment of thermal performance of PCM in latent heat storage system for different applications, *Solar Energy*. 177 (2019) 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.035>.
- [26] G. Hailu, Seasonal Solar Thermal Energy Storage, in: *Thermal Energy Battery with Nano-Enhanced PCM*, IntechOpen, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79576>.
- [27] H. Mehling, L.F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>.
- [28] I. Shamseddine, F. Pennec, P. Biwole, F. Fardoun, Supercooling of phase change materials: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 158 (2022) 112172. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112172>.
- [29] P. Sundarraj, D. Maity, S.S. Roy, R.A. Taylor, Recent advances in thermoelectric materials and solar thermoelectric generators – a critical review, *RSC Adv*. 4 (2014) 46860–46874. <https://doi.org/10.1039/C4RA05322B>.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] P.A. Carraro, L. Maragoni, A.S. Paipetis, M. Quaresimin, L. Tzounis, M. Zappalorto, Prediction of the Seebeck coefficient of thermoelectric unidirectional fibre-reinforced composites, *Compos B Eng.* 223 (2021) 109111. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109111>.
- [31] R. Pandey, P. Thapa, V. Kumar, Y. Zhu, N. Wang, M. Bystrzejewski, S.K. Tiwari, Updates in phase change materials for thermoelectric devices: Status and challenges, *Materialia (Oxf)*. 21 (2022) 101357. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101357>.
- [32] K. Karthick, S. Suresh, M.M.M.D. Hussain, H.M. Ali, C.S.S. Kumar, Evaluation of solar thermal system configurations for thermoelectric generator applications: A critical review, *Solar Energy*. 188 (2019) 111–142. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.075>.
- [33] L. Wang, K. Li, S. Zhang, C. Liu, Z. Zhang, J. Chen, M. Gu, Modeling the Effects of Module Size and Material Property on Thermoelectric Generator Power, *ACS Omega*. 5 (2020) 29844–29853. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03914>.
- [34] D. Enescu, Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications, in: *Green Energy Advances*, IntechOpen, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83495>.
- [35] E. Yousefi, A.A. Nejad, A. Rezanian, Higher power output in thermoelectric generator integrated with phase change material and metal foams under transient boundary condition, *Energy*. 256 (2022) 124644. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124644>.
- [36] H.R. Fallah Kohan, F. Lotfipour, M. Eslami, Numerical simulation of a photovoltaic thermoelectric hybrid power generation system, *Solar Energy*. 174 (2018) 537–548. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.046>.
- [37] S. Memon, K. Tahir, Experimental and Analytical Simulation Analyses on the Electrical Performance of Thermoelectric Generator Modules for Direct and Concentrated Quartz-Halogen Heat Harvesting, *Energies (Basel)*. 11 (2018) 3315. <https://doi.org/10.3390/en1123315>.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [38] M. Bensaada, F. Metehri, S. della Krachai, Comparative Analysis of Thermoelectric Generators Parameters, WSEAS TRANSACTIONS ON HEAT AND MASS TRANSFER. 16 (2021) 14–17. <https://doi.org/10.37394/232012.2021.16.2>.
- [39] S.F. Tie, C.W. Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 20 (2013) 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>.
- [40] G.J. Snyder, E.S. Toberer, Complex thermoelectric materials, Nat Mater. 7 (2008) 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>.
- [41] Y. Gao, Z. Dai, D. Wu, C. Wang, B. Chen, X. Zhang, Transient performance assessment of a hybrid PV-TEG system integrated with PCM under non-uniform radiation conditions: A numerical investigation, Renew Energy. 198 (2022) 352–366. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.087>.
- [42] C. Selvam, S. Manikandan, N.V. Krishna, R. Lamba, S.C. Kaushik, O. Mahian, Enhanced thermal performance of a thermoelectric generator with phase change materials, International Communications in Heat and Mass Transfer. 114 (2020) 104561. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104561>.
- [43] J. Yu, H. Wang, L. Kong, H. Zhu, Q. Zhu, Q. Li, J. Guan, Analysis of temperature control effect of composite phase change structure used in thermoelectric conversion system, Appl Therm Eng. 167 (2020) 114760. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114760>.
- [44] W.Q. Li, Y.X. Li, T.H. Yang, T.Y. Zhang, F. Qin, Experimental investigation on passive cooling, thermal storage and thermoelectric harvest with heat pipe-assisted PCM-embedded metal foam, Int J Heat Mass Transf. 201 (2023) 123651. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123651>.
- [45] M.J. Mochane, T.C. Mokhena, T.E. Motaung, L.Z. Linganiso, Shape-stabilized phase change materials of polyolefin/wax blends and their composites, J Therm Anal Calorim. 139 (2020) 2951–2963. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08734-3>.
- [46] A. Hamins, Characterization of Candle Flames, Journal of Fire Protection Engineering. 15 (2005) 265–285. <https://doi.org/10.1177/1042391505053163>.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [47] Z. Zhang, Z. Duan, D. Chen, Y. Xie, X. Cao, J. Wang, Sodium acetate trihydrate-based composite phase change material with enhanced thermal performance for energy storage, *J Energy Storage*. 34 (2021) 102186.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102186>.
- [48] G. Englmaier, Y. Jiang, M. Dannemand, C. Moser, H. Schranzhofer, S. Furbo, J. Fan, Crystallization by local cooling of supercooled sodium acetate trihydrate composites for long-term heat storage, *Energy Build*. 180 (2018) 159–171.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.035>.
- [49] S. H hlelein, A. K nig-Haagen, D. Br ggemann, Thermophysical Characterization of MgCl₂·6H₂O, Xylitol and Erythritol as Phase Change Materials (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES), *Materials*. 10 (2017) 444.
<https://doi.org/10.3390/ma10040444>.
- [50] K. Nakano, Y. Masuda, H. Daiguji, Crystallization and Melting Behavior of Erythritol In and Around Two-Dimensional Hexagonal Mesoporous Silica, *The Journal of Physical Chemistry C*. 119 (2015) 4769–4777.
<https://doi.org/10.1021/jp510048g>.
- [51] M.T. Chaichan, R.M. Hussein, A.M. Jawad, Thermal Conductivity Enhancement of Iraqi Origin Paraffin Wax by Nano-Alumina, *Al-Khwarizmi Engineering Journal*. 13 (2017) 83–90. <https://doi.org/10.22153/kej.2017.02.003>.
- [52] J. Goeke, A. Henne, Time-Temperature Charge Function of a High Dynamic Thermal Heat Storage with Phase Change Material, *Energy Power Eng*. 07 (2015) 41–54. <https://doi.org/10.4236/epe.2015.72004>.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

วิธีการคำนวณการออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

การกำหนดขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงภายในชั้นวัสดุของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน จากความร้อนเหลือทิ้งภายในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้มีการกำหนดสมมติฐานสำหรับการคำนวณ ซึ่งใช้ภายใน การออกแบบภายในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และฉนวนความร้อน ดังต่อไปนี้

- 1) การถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state)
- 2) การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ (One-dimensional heat transfer)
- 3) ไม่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer is negligible.)
- 4) อากาศมีพฤติกรรมเป็นแก๊สอุดมคติ (Air is an ideal gas.)

คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกะลามะพร้าว

ข้อมูลจากงานวิจัยของณัฐพงษ์ คงประเสริฐ และคณะ [11] แสดงให้เห็นว่า

ค่าความร้อนของถ่านกะลามะพร้าว (HHV) มีค่าเท่ากับ 26,401 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

อัตราการเผาไหม้ของถ่านกะลามะพร้าว (\dot{m}_{decomp}) มีค่าเท่ากับ 0.44 กรัมต่อนาที

คำนวณอัตราการให้พลังงานของถ่านกะลามะพร้าวได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{coal}} &= \text{HHV} \cdot \dot{m}_{\text{decomp}} \\ &= \frac{26,401 \text{ kJ}}{\text{kg}} \left| \frac{0.44 \text{ g}}{\text{min}} \right| \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right| \left| \frac{1 \text{ min}}{3600 \text{ s}} \right| \left| \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right| \\ &= 193.61 \text{ W}\end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการให้พลังงานของถ่านกะลามะพร้าวมีค่าเท่ากับ 193.61 วัตต์

ปริมาณความร้อนที่นำมาใช้ในการคำนวณสำหรับการออกแบบ

ข้อมูลจากงานวิจัยของ Dunn และคณะ [12] แสดงให้เห็นว่า

พลังงานความร้อนปริมาณ 10,675 กิโลจูล ภายในเตา สามารถแบ่งสัดส่วนพลังงานที่สูญเสีย ไปยังแต่ละส่วน ซึ่งนำไปใช้สำหรับการคำนวณ และการออกแบบอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	คิดเป็น 236 กิโลจูล
ความร้อนที่สะสมภายในเตาเผา	คิดเป็น 2,403 กิโลจูล
ความร้อนบริเวณผนังด้านข้างเตาเผา	คิดเป็น 751 กิโลจูล
ความร้อนที่ไปยังแก๊สเผาไหม้	คิดเป็น 3,896 กิโลจูล
ความร้อนจากกระเพาะไปยังน้ำภายในกระเพาะ	คิดเป็น 968 กิโลจูล
ความร้อนของน้ำที่เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ	คิดเป็น 2,356 กิโลจูล
ความร้อนบริเวณฝาปิด	คิดเป็น 65 กิโลจูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

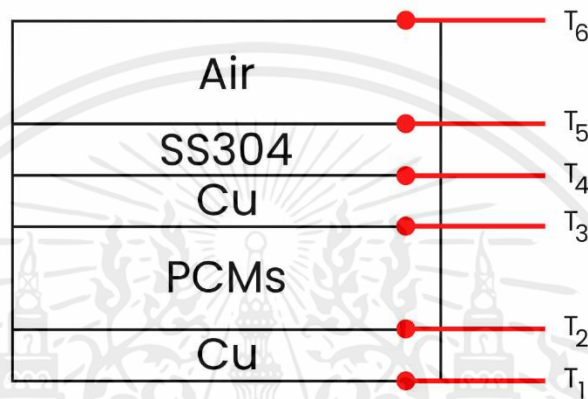
การคำนวณอุณหภูมิของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในแนวดิ่ง

กำหนดให้ อุณหภูมิบริเวณพื้นผิวของถ่านขณะเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส

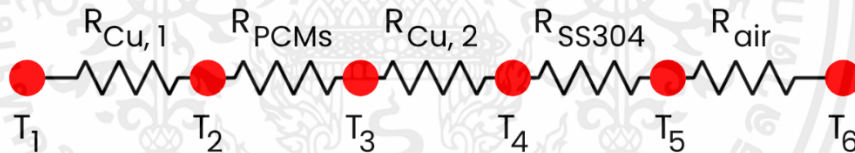
ความกว้างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน มีค่าเท่ากับ 20 เซนติเมตร

ความยาวของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน มีค่าเท่ากับ 20 เซนติเมตร

โครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งแสดงดังรูปที่ ก.1 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของอากาศ แผ่นสแตนเลสเกรด 304 แผ่นทองแดง และวัสดุเปลี่ยนเฟส และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรความร้อน (Thermal circuit) ได้แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 โครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งในแนวดิ่ง



รูปที่ ก.2 วงจรความร้อนสำหรับโครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งในแนวดิ่ง

เนื่องจากอุณหภูมิบริเวณ ณ จุด T₁ ซึ่งเป็นบริเวณด้านล่างของแผ่นทองแดง ซึ่งพื้นผิวสัมผัสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น SP1848-27145 สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 120 °C ดังนั้นจึงกำหนดให้อุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 120 °C คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแสดงดังตารางที่ ก.1 และคุณสมบัติของซีฟิ่งพาราฟิน C100PW ซึ่งนำมาใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนเฟสแสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

วัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบ	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)	ความหนา (m)
แผ่นสแตนเลสเกรด 304	16.2	0.003
แผ่นทองแดง	401	0.003

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติของซีฟิ่งพาราฟิน C100PW

คุณสมบัติ	ค่าของคุณสมบัติ
จุดหลอมเหลว (°C)	58.0
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	190.0
ความจุความร้อนจำเพาะในสถานะของแข็ง (kJ/kg·K)	2.604
ความจุความร้อนจำเพาะในสถานะของเหลว (kJ/kg·K)	2.981
ความหนาแน่นในสถานะของแข็ง (kg/m ³)	889.0
ความหนาแน่นในสถานะของเหลว (kg/m ³)	768.0
ค่าการนำความร้อนในสถานะของแข็ง (W/m·K)	0.23
ค่าการนำความร้อนในสถานะของเหลว (W/m·K)	0.22

คำนวณค่าความต้านทานความร้อนของการนำความร้อนของแผ่นทองแดงจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned}
 R_{cu,1} &= \frac{L_{cu}}{k_{cu} A} \\
 &= \frac{0.003 \text{ m}}{(401 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.2 \times 0.2 \text{ m}^2)} \\
 &= 1.870 \times 10^{-4} \text{ K/W}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนของแผ่นทองแดงมีค่าเท่ากับ 1.870×10^{-4} เคลวินต่อวัตต์

คำนวณอุณหภูมิ ณ จุด T_2 บริเวณด้านบนของแผ่นทองแดงที่ใช้สำหรับการรองรับวัสดุเปลี่ยนเฟส จากความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนตามกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law)

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{coal} &= \frac{T_2 - T_1}{R_{cu}} \\
 T_2 &= T_1 + \dot{Q}_{coal} R_{cu,1} \\
 &= 393.15 \text{ K} + \left(\frac{2403}{10675} \cdot 193.60763 \text{ W} \cdot 1.870 \times 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}} \right) \\
 &= 393.16 \text{ K}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของแผ่นทองแดงที่ใช้สำหรับการรองรับกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส มีค่าเท่ากับ 393.16 เคลวิน

คำนวณค่าความต้านทานความร้อนของการนำความร้อนของซีฟิ่งพาราฟินจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} R_{\text{PCMs}} &= \frac{L_{\text{PCMs}}}{k_{\text{PCMs}} A} \\ &= \frac{0.02 \text{ m}}{(0.23 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.2 \times 0.2 \text{ m}^2)} \\ &= 2.1739 \text{ K/W} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนของซีฟิ่งพาราฟินมีค่าเท่ากับ 2.1739 เคลวินต่อวัตต์

คำนวณปริมาณความร้อนที่ซีฟิ่งพาราฟินจำนวน 366 กรัม สามารถกักเก็บไว้ได้ โดยพิจารณาจากความร้อนแฝงของการหลอมเหลวเท่านั้น จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{PCMs}} &= mL \\ &= \frac{366 \text{ g}}{1800 \text{ s}} \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right| \frac{209 \text{ kJ}}{\text{kg}} \left| \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right| \\ &= 42.4967 \text{ W} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ซีฟิ่งพาราฟินสามารถกักเก็บไว้ได้มีค่าเท่ากับ 42.4967 วัตต์

คำนวณอุณหภูมิบริเวณด้านบนของซีฟิ่งพาราฟินจากความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law)

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{coal}} &= \frac{T_3 - T_2}{R_{\text{PCMs}}} + \dot{Q}_{\text{PCMs}} \\ T_3 &= T_2 + (\dot{Q}_{\text{coal}} - \dot{Q}_{\text{PCMs}}) R_{\text{PCMs}} \\ &= 393.16 \text{ K} + \left(\left(\frac{2403}{10675} \cdot 193.60763 \text{ W} - 42.4967 \text{ W} \right) \cdot 2.1739 \frac{\text{K}}{\text{W}} \right) \\ &= 395.50 \text{ K} \end{aligned}$$

ดังนั้นอุณหภูมิบริเวณด้านล่างของซีฟิ่งพาราฟินมีค่าเท่ากับ 395.50 เคลวิน

คำนวณค่าความต้านทานความร้อนของการนำความร้อนของแผ่นทองแดงจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} R_{\text{Cu}, 2} &= \frac{L_{\text{Cu}}}{k_{\text{Cu}} A} \\ &= \frac{0.003 \text{ m}}{(401 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.2 \times 0.2 \text{ m}^2)} \\ &= 1.870 \times 10^{-4} \text{ K/W} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนของแผ่นทองแดงมีค่าเท่ากับ 1.870×10^{-4} เคลวินต่อวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณอุณหภูมิ ณ จุด T_4 บริเวณด้านบนของแผ่นทองแดงที่ใช้สำหรับปิดกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟส จากความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนตามกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law)

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{coal}} &= \frac{T_4 - T_3}{R_{\text{cu}}} \\ T_4 &= T_3 + \dot{Q}_{\text{coal}} R_{\text{cu}, 2} \\ &= 395.50 \text{ K} + \left(\frac{2403}{10675} \cdot 193.60763 \text{ W} \cdot 1.870 \times 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}} \right) \\ &= 395.51 \text{ K}\end{aligned}$$

ดังนั้น อุณหภูมิบริเวณด้านบนของแผ่นทองแดงที่ใช้สำหรับการปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส มีค่าเท่ากับ 395.51 เคลวิน

คำนวณค่าความต้านทานความร้อนของการนำความร้อนของแผ่นสแตนเลส เกรด 304 สำหรับการรองรับซีเมนต์จากการเผาไหม้ถ่านกะลามะพร้าวจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned}R_{\text{SS304}} &= \frac{L_{\text{SS304}}}{k_{\text{SS304}} A} \\ &= \frac{0.003 \text{ m}}{(16.2 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.2 \times 0.2 \text{ m}^2)} \\ &= 4.6296 \times 10^{-3} \text{ K/W}\end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนของแผ่นสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 4.6296×10^{-3} เคลวินต่อวัตต์
คำนวณอุณหภูมิ ณ จุด T_5 บริเวณด้านบนของแผ่นสแตนเลส เกรด 304 สำหรับการรองรับซีเมนต์จากการเผาไหม้ถ่านกะลามะพร้าว จากความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนตามกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law)

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{coal}} &= \frac{T_5 - T_4}{R_{\text{SS304}}} \\ T_5 &= T_4 + \dot{Q}_{\text{coal}} R_{\text{SS304}} \\ &= 395.51 \text{ K} + \left(\frac{2403}{10675} \cdot 193.60763 \text{ W} \cdot 4.6296 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}} \right) \\ &= 395.71 \text{ K}\end{aligned}$$

ดังนั้น อุณหภูมิบริเวณด้านบนของแผ่นสแตนเลสสำหรับการรองรับซีเมนต์จากการเผาไหม้ถ่านกะลามะพร้าว มีค่าเท่ากับ 395.71 เคลวิน

พิจารณาคอนสแตนต์ของอากาศ ณ สภาวะความดัน 1 บรรยากาศ จากหนังสือ Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, 6th Edition ของ Yunus A. Çengel และ Afshin J. Ghajar [7] ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสได้ดังความสัมพันธ์

$$k_{\text{air}} = (4.6399 \times 10^{-12} \times T^3) - (2.5217 \times 10^{-8} \times T^2) + (7.5622 \times 10^{-5} \times T) + 0.023635$$

คำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวของถ่านขณะเผาไหม้ และอุณหภูมิบริเวณด้านบนของแผ่นสแตนเลสสำหรับการรองรับซึ่งได้จากการเผาไหม้ถ่านจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} T_{\text{avg}} &= \frac{T_5 + T_6}{2} \\ &= \frac{700 \text{ }^\circ\text{C} + 122.56 \text{ }^\circ\text{C}}{2} \\ &= 411.28 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ดังนั้น อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างสองจุดมีค่าเท่ากับ 411.28 องศาเซลเซียส

เมื่อคำนวณค่าการนำความร้อนของอากาศ ณ อุณหภูมิเฉลี่ยข้างต้น โดยการอาศัยความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสมาใช้ในการคำนวณ จะพบว่าค่าการนำความร้อนของอากาศที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.050794 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

คำนวณค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance: R) ภายในชั้นอากาศจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} R_{\text{air}} &= \frac{L_{\text{air}}}{k_{\text{air}} A} \\ &= \frac{L}{(0.050794 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.2 \times 0.2 \text{ m}^2)} \\ &= 492.1841 \text{ K/W} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนภายในชั้นอากาศมีค่าเท่ากับ 492.1841L เคลวินต่อวัตต์

คำนวณความสูงของชั้นอากาศจากความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนตามกฎของฟูเรียร์

(Fourier's law)

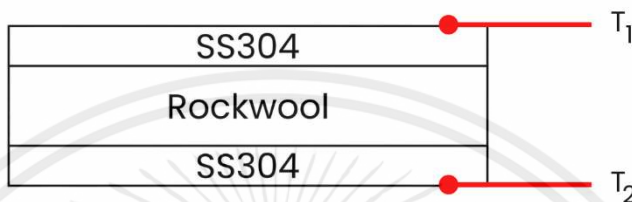
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{coal}} &= \frac{T_6 - T_5}{R_{\text{air}}} \\ \frac{2403}{10675} \cdot 193.60763 \text{ W} &= \frac{700 \text{ }^\circ\text{C} - 122.56 \text{ }^\circ\text{C}}{492.1841 \text{ L}} \\ L &= 0.027 \text{ m} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความสูงของชั้นอากาศมีค่าเท่ากับ 0.027 เมตร

การคำนวณอุณหภูมิของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับฉนวนกันความร้อน

- กำหนดให้ อุณหภูมิบริเวณพื้นผิวของถ่านขณะเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส
- ความกว้างของอุปกรณ์ด้านข้าง มีค่าเท่ากับ 20 เซนติเมตร
- ความสูงของอุปกรณ์ด้านข้าง มีค่าเท่ากับ 99.5 เซนติเมตร

โครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งในส่วนของฉนวนกันความร้อนแสดงดังรูปที่ ก.3 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของแผ่นสแตนเลสเกรด 304 และใยหิน และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรความร้อน (Thermal circuit) ได้แสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.3 โครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งสำหรับฉนวนกันความร้อน



รูปที่ ก.4 วงจรความร้อนสำหรับโครงร่างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเหลือทิ้งสำหรับฉนวนกันความร้อน

กำหนดให้อุณหภูมิบริเวณเผาถ่านกะลามะพร้าว ณ จุด T_1 มีค่าเท่ากับ 700 °C และต้องการคำนวณความหนาของใยหิน ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน โดยการกำหนดให้อุณหภูมิ ณ จุด T_2 ซึ่งเป็นบริเวณอากาศโดยรอบมีค่าไม่เกิน 30 °C คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบฉนวนกันความร้อนแสดงดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบฉนวนกันความร้อน

วัสดุที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบ	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)	ความหนา (m)
แผ่นสแตนเลสเกรด 304	16.2	0.003
ฉนวนใยหิน	0.035	$L_{rockwool}$

คำนวณค่าความต้านทานความร้อนของการนำความร้อนของแผ่นสแตนเลส เกรด 304 สำหรับ การบรรจุใยหินลงภายในจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} R_{SS304} &= \frac{L_{SS304}}{k_{SS304} A} \\ &= \frac{0.003 \text{ m}}{(16.2 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.2 \times 0.995 \text{ m}^2)} \\ &= 9.3058 \times 10^{-4} \text{ K/W} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนของแผ่นสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 9.3058×10^{-4} เคลวินต่อวัตต์

คำนวณค่าความต้านทานความร้อนของการนำความร้อนของฉนวนใยหินจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} R_{\text{rockwool}} &= \frac{L_{\text{rockwool}}}{k_{\text{rockwool}} A} \\ &= \frac{L_{\text{rockwool}} \text{ m}}{(0.035 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.2 \times 0.995 \text{ m}^2)} \\ &= 143.5750 L_{\text{rockwool}} \text{ K/W} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนใยหินมีค่าเท่ากับ $143.5750 L_{\text{rockwool}}$ เคลวินต่อวัตต์

คำนวณความหนาของชั้นฉนวนใยหินจากความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนตามกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law)

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{coal}} &= \frac{T_1 - T_2}{\sum R} \\ \frac{2403}{10675} \cdot 193.60763 \text{ W} &= \frac{700 \text{ }^\circ\text{C} - 30 \text{ }^\circ\text{C}}{(2 \times 9.3058 \times 10^{-4} \text{ K/W}) + 143.5750 L_{\text{rockwool}}} \\ L_{\text{rockwool}} &= 0.035 \text{ m} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความหนาของชั้นฉนวนใยหินมีค่าเท่ากับ 0.035 เมตร

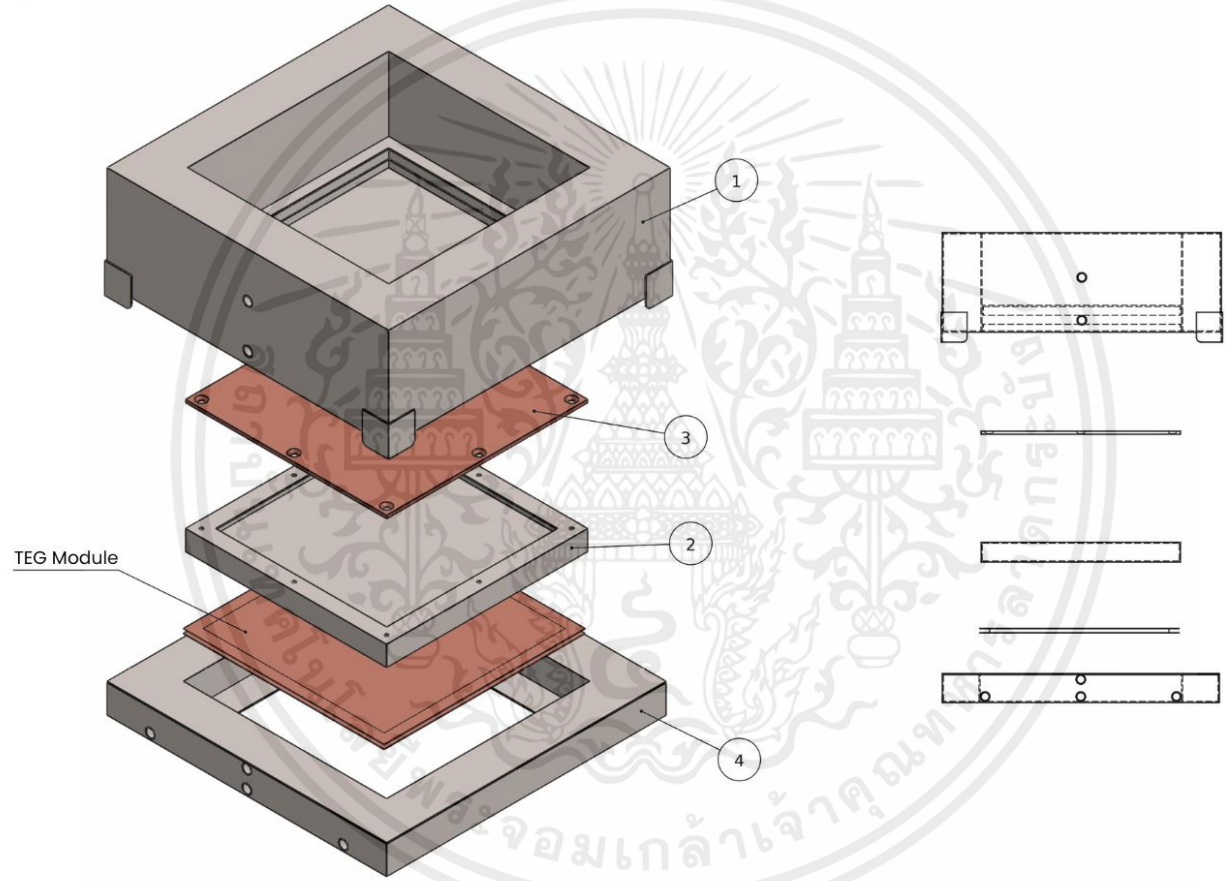
ภาคผนวก ข.

ภาพถ่ายไอโซเมตริกของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งภายหลังได้รับการออกแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น สามารถแสดงภาพถ่ายไอโซเมตริกของอุปกรณ์ได้ดังภาคผนวก ข. ซึ่งแสดงถึงภาพสามมิติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีลักษณะการจัดวางของอุปกรณ์อยู่ในแนวตั้ง เพื่อใช้สำหรับการกักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง และมีการติดตั้งโยหิน ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังด้านข้างของอุปกรณ์



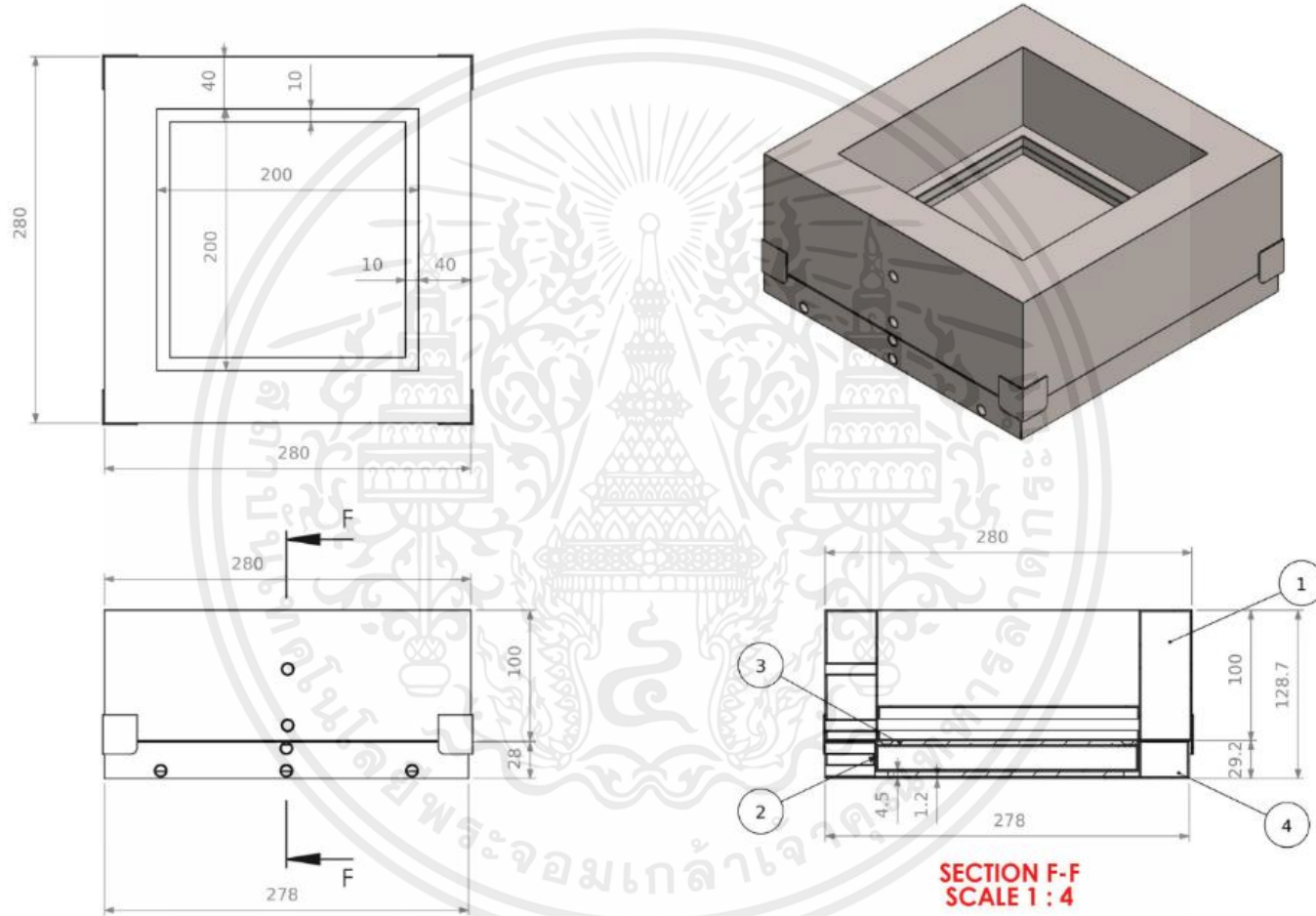
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MAT : SUS 304

SCALE 1:4

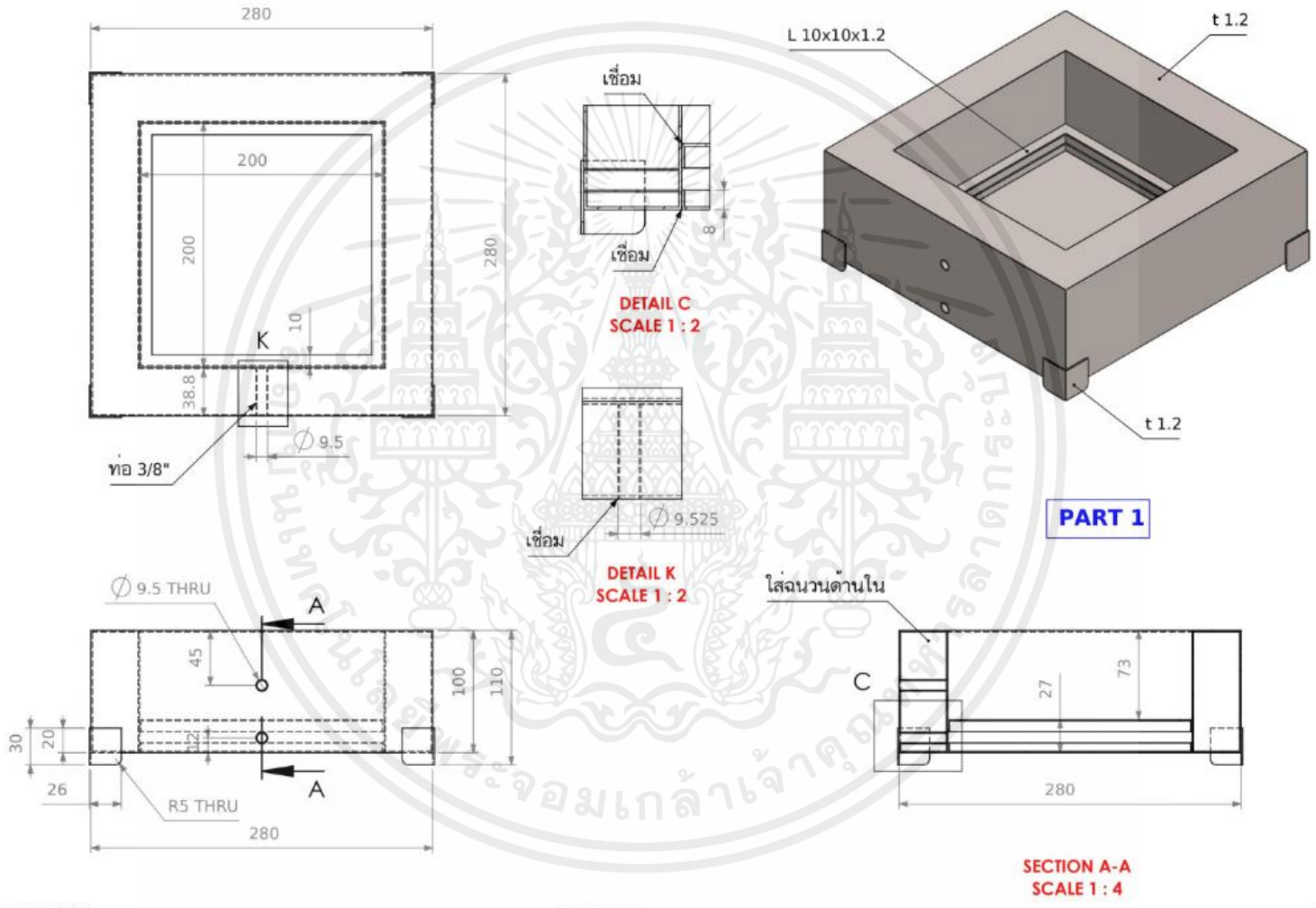
รูปที่ ข.1 ภาพไอโซเมตริกแสดงภาพรวมของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน



MAT : SUS 304

SCALE 1:4

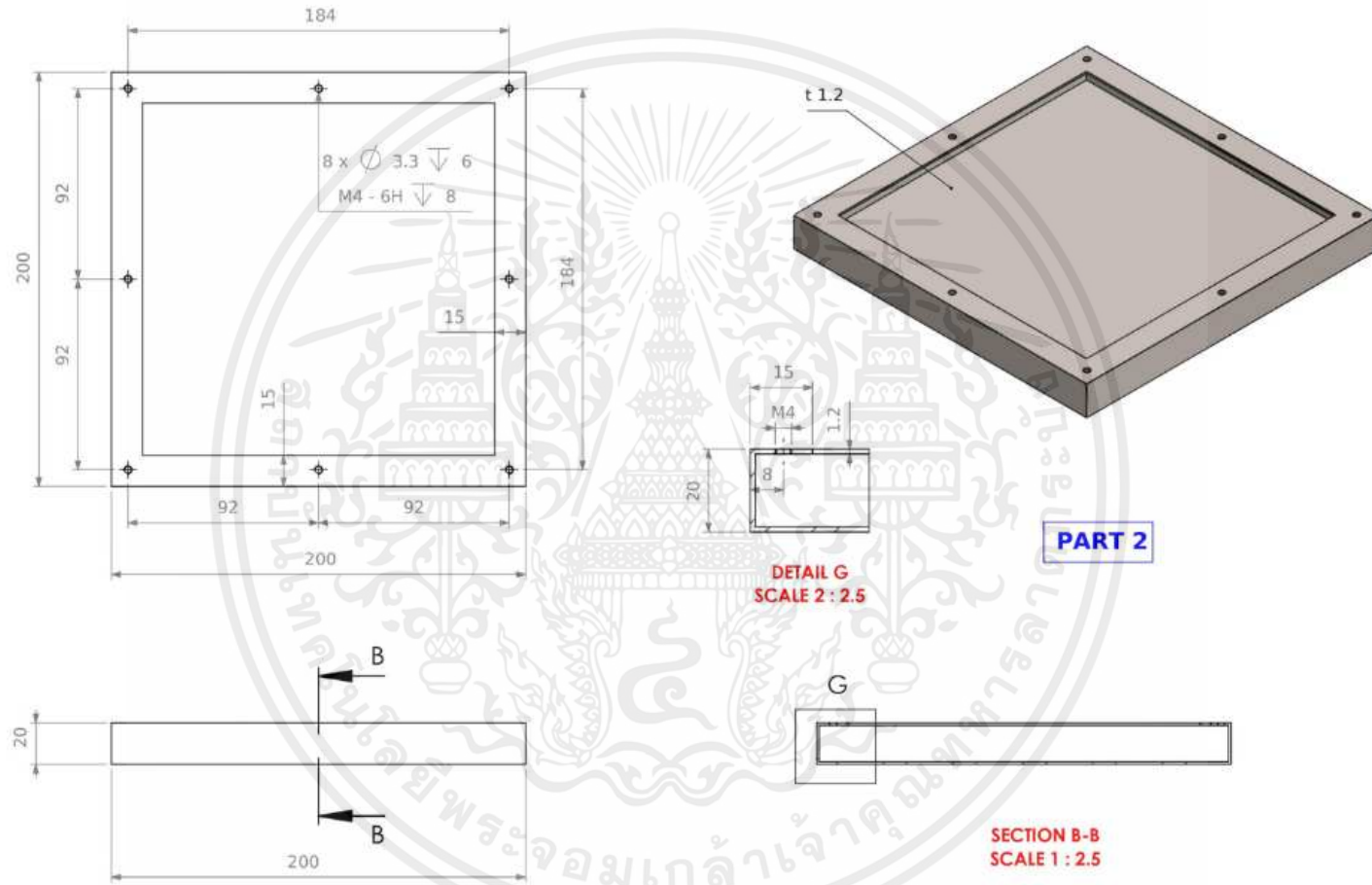
รูปที่ ข.2 ภาพฉายแสดงภาพรวมของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน



MAT : SUS 304

SCALE 1:4

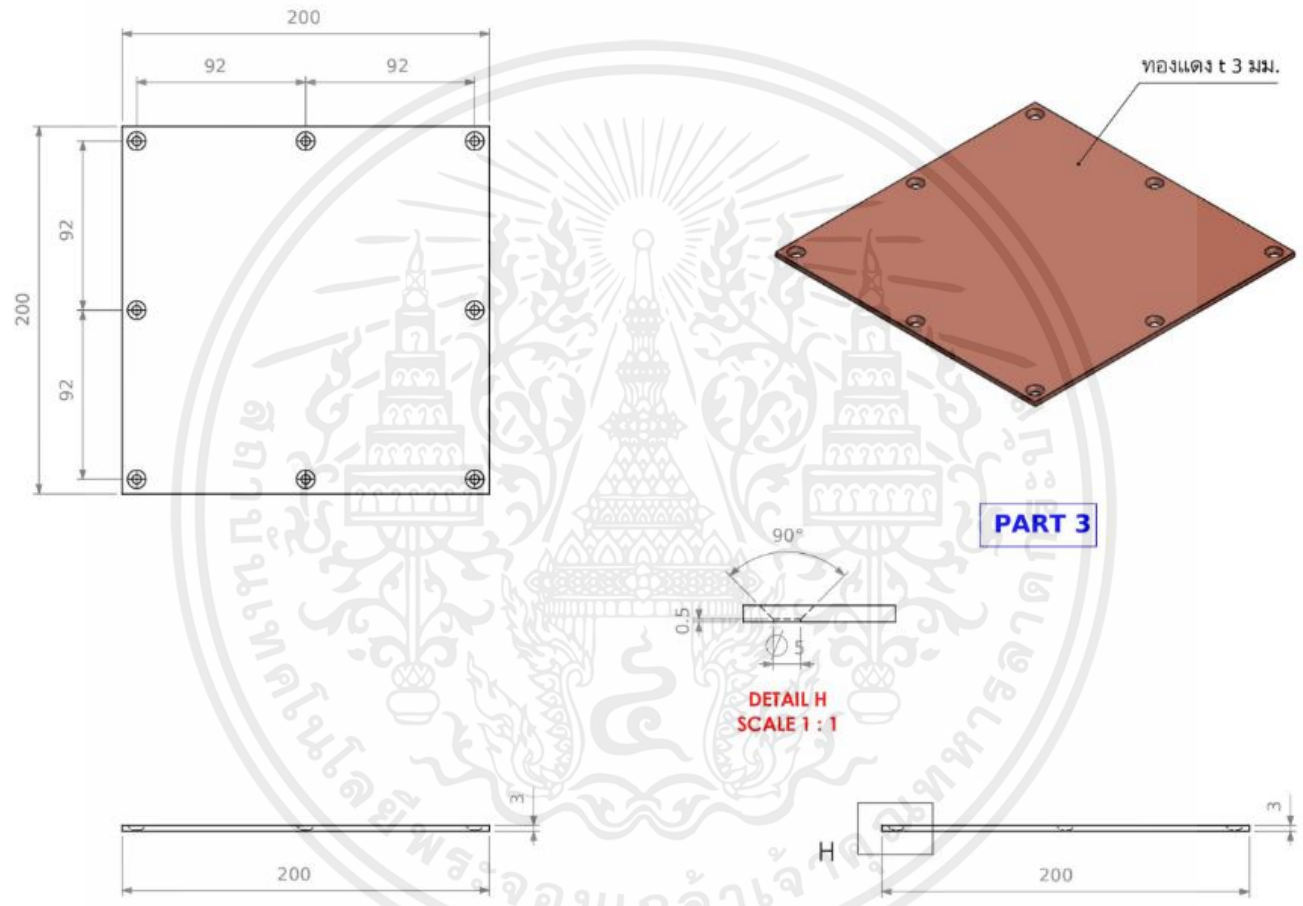
รูปที่ ข.3 ภาพฉายแสดงส่วนของเตาถ่านภายในอุปกรณ์



MAT : SUS 304

SCALE 1:2.5

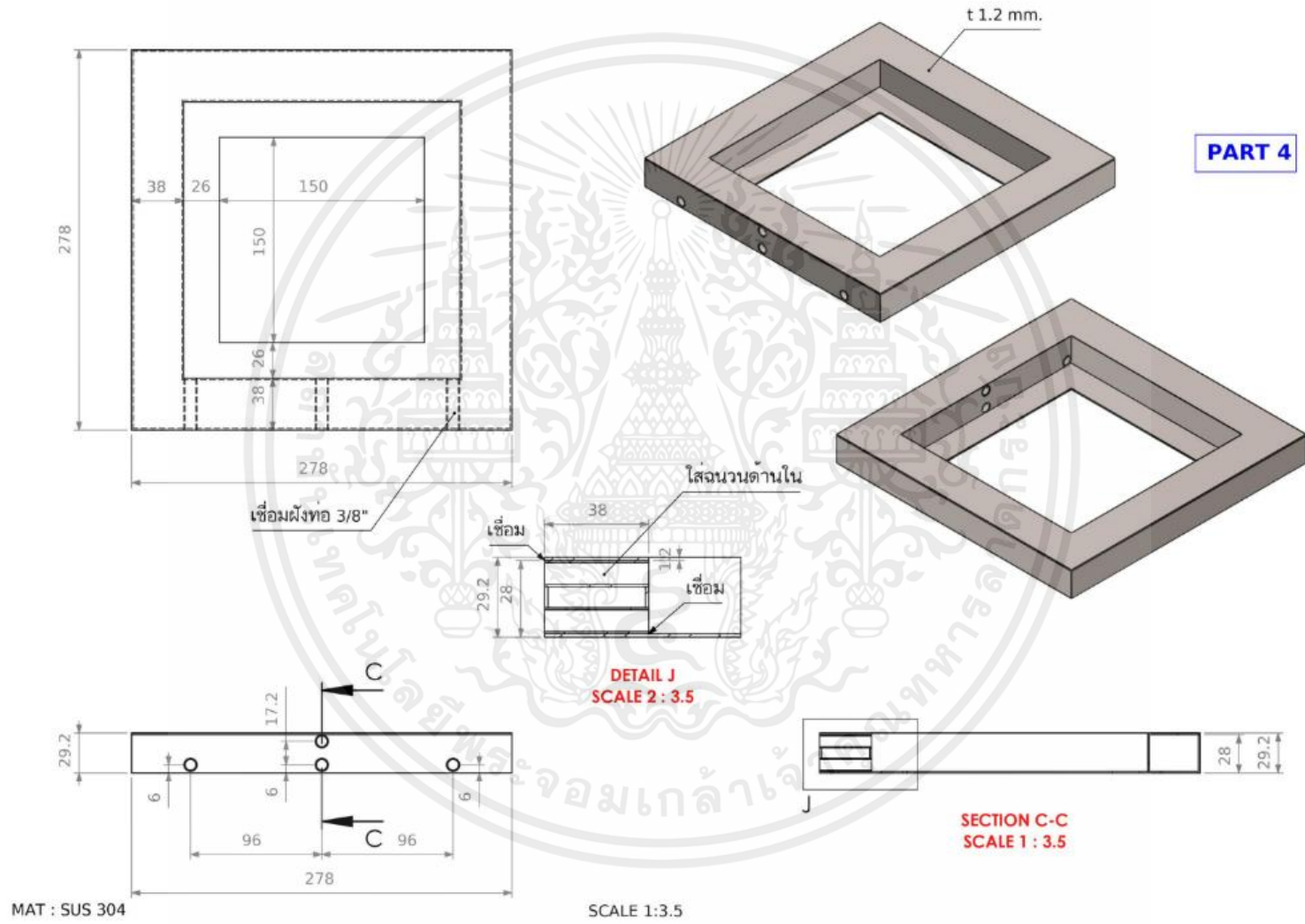
รูปที่ ข.4 ภาพฉายแสดงส่วนของกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส



MAT : SUS 304

SCALE 1:3

รูปที่ ข.5 ภาพฉายแสดงส่วนของฝาปิดกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส



รูปที่ ข.6 ภาพฉายแสดงส่วนของโครงอุปกรณ์สำหรับรองรับกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส

ภาคผนวก ค.

ภาพกระบวนการทดลอง



รูปที่ ค.1 การเตรียมการทดลองสำหรับการหาปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุเปลี่ยนเฟส



รูปที่ ค.2 การนำวัสดุเปลี่ยนเฟสไปรับความร้อนจากน้ำมัน และเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว เพื่อหาความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะของเหลว



รูปที่ ค.3 การนำวัสดุเปลี่ยนเฟสไประบายความร้อนภายในน้ำ และเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของแข็ง เพื่อหาความสูงของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะของแข็ง

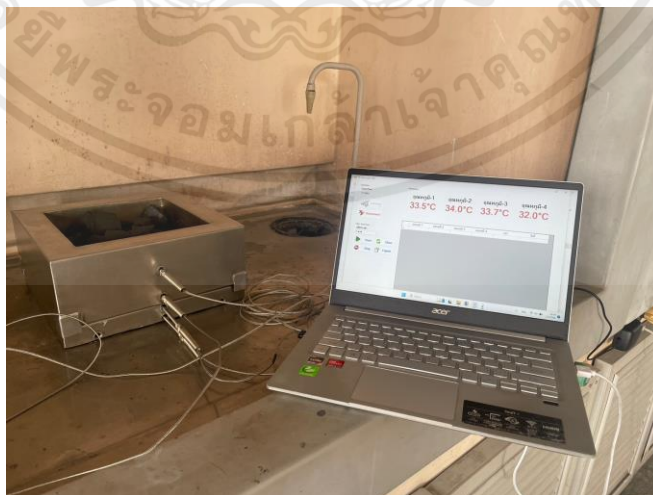
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 ชั้นเตาเผาถ่านภายในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง



รูปที่ ค.5 กล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส

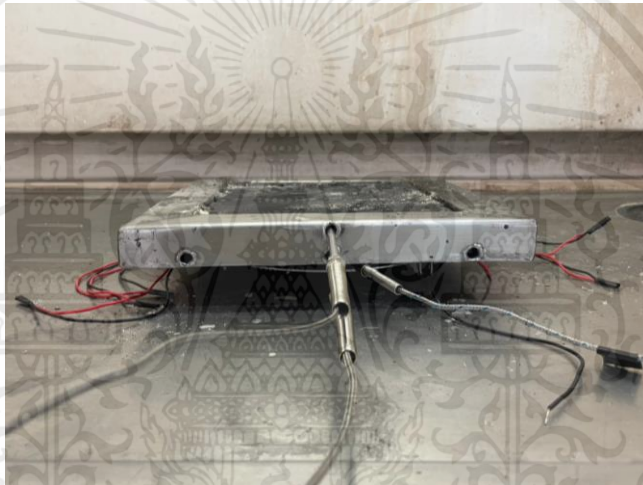


รูปที่ ค.6 การติดตั้งกล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสลงในช่องด้านล่างของเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.7 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมเครื่องมือวัด



รูปที่ ค.8 การนำกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสวางลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีไม่ได้ติดตั้งครีบบระบายความร้อน



รูปที่ ค.9 การนำกล่องวัสดุเปลี่ยนเฟสวางลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีติดตั้งครีบบระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ผลการทดลอง

ตารางที่ ง.1 ประวัติทางความร้อนของซีฟิ่งพาราฟิน C100PW

เวลา (นาท)	อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟส (°C)				อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (°C)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	34.5	36.5	34.2	35.1	35.2	34.5	34.0	34.6
1	57.0	51.2	56.5	54.9	36.2	34.2	34.0	34.8
2	88.5	73.8	63.7	75.3	36.2	38.7	33.7	36.2
3	120.8	109.5	119.8	116.7	38.2	42.5	34.0	38.2
4	129.0	111.8	130.8	123.9	33.2	42.5	32.7	36.1
5	135.8	119.5	135.5	130.3	34.2	40.7	33.0	36.0
6	136.3	131.3	136.0	134.5	38.5	33.7	33.2	35.1
7	62.7	58.0	60.2	60.3	35.7	33.7	33.7	34.4
8	53.2	50.0	50.7	51.3	36.0	34.0	33.7	34.6
9	49.7	47.2	46.7	47.9	35.5	33.5	34.0	34.3
10	47.7	45.0	46.7	46.5	35.5	34.0	34.0	34.5
11	45.5	42.7	42.7	43.6	35.5	34.0	33.7	34.4
12	42.7	40.7	40.2	41.2	35.7	33.7	33.2	34.2
13	41.0	38.5	38.5	39.3	36.0	33.2	33.7	34.3
14	40.2	37.2	37.5	38.3	35.5	34.0	33.7	34.4
15	39.5	36.7	36.5	37.6	35.0	34.0	33.7	34.2
16	38.2	36.0	36.0	36.7	35.5	33.5	33.5	34.2
17	38.2	35.2	35.2	36.2	35.2	34.2	33.7	34.4
18	38.5	35.7	35.5	36.6	35.2	33.5	33.7	34.1
19	37.5	35.2	35.0	35.9	35.0	33.5	33.7	34.1
20	38.0	35.2	35.0	36.1	35.5	33.5	33.7	34.2
21	37.5	35.2	35.0	35.9	35.2	34.2	33.7	34.4
22	37.7	34.5	35.0	35.7	35.5	34.0	33.7	34.4
23	37.7	35.2	34.5	35.8	35.2	34.0	34.0	34.4
24	37.7	35.0	35.0	35.9	35.5	33.5	34.0	34.3
25	38.0	35.0	35.0	36.0	35.5	34.2	33.5	34.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ประวัติทางความร้อนของซีเมนต์พาราฟิน C100PW (ต่อ)

เวลา (นาท)	อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลง (°C)				อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (°C)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
26	37.5	35.2	34.7	35.8	35.5	33.7	33.7	34.3
27	37.7	35.0	35.2	36.0	35.2	33.5	33.7	34.1
28	37.0	35.2	34.7	35.6	34.7	34.0	33.7	34.1
29	37.2	35.2	34.7	35.7	35.2	33.5	33.5	34.1
30	36.5	35.0	35.2	35.6	35.2	34.0	33.5	34.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ประวัติทางความร้อนของโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟส (°C)		อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (°C)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	36.2	33.7	33.2	32.7
1	67.5	43.2	33.5	34.7
2	102.8	61.2	33.7	32.7
3	129.0	100.0	33.7	33.2
4	68.8	127.3	34.0	32.5
5	50.5	67.5	34.0	33.5
6	38.7	51.7	34.0	33.2
7	37.0	43.2	34.0	33.5
8	37.0	38.2	33.5	34.0
9	35.7	36.2	33.7	33.7
10	35.0	35.5	33.5	33.0
11	35.2	34.2	33.7	33.2
12	35.2	34.5	33.5	33.0
13	35.0	34.7	33.5	33.2
14	35.7	35.0	33.7	33.5
15	35.0	34.7	34.0	33.5
16	52.5	35.0	34.0	33.0
17	61.5	34.7	34.0	33.5
18	61.7	34.5	33.7	33.5
19	61.7	34.7	33.5	33.5
20	61.2	34.7	33.7	33.2
21	61.2	34.5	33.7	33.2
22	61.7	35.2	33.7	33.2
23	62.0	35.0	33.7	33.0
24	61.7	35.2	34.0	33.2
25	61.5	35.2	33.7	33.0
26	61.0	35.0	34.0	33.5
27	61.0	35.0	33.2	32.7
28	60.2	35.2	33.7	32.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ประวัติทางความร้อนของโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟส (°C)		อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (°C)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1
29	50.7	35.0	34.0	33.2
30	38.7	34.7	34.0	33.5
31	36.5	35.0	34.0	33.2
32	35.5	34.7	34.0	33.0
33	36.2	34.2	34.0	33.2
34	36.2	34.5	34.0	33.2
35	36.0	34.5	34.0	33.5

หมายเหตุ: การทดลองดังกล่าวไม่ได้คำนวณค่าเฉลี่ย เนื่องจากโซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต

เกิดสถานะความเย็นยิ่งยวด (Supercooling) ในการทดลองครั้งที่ 2

ซึ่งส่งผลทำให้ประวัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนเฟสมีความแตกต่างกัน

ตารางที่ ง.3 ประวัติทางความร้อนของอิริทริทอล

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟส (°C)				อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (°C)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	34.5	34.0	35.0	34.5	33.2	32.7	32.7	32.9
1	98.5	119.3	116.3	111.4	33.2	34.7	32.7	33.5
2	122.0	128.8	126.8	125.9	33.5	32.7	33.2	33.1
3	123.0	123.3	129.3	125.2	33.7	33.2	33.5	33.5
4	126.8	125.5	128.8	127.0	33.7	32.5	33.2	33.1
5	129.0	128.5	126.3	127.9	34.0	33.5	33.0	33.5
6	136.0	136.0	128.5	133.5	34.0	33.2	33.2	33.5
7	131.0	141.8	125.8	132.9	34.0	33.5	33.2	33.6
8	140.5	78.5	130.8	116.6	34.0	34.0	33.5	33.8
9	63.0	86.8	92.5	80.8	33.5	33.7	33.0	33.4
10	52.0	49.7	69.3	57.0	33.7	33.0	33.5	33.4
11	42.0	37.2	46.2	41.8	33.5	33.2	33.5	33.4
12	36.7	35.5	37.0	36.4	33.7	33.0	33.5	33.4
13	35.5	35.0	35.2	35.2	33.5	33.2	33.5	33.4
14	35.7	35.0	35.2	35.3	33.5	33.5	33.5	33.5
15	35.5	35.2	35.0	35.2	33.7	33.5	33.5	33.6
16	36.0	34.7	35.0	35.2	34.0	33.0	33.5	33.5
17	35.7	34.7	34.7	35.0	34.0	33.5	33.5	33.7
18	36.0	34.7	35.0	35.2	34.0	33.5	33.5	33.7
19	36.2	34.7	35.0	35.3	33.7	33.5	33.5	33.6
20	35.5	34.7	35.0	35.1	33.5	33.5	33.5	33.5
21	35.5	34.7	35.5	35.2	33.7	33.5	33.5	33.6
22	36.0	34.7	35.2	35.3	33.7	33.5	33.5	33.6
23	36.0	34.7	35.0	35.2	33.7	33.5	33.5	33.6
24	36.0	34.7	35.2	35.3	33.7	33.5	33.5	33.6
25	36.2	34.7	35.5	35.5	34.0	33.5	33.5	33.7
26	35.0	34.7	35.2	35.0	33.7	33.5	33.5	33.6
27	36.0	34.7	35.0	35.2	34.0	33.5	33.5	33.7
28	35.5	34.7	35.2	35.1	33.2	33.5	33.5	33.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ประวัติทางความร้อนของอิทธิพล (ต่อ)

เวลา (นาท)	อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟส (°C)				อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (°C)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
29	36.0	34.7	34.7	35.1	33.7	33.5	33.5	33.6
30	35.5	34.7	35.2	35.1	34.0	33.5	33.5	33.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 การทดลองหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

วัสดุเปลี่ยนเฟส	ความสูงของวัสดุเปลี่ยนในแต่ละวัฏภาค (เซนติเมตร)										ร้อยละ การเปลี่ยนแปลง ปริมาตร
	วัฏภาคของเหลว					วัฏภาคของแข็ง					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
ซีฟิ่งพาราฟิน C100PW	5.05	5.00	5.00	5.02	0.029	4.65	4.65	4.70	4.67	0.029	7.50
โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต	3.10	3.05	3.05	3.07	0.029	2.75	2.80	2.80	2.78	0.029	10.18
อิริทริทอล	3.10	3.05	3.10	3.08	0.029	2.60	2.55	2.60	2.58	0.029	19.36

ตารางที่ ง.5 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
0	35.5	35.5	35.2	35.0
1	51.8	39.5	35.5	36.0
2	70.8	50.0	36.7	35.7
3	91.0	53.7	37.0	36.0
4	110.0	74.5	38.0	36.0
5	213.5	128.3	42.0	37.0
6	480.7	126.3	41.0	36.5
7	652.7	139.5	42.0	37.5
8	815.2	155.3	46.7	38.7
9	845.5	243.5	60.2	41.2
10	903.2	247.3	74.8	45.7
11	884.5	295.2	87.0	49.2
12	967.0	372.5	106.8	55.5
13	943.7	456.5	133.3	65.0
14	974.2	427.7	183.0	80.0
15	946.7	443.5	188.5	88.0
16	980.5	442.0	182.8	90.0
17	967.2	437.0	180.0	98.0
18	953.7	472.5	172.3	96.5
19	954.2	453.5	173.5	98.8
20	923.7	465.7	183.8	104.3
21	964.5	402.7	191.8	110.3
22	958.5	393.5	183.5	111.8
23	951.7	391.5	182.0	115.3
24	942.5	400.0	182.0	118.3
25	924.5	377.5	178.8	120.5
26	924.2	419.5	176.8	120.3
27	895.0	333.7	193.3	136.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
28	869.7	346.7	191.3	138.5
29	790.0	362.7	197.8	142.8
30	788.3	379.5	199.8	145.8

ตารางที่ ง.6 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
0	0.68	19.1	120.3	33.1	12.988
1	3.81	118.1	114.3	35.8	449.961
2	3.31	98.1	92.0	69.3	324.711
3	3.12	69.2	91.8	77.6	215.904
4	2.51	66.3	85.0	78.3	166.413
5	2.32	57.8	80.0	79.1	134.096
6	2.05	53.0	77.8	76.5	108.650
7	1.97	48.8	76.3	73.5	96.136
8	1.95	45.9	74.6	70.3	89.505
9	1.86	44.0	73.2	67.5	81.840
10	1.82	42.8	70.9	65.5	77.896
11	1.75	41.5	69.8	63.2	72.625
12	1.72	37.2	68.3	62.5	63.984
13	1.50	36.4	67.1	60.7	54.600
14	1.51	34.5	65.3	58.0	52.095
15	1.52	34.1	63.7	57.0	51.832
16	1.34	32.1	62.5	55.7	43.014
17	1.33	30.2	61.5	55.0	40.166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.6 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
18	1.31	29.2	60.2	53.5	38.252
19	1.23	28.1	59.1	52.7	34.563
20	1.08	25.0	58.2	51.7	27.000
21	1.14	26.0	57.0	51.2	29.640
22	1.04	24.6	56.3	50.5	25.584
23	1.09	24.5	55.3	49.7	26.705
24	0.98	22.4	54.3	49.2	21.952
25	0.85	21.3	54.0	48.0	18.105
26	0.80	20.5	53.5	47.7	16.400
27	0.80	20.1	52.6	47.0	16.080
28	0.79	19.8	52.1	46.5	15.642
29	0.83	20.1	51.1	45.7	16.683
30	0.84	20.4	50.2	45.0	17.136
31	0.78	20.1	50.0	44.7	15.678
32	0.85	19.9	49.6	44.7	16.915
33	0.80	19.0	48.9	44.7	15.200
34	0.80	20.0	48.5	44.7	16.000
35	0.71	19.2	48.9	44.5	13.632
36	0.73	18.1	48.4	44.7	13.213
37	0.76	18.1	47.9	43.5	13.756
38	0.80	19.8	47.4	43.2	15.840
39	0.77	19.3	47.0	43.2	14.861
40	0.74	19.1	47.2	43.5	14.134
41	0.76	19.7	47.1	43.5	14.972
42	0.81	19.0	46.4	43.0	15.390
43	0.75	19.1	46.5	42.2	14.325

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.6 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
44	0.71	18.0	46.5	42.5	12.780
45	0.70	16.8	46.6	42.5	11.760
46	0.68	17.3	46.7	42.2	11.764
47	0.65	15.9	46.7	42.0	10.335
48	0.68	16.9	46.5	41.5	11.492
49	0.68	16.1	46.2	42.0	10.948
50	0.64	16.0	46.5	42.0	10.240
51	0.64	15.5	46.2	42.2	9.920
52	0.69	16.2	45.9	41.5	11.178
53	0.66	16.4	45.5	42.2	10.824
54	0.68	16.5	45.6	41.7	11.220
55	0.69	16.6	45.2	41.2	11.454
56	0.60	15.9	46.0	40.8	9.540
57	0.57	13.6	46.0	40.9	7.752
58	0.56	13.4	46.2	41.1	7.504
59	0.52	13.7	46.3	40.2	7.124
60	0.58	13.8	46.4	40.6	8.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
0	37.5	36.5	36.0	35.5
1	67.5	45.3	38.7	38.5
2	102.5	52.5	38.5	38.7
3	214.5	57.3	38.7	38.5
4	325.2	69.5	38.7	38.5
5	335.5	67.7	39.2	38.0
6	391.8	76.0	39.5	38.5
7	415.2	95.5	42.0	39.2
8	460.5	123.5	43.2	47.2
9	729.5	137.8	42.7	40.0
10	898.2	155.0	47.2	41.7
11	903.5	226.8	50.0	43.2
12	904.5	309.2	55.0	45.0
13	959.2	336.7	61.5	46.5
14	940.7	419.0	71.3	50.0
15	948.5	453.5	83.0	55.2
16	915.0	469.5	97.8	63.2
17	893.5	506.7	107.8	66.3
18	863.2	479.5	122.8	71.3
19	893.0	510.5	130.3	73.0
20	936.7	676.5	133.3	76.0
21	893.7	577.0	145.8	80.0
22	884.7	669.7	156.0	83.5
23	923.5	556.2	159.8	87.8
24	915.2	537.5	165.0	92.0
25	934.2	514.7	164.5	95.0
26	922.2	523.5	167.8	98.3
27	943.2	506.7	166.0	101.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
28	941.7	500.2	170.3	104.8
29	941.7	500.2	167.5	107.0
30	929.7	501.2	177.3	113.8

ตารางที่ ง.8 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร

เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
0	0.67	19.2	119.3	33.5	12.864
1	3.83	122.1	107.3	35.7	467.643
2	3.71	114.9	123.5	36.6	426.279
3	3.60	87.0	112.5	43.0	313.200
4	3.16	72.9	107.3	47.1	230.364
5	2.78	53.9	103.3	50.6	149.842
6	2.45	48.2	108.5	56.8	118.090
7	2.30	50.0	97.8	60.6	115.000
8	2.14	49.8	91.8	66.2	106.572
9	2.12	48.7	86.5	70.2	103.244
10	2.09	44.1	81.3	72.6	92.169
11	1.96	40.6	79.0	74.2	79.576
12	1.83	38.3	76.3	74.1	70.089
13	1.73	36.8	73.8	72.3	63.664
14	1.70	36.3	74.2	72.8	61.710
15	1.65	34.7	72.0	69.5	57.255
16	1.61	35.0	70.4	67.0	56.350
17	1.56	35.6	68.5	65.0	55.536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖.8 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
18	1.51	34.1	68.3	62.7	51.491
19	1.50	32.9	67.2	61.2	49.350
20	1.38	30.8	66.0	60.5	42.504
21	1.33	27.0	66.8	58.2	35.910
22	1.16	26.4	66.8	52.5	30.624
23	1.10	25.1	66.6	67.5	27.610
24	1.08	23.8	65.8	60.2	25.704
25	1.17	25.2	67.0	63.8	29.484
26	1.19	26.0	65.5	62.3	30.940
27	1.30	31.4	63.2	58.8	40.820
28	1.61	32.0	59.5	53.9	51.520
29	1.60	36.0	52.5	51.3	57.600
30	1.53	37.6	57.0	49.6	57.528
31	1.50	33.7	55.0	48.8	50.550
32	1.52	35.4	53.5	47.8	53.808
33	1.42	34.1	53.2	47.3	48.422
34	1.23	30.3	50.5	47.6	37.269
35	1.18	27.0	50.0	47.5	31.860
36	1.15	27.2	50.0	46.7	31.280
37	1.13	27.4	48.7	45.7	30.962
38	1.06	26.2	47.7	45.2	27.772
39	1.02	24.5	48.5	44.5	24.990
40	0.97	23.6	47.0	44.1	22.892
41	0.91	23.4	47.2	43.5	21.294
42	0.87	22.5	45.7	43.4	19.575
43	0.90	22.7	45.2	42.7	20.430

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.8 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
44	0.86	22.0	44.5	43.6	18.920
45	0.87	21.7	45.2	42.6	18.879
46	0.84	21.6	45.2	42.8	18.144
47	0.81	21.0	45.0	42.4	17.010
48	0.78	19.7	44.0	42.9	15.366
49	0.80	21.2	43.0	42.2	16.960
50	0.86	21.5	43.5	41.6	18.490
51	0.81	21.6	43.0	41.8	17.496
52	0.82	20.4	43.5	41.2	16.728
53	0.84	20.8	43.5	41.7	17.472
54	0.81	21.6	42.0	40.5	17.496
55	0.82	20.6	42.2	40.4	16.892
56	0.77	20.5	41.7	40.6	15.785
57	0.78	19.6	41.0	40.3	15.288
58	0.81	19.6	40.7	40.0	15.876
59	0.83	21.3	41.0	39.4	17.679
60	0.79	20.7	40.7	39.8	16.353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
0	35.7	35.5	35.2	34.7
1	127.9	44.2	36.5	35.2
2	408.5	59.7	36.2	34.7
3	509.7	72.0	37.5	35.5
4	522.0	108.3	38.0	36.2
5	637.7	372.5	39.2	36.7
6	868.0	520.5	40.2	37.0
7	853.5	295.5	47.0	40.0
8	885.2	284.7	54.0	54.0
9	869.0	318.5	62.0	54.0
10	830.7	359.5	70.5	52.0
11	840.7	409.7	87.5	51.7
12	897.5	429.2	103.3	55.2
13	859.2	475.0	102.5	58.2
14	866.0	562.5	113.0	65.0
15	870.2	560.0	127.5	72.0
16	845.2	525.2	137.0	78.8
17	870.0	604.2	142.8	82.8
18	815.5	471.0	172.3	87.0
19	760.5	469.2	186.5	89.3
20	679.2	452.0	190.0	91.3
21	751.7	387.2	193.5	94.8
22	881.5	398.5	232.3	95.3
23	880.2	399.5	230.8	96.5
24	824.0	377.2	215.8	96.3
25	816.7	346.2	193.0	99.0
26	35.7	361.5	164.5	99.8
27	127.9	345.0	170.0	99.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 30 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
28	851.2	323.2	175.5	100.8
29	867.2	339.5	152.3	97.0
30	786.5	313.2	157.0	94.5

ตารางที่ ง.10 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
0	0.10	8.2	85.0	33.6	0.820
1	2.17	56.4	80.8	34.1	122.388
2	1.96	42.0	70.5	51.1	82.320
3	1.74	38.6	78.0	54.0	67.164
4	1.62	34.2	78.3	58.2	55.404
5	1.34	31.2	75.3	60.9	41.808
6	1.22	29.6	75.8	63.1	36.112
7	1.17	26.7	72.3	63.2	31.239
8	1.12	24.3	72.3	64.3	27.216
9	1.02	23.2	68.5	64.5	23.664
10	0.90	20.8	66.0	65.3	18.720
11	0.92	20.9	64.9	64.5	19.228
12	0.85	20.0	64.5	62.3	17.000
13	0.84	19.1	63.7	61.5	16.044
14	0.85	18.7	63.3	60.5	15.895
15	0.75	17.2	62.8	60.2	12.900
16	0.74	17.1	62.8	59.0	12.654
17	0.73	16.3	61.9	58.7	11.899

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 30 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
18	0.68	15.1	61.4	58.2	10.268
19	0.68	15.3	61.0	57.5	10.404
20	0.68	15.6	59.9	57.2	10.608
21	0.65	15.4	59.1	55.7	10.010
22	0.67	14.2	58.4	55.7	9.514
23	0.65	14.9	57.7	54.0	9.685
24	0.60	14.2	57.6	53.0	8.520
25	0.56	13.4	57.0	52.2	7.504
26	0.56	12.5	56.5	52.5	7.000
27	0.54	12.2	56.0	52.7	6.588
28	0.49	12.1	55.8	50.2	5.929
29	0.48	11.5	54.9	49.0	5.520
30	0.46	10.9	54.8	49.7	5.014
31	0.49	11.8	54.2	49.7	5.782
32	0.45	11.1	53.8	48.7	4.995
33	0.47	12.1	53.6	49.2	5.687
34	0.48	11.3	53.6	49.0	5.424
35	0.48	11.6	53.4	50.0	5.568
36	0.48	10.9	52.6	48.2	5.232
37	0.42	10.8	52.5	49.0	4.536
38	0.46	11.6	52.4	47.5	5.336
39	0.50	11.6	52.0	48.7	5.800
40	0.49	12.0	52.1	46.7	5.880
41	0.46	11.6	51.9	48.0	5.336
42	0.49	11.7	51.6	46.5	5.733
43	0.51	12.4	50.9	47.2	6.324

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 30 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
44	0.48	12.1	51.1	47.5	5.808
45	0.53	13.0	50.9	46.5	6.890
46	0.50	12.5	50.2	46.7	6.250
47	0.53	12.2	50.9	47.7	6.466
48	0.46	11.6	50.5	47.0	5.336
49	0.48	11.5	50.5	48.2	5.520
50	0.48	11.6	50.6	46.5	5.568
51	0.49	11.7	50.1	46.7	5.733
52	0.44	12.1	50.3	46.5	5.324
53	0.47	11.6	50.0	46.5	5.452
54	0.45	11.2	50.2	46.0	5.040
55	0.46	11.0	50.0	47.0	5.060
56	0.49	11.5	49.8	46.7	5.635
57	0.46	10.9	49.5	46.2	5.014
58	0.44	10.6	49.5	45.5	4.664
59	0.47	11.0	49.6	45.2	5.170
60	0.46	11.0	49.5	44.7	5.060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.11 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน เมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อน
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร

เวลา (นาที)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
0	34.2	33.7	33.7	32.5
1	157.3	33.7	34.2	32.7
2	284.3	36.2	34.2	33.0
3	450.5	41.0	34.5	33.2
4	545.3	56.5	34.7	33.2
5	638.0	84.3	35.7	34.5
6	760.2	100.5	38.0	35.5
7	815.7	115.5	39.0	37.0
8	829.0	163.0	43.2	40.2
9	857.5	209.5	47.7	47.0
10	905.7	319.0	66.0	59.5
11	894.5	416.0	89.0	67.0
12	938.7	522.7	130.0	76.5
13	947.0	546.0	147.0	87.3
14	948.7	558.0	176.5	93.8
15	966.7	552.0	192.8	107.5
16	972.0	549.2	196.0	114.8
17	978.5	547.5	226.8	123.3
18	979.5	546.5	227.0	127.3
19	983.7	543.7	231.0	133.8
20	984.2	542.7	240.5	137.8
21	985.0	543.5	232.0	141.8
22	991.0	545.7	231.3	146.8
23	992.2	546.2	228.3	149.0
24	1000.2	544.0	222.0	150.0
25	1007.7	538.0	218.8	151.3
26	998.0	527.5	213.8	146.5
27	993.0	522.5	206.5	143.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.11 อุณหภูมิภายในเตาถ่านขณะให้ความร้อน เมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อน
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ แต่ละตำแหน่ง (°C)			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
28	991.0	520.5	198.3	143.3
29	980.5	519.5	187.8	142.5
30	976.0	518.7	186.5	142.3

ตารางที่ ง.12 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อน
กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร

เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
0	0.77	20.0	120.3	33.0	15.400
1	10.14	200.0	118.2	39.2	2028.000
2	8.91	196.8	110.2	46.1	1753.488
3	7.30	176.5	102.3	34.1	1288.450
4	6.50	161.7	99.3	59.6	1051.050
5	5.53	140.0	94.0	60.7	774.200
6	5.02	123.4	93.0	62.3	619.468
7	4.48	109.6	91.0	63.1	491.008
8	3.91	96.4	86.3	64.1	376.924
9	3.43	84.3	79.8	64.5	289.149
10	3.18	77.6	75.3	65.2	246.768
11	3.06	73.6	74.8	65.1	225.216
12	2.55	64.1	75.3	65.1	163.455
13	2.51	59.3	71.5	63.7	148.843
14	2.46	60.3	67.8	62.9	148.338
15	2.37	56.5	65.8	61.5	133.905
16	2.31	55.1	61.7	60.4	127.281
17	2.25	55.0	61.0	58.6	123.750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.12 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อน กรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิแผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิแผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
18	2.13	53.0	57.7	57.6	112.890
19	2.04	50.3	56.7	56.0	102.612
20	2.01	53.2	54.0	55.3	106.932
21	1.73	43.7	53.5	54.4	75.601
22	1.63	41.7	51.5	53.9	67.971
23	1.55	40.0	52.0	53.2	62.000
24	1.59	40.0	51.2	52.3	63.600
25	1.50	37.7	51.2	51.6	56.550
26	1.51	38.8	50.5	50.8	58.588
27	1.52	39.1	50.2	50.1	59.432
28	1.61	39.8	49.2	48.4	64.078
29	1.83	49.2	47.7	46.8	90.036
30	1.88	48.9	45.7	45.5	91.932
31	1.92	50.1	46.5	44.6	96.192
32	1.92	49.6	45.5	43.5	95.232
33	1.83	49.4	43.7	43.4	90.402
34	1.70	45.1	44.0	43.3	76.670
35	1.54	41.8	42.7	43.6	64.372
36	1.44	39.1	43.5	43.9	56.304
37	1.41	36.6	43.7	43.8	51.606
38	1.31	35.2	44.2	44.1	46.112
39	1.26	33.8	44.5	44.0	42.588
40	1.25	33.3	44.2	43.8	41.625
41	1.29	34.3	45.2	43.3	44.247
42	1.27	34.0	44.5	43.0	43.180
43	1.27	33.1	43.7	42.6	42.037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.12 ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณแผ่นด้านร้อน แผ่นด้านเย็น และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อติดตั้งเครื่องระบายความร้อนกรณีวัสดุเปลี่ยนเฟสความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร (ต่อ)

เวลา (นาท)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (mA)	อุณหภูมิ แผ่นด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิ แผ่นด้านเย็น (°C)	กำลังไฟฟ้า (mW)
44	1.24	33.1	42.5	43.7	41.044
45	1.22	32.9	42.5	42.3	40.138
46	1.21	32.0	43.0	42.0	38.720
47	1.21	31.7	42.5	41.8	38.357
48	1.22	31.5	42.7	42.0	38.430
49	1.20	32.1	42.7	41.5	38.520
50	1.20	31.6	42.2	41.4	37.920
51	1.20	31.6	42.2	41.1	37.920
52	1.23	32.6	42.2	40.8	40.098
53	1.28	33.7	40.7	40.1	43.136
54	1.27	33.9	42.5	39.9	43.053
55	1.29	34.0	41.7	39.5	43.860
56	1.25	34.2	41.7	39.4	42.750
57	1.24	33.9	41.7	39.2	42.036
58	1.22	33.3	41.0	39.0	40.626
59	1.18	32.1	41.0	39.1	37.878
60	1.16	31.9	41.0	39.0	37.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

สมการสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อน ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง

การวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในปริภูมิตวินนี้ จะวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขโดยการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นสมการพีชคณิต ซึ่งการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะกำหนดสมมติฐานให้เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ และการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะไม่คงตัว ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีชัดแจ้ง (Explicit method) ซึ่งสมการสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในแต่ละโหนด ณ คาบเวลาต่างๆ สามารถพิสูจน์ในแต่ละกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 อุณหภูมิบริเวณโหนดที่ 1 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่าน

การถ่ายเทความร้อนที่พิจารณาภายในโหนดที่ 1 ประกอบไปด้วยพลักซ์ความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่าน การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถแสดงสมการดุลพลังงานบริเวณจุดโหนดดังกล่าวได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{coal}} - \dot{Q}_{\text{rad}} - \dot{Q}_{\text{conv}} - \dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\Delta E_{\text{element}}}{\Delta t}$$

เมื่อพิจารณาจากสมการข้างต้น จะสามารถจัดรูปให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิได้ดังนี้

$$\dot{q}_{\text{coal}} A - \dot{q}_{\text{rad}} A - \dot{q}_{\text{conv}} A - kA \frac{T_m - T_{m+1}}{\Delta x} = \rho A \left(\frac{\Delta x}{2} \right) c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

นำ A หาดตลอดสมการ และนำ $\frac{\Delta x}{k}$ คูณตลอดสมการ

$$\frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{coal}} - \frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{rad}} - \frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{conv}} - (T_m - T_{m+1}) = \frac{\rho c_p}{k} \cdot \frac{(\Delta x)^2}{2} \cdot \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

เนื่องจาก $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ ดังนั้น

$$\frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{coal}} - \frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{rad}} - \frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{conv}} - (T_m - T_{m+1}) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{(\Delta x)^2}{2} \cdot \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

เนื่องจาก $\tau = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$ ดังนั้น

$$\frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{coal}} - \frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{rad}} - \frac{\Delta x}{k} \dot{q}_{\text{conv}} - (T_m - T_{m+1}) = \frac{1}{2\tau} \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

$$\frac{\Delta x}{k} (\dot{q}_{\text{coal}} - \dot{q}_{\text{rad}} - \dot{q}_{\text{conv}}) - (T_m - T_{m+1}) = \frac{1}{2\tau} \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้วิธีซัดแฉงในการวิเคราะห์อุณหภูมิในคาบเวลาถัดไป ดังนี้

$$\frac{\Delta x}{k} (\dot{q}_{\text{coal}} - \dot{q}_{\text{rad}} - \dot{q}_{\text{conv}}) - (T_m^i - T_{m+1}^i) = \frac{1}{2\tau} \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

จัดรูปสมการข้างต้นให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิ ณ คาบเวลาถัดไป (T_m^{i+1})

$$T_m^{i+1} - T_m^i = \frac{2\tau\Delta x}{k} (\dot{q}_{\text{coal}} - \dot{q}_{\text{rad}} - \dot{q}_{\text{conv}}) - 2\tau(T_m^i - T_{m+1}^i)$$

$$T_m^{i+1} = (1 - 2\tau)T_m^i + 2\tau T_{m+1}^i + \frac{2\tau\Delta x}{k} (\dot{q}_{\text{coal}} - \dot{q}_{\text{rad}} - \dot{q}_{\text{conv}})$$

กรณีที่ 2 อุณหภูมิบริเวณโหนดที่ 2 ถึงโหนดที่ 55

การถ่ายเทความร้อนที่พิจารณาภายในโหนดที่ 2 ถึงโหนดที่ 55 ประกอบไปด้วยฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อนเท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงสมการดุลพลังงานบริเวณจุดโหนดดังกล่าวได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{top}} - \dot{Q}_{\text{bottom}} = \frac{\Delta E_{\text{element}}}{\Delta t}$$

เมื่อพิจารณาจากสมการข้างต้น จะสามารถจัดรูปให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิได้ดังนี้

$$kA \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} - kA \frac{T_m - T_{m+1}}{\Delta x} = \rho A \Delta x c_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

นำ A ทหารตลอดสมการ และนำ $\frac{\Delta x}{k}$ คูณตลอดสมการ

$$(T_{m-1} - T_m) - (T_m - T_{m+1}) = \frac{\rho(\Delta x)^2 c_p}{k} \cdot \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

เนื่องจาก $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ ดังนี้

$$T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1} = \frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t} \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

เนื่องจาก $\tau = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$ ดังนี้

$$T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1} = \frac{1}{\tau} \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

ใช้วิธีซัดแฉงในการวิเคราะห์อุณหภูมิในคาบเวลาถัดไป ดังนี้

$$T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i = \frac{1}{\tau} \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการข้างต้นให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิ ณ คาบเวลาถัดไป (T_m^{i+1})

$$\begin{aligned} T_m^{i+1} - T_m^i &= \tau T_{m-1}^i - 2\tau T_m^i + \tau T_{m+1}^i \\ T_m^{i+1} &= \tau T_{m-1}^i + (1 - 2\tau)T_m^i + \tau T_{m+1}^i \end{aligned}$$

กรณีที่ 3 อุณหภูมิบริเวณโหนดที่ 56 ซึ่งเป็นการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิว

การถ่ายเทความร้อนที่พิจารณาภายในโหนดที่ 56 ประกอบไปด้วยฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อนเท่านั้น แต่จะพิจารณาเป็นกรณีที่มีเงื่อนไขขอบเขตโดยการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวของอากาศ และทองแดง ซึ่งสามารถแสดงสมการดุลพลังงานบริเวณจุดโหนดดังกล่าวได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{top}} - \dot{Q}_{\text{bottom}} = \frac{\Delta E_{\text{element}}}{\Delta t}$$

เมื่อพิจารณาจากสมการข้างต้น จะสามารถจัดรูปให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิได้ดังนี้

$$k_A A \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} - k_B A \frac{T_m - T_{m+1}}{\Delta x} = \left(\rho_A A \frac{\Delta x}{2} c_{p,A} + \rho_B A \frac{\Delta x}{2} c_{p,B} \right) \cdot \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

นำ A หารตลอดสมการ และนำ $\frac{\Delta x}{k_A k_B}$ คูณตลอดสมการ

$$\frac{1}{k_B} (T_{m-1} - T_m) - \frac{1}{k_A} (T_m - T_{m+1}) = \left(\frac{\rho_A (\Delta x)^2 c_{p,A}}{2k_A k_B} + \frac{\rho_B (\Delta x)^2 c_{p,B}}{2k_A k_B} \right) \cdot \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

เนื่องจาก $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ ดังนั้น

$$\frac{1}{k_B} (T_{m-1} - T_m) - \frac{1}{k_A} (T_m - T_{m+1}) = \left(\frac{(\Delta x)^2}{2\alpha_A k_B} + \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha_B k_A} \right) \cdot \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

นำ $k_A k_B$ คูณตลอดสมการ

$$k_A (T_{m-1} - T_m) - k_B (T_m - T_{m+1}) = \left(\frac{k_A (\Delta x)^2}{2\alpha_A \Delta t} + \frac{k_B (\Delta x)^2}{2\alpha_B \Delta t} \right) \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

เนื่องจาก $\tau = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$ ดังนั้น

$$k_A (T_{m-1} - T_m) - k_B (T_m - T_{m+1}) = \left(\frac{k_A}{2\tau_A} + \frac{k_B}{2\tau_B} \right) \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_A(T_{m-1} - T_m) - k_B(T_m - T_{m+1}) = \left(\frac{\tau_B k_A + \tau_A k_B}{2\tau_A \tau_B} \right) \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

ใช้วิธีตัดแฉ่งในการวิเคราะห์อุณหภูมิในคาบเวลาถัดไป ดังนี้

$$k_A(T_{m-1}^i - T_m^i) - k_B(T_m^i - T_{m+1}^i) = \left(\frac{\tau_B k_A + \tau_A k_B}{2\tau_A \tau_B} \right) \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

จัดรูปสมการข้างต้นให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิ ณ คาบเวลาถัดไป (T_m^{i+1})

$$2\tau_A \tau_B k_A (T_{m-1}^i - T_m^i) - 2\tau_A \tau_B k_B (T_m^i - T_{m+1}^i) = (\tau_B k_A + \tau_A k_B) \cdot (T_m^{i+1} - T_m^i)$$

ดังนั้น

$$T_m^{i+1} = \frac{2\tau_A \tau_B k_A (T_{m-1}^i - T_m^i) - 2\tau_A \tau_B k_B (T_m^i - T_{m+1}^i)}{\tau_B k_A + \tau_A k_B}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ฟังก์ชัน และคำสั่งภายในซอฟต์แวร์ MATLAB R2016b

คำสั่ง และฟังก์ชันภายในไฟล์สคริปต์สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์
กักเก็บพลังงานในส่วนของเตาเผา โดยการอาศัยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมาเป็นวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์
ร่วมกับซอฟต์แวร์ MATLAB R2016b แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณแฟกเตอร์วิวกรณีพื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าตั้งฉากที่มีขอบเท่ากัน

```
%% Radiation Geometry Function
% Case 1: Perpendicular Rectangles with a Common Edge
function CC1=GeoC1(Height,Width)
H=Height;
W=Width;
HS=H^2; % Square of H
WS=W^2; % Square of W
% CC1(1,:) is A, B, C, D and E respectively
CC1(1,1)=(W*atan(1/W))+H*atan(1/H));
CC1(1,2)=((HS+WS)^0.5)*atan(1/((HS+WS)^0.5));
CC1(1,3)=(1+WS)*(1+HS)/(1+WS+HS);
CC1(1,4)=(WS*(1+WS+HS)/(1+WS)/(WS+HS))^WS;
CC1(1,5)=(HS*(1+HS+WS)/(1+HS)/(HS+WS))^HS;
end
```

ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณแฟกเตอร์วิวกรณีพื้นผิวสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกัน

```
%% Radiation Geometry Function
% Case 2: Aligned Parallel Rectangles
function CC2=GeoC2(XBar,YBar)
Xbar=XBar;
Ybar=YBar;
XbarS=Xbar^2; % Square of Xbar
YbarS=Ybar^2; % Square of Ybar
% CC2(1,:) is A, B, C, D and E respectively
CC2(1,1)=log(((1+XbarS)*(1+YbarS)/(1+XbarS+YbarS))^0.5);
CC2(1,2)=Xbar*((1+YbarS)^0.5)*atan(Xbar/((1+YbarS)^0.5));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CC2(1,3)=Ybar*((1+XbarS)^0.5)*atan(Ybar/((1+XbarS)^0.5));
CC2(1,4)=Xbar*atan(Xbar);
CC2(1,5)=Ybar*atan(Ybar);
end

```

ไฟล์สคริปต์สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขภายในเตาเผา

```

%% Finite Difference Method for Transient Heat Transfer
clc
clear
close all

waitshow=waitbar(0,'Calculation in Progress');
%% View Factor - Dimensions Input for Surface 1
% Geometry Case 1: Perpendicular Rectangles with a Common Edge
XC(1,1)=0.2; % Width of Prototype Device on Air Layer (m)
YC(1,1)=0.2; % Length of Prototype Device on Air Layer (m)
Z=0.045;
% Height of Prototype Device between Charcoal and Top of PCMs Box (m)

% Geometry Case 2: Aligned Parallel Rectangles
XC(1,2)=0.2; % Width of Prototype Device on Air Layer (m)
YC(1,2)=0.2; % Length of Prototype Device on Air Layer (m)
L=0.045;
% Height of Prototype Device between Charcoal and Top of PCMs Box (m)

% Area of Each Surfaces
ABase=XC(1,1)*YC(1,1); % Can Use with Both Geometry Cases
ASide=YC(1,1)*Z; % Can Use with Both Geometry Cases

% Known View Factor
F(1,1)=0; % View Factor of F1->1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%% View Factor Calculation for Surface 1
% Geometry Case 1: Perpendicular Rectangles with a Common Edge
Height=Z/XC(1,1);
Width=YC(1,1)/XC(1,1);
CC1=RadiationGeoCase1(Height,Width);

% View Factor of F1->2
F(1,2)=1/pi()/Width*(CC1(1,1)-CC1(1,2)+(0.25*log(CC1(1,3)*CC1(1,4)*CC1(1,5))));

% The Symmetry Rule
for i=3:5 % View Factor of F1->3, F1->4 and F1->5
    F(1,i)=F(1,2);
end

% Geometry Case 2: Aligned Parallel Rectangles
Xbar=XC(1,2)/L;
Ybar=YC(1,2)/L;
CC2=RadiationGeoCase2(Xbar,Ybar);

% View Factor of F1->6
F(1,6)=2/pi()/Xbar/Ybar*(CC2(1,1)+CC2(1,2)+CC2(1,3)-CC2(1,4)-CC2(1,5));

% The Reciprocity Relation:  $A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$ 
for i=2:6
    if i<6
        F(i,1)=F(1,i)*ABase/ASide;
        F(6,i)=F(1,2); % The Symmetry Rule
        F(i,6)=F(6,i)*ABase/ASide;
    else
        F(i,1)=F(1,i);
    end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%% View Factor - Dimensions Input for Surface 2 and Other Surfaces

% Geometry Case 1: Perpendicular Rectangles with a Common Edge

XC(1,1)=0.045; % Width of Prototype Device on Air Layer (m)

YC(1,1)=0.2; % Length of Prototype Device on Air Layer (m)

Z=0.2; % Height of Prototype Device on Air Layer (m)

% Geometry Case 2: Aligned Parallel Rectangles

XC(1,2)=0.045; % Width of Prototype Device on Air Layer (m)

YC(1,2)=0.2; % Length of Prototype Device on Air Layer (m)

L=0.2; % Height of Prototype Device on Air Layer (m)

% Area of Each Surfaces

ABase=XC(1,1)*YC(1,1); % Can Use with Both Geometry Case

ASide=YC(1,1)*Z; % Can Use with Both Geometry Case

%% View Factor Calculation for Surface 2 and Other Surfaces

% Geometry Case 1: Perpendicular Rectangles with a Common Edge

Height=Z/XC(1,1);

Width=YC(1,1)/XC(1,1);

CC1=RadiationGeoCase1(Height,Width);

% View Factor of F2->3

F(2,3)=1/pi()/Width*(CC1(1,1)-CC1(1,2)+(0.25*log(CC1(1,3)*CC1(1,4)*CC1(1,5))));

% The Symmetry Rule

F(2,5)=F(2,3);

% Geometry Case 2: Aligned Parallel Rectangles

Xbar=XC(1,2)/L;

Ybar=YC(1,2)/L;

CC2=RadiationGeoCase2(Xbar,Ybar);

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% View Factor of F2->4
F(2,4)=2/pi()/Xbar/Ybar*(CC2(1,1)+CC2(1,2)+CC2(1,3)-CC2(1,4)-CC2(1,5));

% The Symmetry Rule
for i=2:4 % View Factor of F3->2, F4->2 and F5->2
    F(i+1,2)=F(2,i+1);
end

% Use Below Rules to Determine Remaining View Factors
F(4,3)=F(2,3); % The Symmetry Rule
F(4,5)=F(2,3); % The Symmetry Rule
F(3,4)=F(4,3); % The Reciprocity Rule
F(5,4)=F(4,5); % The Reciprocity Rule
sumF5=sum(F(5,:));
F(5,3)=1-sumF5; % The Summation Rule
F(3,5)=F(5,3); % The Reciprocity Rule

%% Radiosity - Constants Input
sigma=5.670374419e-8; % Stefan-Boltzmann Constant (W/m^2.K^4)

% Epsilon or Surface Emissivity of Materials
% Ref: Y. A. Cengel, A. J. Ghajar - Heat and Mass Transfer (2015)
for i=1:6
    if i==1
        eps(i,1)=0.85; % Emissivity of Copper for Commercial Sheet
    elseif i==6
        eps(i,1)=0.15; % Emissivity of Charcoal
    else
        eps(i,1)=0.17; % Emissivity of SS304 is between 0.17 to 0.30
    end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Surface Temperature of Each Surfaces
for i=1:6
    if i==6
        TC1=800; % Surface Temperature of Copper (C)
        T(i,1)=TC1+273.15; % Surface Temperature of Copper (K)
    else
        TC2=710; % Surface Temperature of SS304 (C)
        T(i,1)=TC2+273.15; % Surface Temperature of SS304 (K)
    end
end

%% Radiosity - Methods of Solving Radiation Problems
% Using Surface with Specified Temperature (Ti) Method
for i=1:6
    CofSum(i,1)=(1-eps(i,1))/eps(i,1); % Coefficient before Summation
    % Rearrange of Equation System
    for j=1:6
        if j~=i
            J(i,j)=(-1)*CofSum(i,1)*F(i,j);
        end
    end
    J(i,i)=(-1)*CofSum(i,1)*F(i,i);
end

% Case with i and j is Equal (W/m^2)
J(1,1)=1+(CofSum(1,1)*(F(1,2)+F(1,3)+F(1,4)+F(1,5)+F(1,6)));
J(2,2)=1+(CofSum(2,1)*(F(2,1)+F(2,3)+F(2,4)+F(2,5)+F(2,6)));
J(3,3)=1+(CofSum(3,1)*(F(3,1)+F(3,2)+F(3,4)+F(3,5)+F(3,6)));
J(4,4)=1+(CofSum(4,1)*(F(4,1)+F(4,2)+F(4,3)+F(4,5)+F(4,6)));
J(5,5)=1+(CofSum(5,1)*(F(5,1)+F(5,2)+F(5,3)+F(5,4)+F(5,6)));
J(6,6)=1+(CofSum(6,1)*(F(6,1)+F(6,2)+F(6,3)+F(6,4)+F(6,5)));

```

```

% Matrix that Contains Results of This Method
for i=1:6
    % Product of sigma and Fourth Power of Temperature (W/m^2)
    SigmaT(i,1)=sigma*(T(i,1)^4);
end

% Solve System of Equations to Find Radiosity (J)
Radiosity=J\SigmaT; % Radiosity (W/m^2)
%% Total Heat from Heat Radiation Calculation
for i=1:6
    for j=1:6
        proFJ(i,j)=F(i,j)*(Radiosity(i,1)-Radiosity(j,1));
    end
    proFJ(i,j)=F(i,j)*(Radiosity(i,1)-Radiosity(j,1));
    sum_proFJ(i,1)=sum(proFJ(i,:));
    % Calculate Heat from Heat Radiation
    if i==1||i==6
        QradS(i,1)=ABase*sum_proFJ(i,1); % Heat from Heat Radiation (J/s)
    else
        QradS(i,1)=ASide*sum_proFJ(i,1); % Heat from Heat Radiation (J/s)
    end
end
end

% Summation of Heat from Heat Radiation
Qrad=sum(QradS); % Summation of Heat from Heat Radiation (W)

%% Properties of Materials
LAir=0.055; % Thickness of Air Layer in Prototype Device (m)
LSS304_1=1e-3; % Thickness of SS304 Part 1 in Prototype Device (m)
LCu_1=1e-3; % Thickness of Copper Part 1 in Prototype Device (m)
deltax=1e-3; % Assume Distance between Node (m)
L=LAir+LCu_1; % Consider Heat Transfer only Air Layer

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% Properties of Air

% Ref: Y. A. Cengel, A. J. Ghajar - Heat and Mass Transfer (2015)

```
TempData=[ -150, -100, -50:10:0, 5:5:50, 60:10:100, ...
            120:20:200, 250:50:500, 600:100:1000, 1500, 2000];
```

```
TempDataPr=[ -50:10:0, 5:5:50, 60:10:100, ...
              120:20:200, 250:50:500, 600:100:1000, 1500];
```

% Data 1: Thermal Conductivity of Air at 1 Atmosphere

```
kData=[0.01171, 0.01582, 0.01979, 0.02057, 0.02134, 0.02211, 0.02288, ...
        0.02364, 0.02401, 0.02439, 0.02476, 0.02514, 0.02551, 0.02588, ...
        0.02625, 0.02662, 0.02699, 0.02735, 0.02808, 0.02881, 0.02953, ...
        0.03024, 0.03095, 0.03235, 0.03374, 0.03511, 0.03646, 0.03779, ...
        0.04104, 0.04418, 0.04721, 0.05015, 0.05298, 0.05572, 0.06093, ...
        0.06581, 0.07037, 0.07465, 0.07868, 0.09599, 0.11113]; % W/m.K
```

% Data 2: Density of Air at 1 Atmosphere

```
rhoData=[2.8660, 2.0380, 1.5820, 1.5140, 1.4510, 1.3940, 1.3410, ...
          1.2920, 1.2690, 1.2460, 1.2250, 1.2040, 1.1840, 1.1640, ...
          1.1450, 1.1270, 1.1090, 1.0920, 1.0590, 1.0280, 0.9994, ...
          0.9718, 0.9458, 0.8977, 0.8542, 0.8148, 0.7788, 0.7459, ...
          0.6746, 0.6158, 0.5664, 0.5243, 0.4880, 0.4565, 0.4042, ...
          0.3627, 0.3289, 0.3008, 0.2772, 0.1990, 0.1553]; % kg/m^3
```

% Data 3: Specific Heat Capacity of Air at 1 Atmosphere

```
cpData=[ 983, 966, 999, 1002, 1004, 1005, 1006, ...
          1006, 1006, 1006, 1007, 1007, 1007, 1007, ...
          1007, 1007, 1007, 1007, 1007, 1007, 1008, ...
          1008, 1009, 1011, 1013, 1016, 1019, 1023, ...
          1033, 1044, 1056, 1069, 1081, 1093, 1115, ...
          1135, 1153, 1169, 1184, 1234, 1264]; % J/kg.K
```

% Data 4: Kinematic Viscosity of Air at 1 Atmosphere

```
miuData=[3.013e-6, 5.837e-6, 9.319e-6, 1.008e-5, 1.087e-5, 1.169e-5, ...
          1.252e-5, 1.338e-5, 1.382e-5, 1.426e-5, 1.470e-5, 1.516e-5, ...
          1.562e-5, 1.608e-5, 1.655e-5, 1.702e-5, 1.750e-5, 1.798e-5, ...
          1.896e-5, 1.995e-5, 2.097e-5, 2.201e-5, 2.306e-5, 2.522e-5, ...
          2.745e-5, 2.975e-5, 3.212e-5, 3.455e-5, 4.091e-5, 4.765e-5, ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

5.475e-5, 6.219e-5, 6.997e-5, 7.806e-5, 9.515e-5, 1.113e-4, ...
1.326e-4, 1.529e-4, 1.741e-4, 2.922e-4, 4.270e-4];

% Data 5: Prandtl Number of Air at 1 Atmosphere
PrData=[0.7440, 0.7436, 0.7425, 0.7408, 0.7387, 0.7362, ...
0.7350, 0.7336, 0.7323, 0.7309, 0.7296, 0.7282, ...
0.7268, 0.7255, 0.7241, 0.7228, 0.7202, 0.7177, ...
0.7154, 0.7132, 0.7111, 0.7073, 0.7041, 0.7014, ...
0.6992, 0.6974, 0.6946, 0.6935, 0.6937, 0.6948, ...
0.6965, 0.6986, 0.7037, 0.7092, 0.7149, 0.7206, 0.7260, 0.7478];

ppolyk=polyfit(TempData,kData,3);
ppolyrho=polyfit(TempData,rhoData,7);
ppolycp=polyfit(TempData,cpData,7);
ppolymiu=polyfit(TempData,miuData,3);
ppolyPr=polyfit(TempDataPr,PrData,7);

% Properties of SS316
% From Thermal Conductivity, Density and Specific Heat Capacity, Respectively.
TP(2,1:3)=[14.9, 7900, 477];

% Properties of Copper
% From Thermal Conductivity, Density and Specific Heat Capacity, Respectively.
TP(3,1:3)=[401, 8933, 385];

% Properties for Ceramic
% From Thermal Conductivity, Density and Specific Heat Capacity, Respectively.
TP(4,1:3)=[31, 6000, 0.325];

% Properties for Bismuth Telluride
% From Thermal Conductivity, Density and Specific Heat Capacity, Respectively.
TP(5,1:3)=[1.5, 7640, 0.198];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%% Properties of Coconut Charcoal Briquette
HHV=26401.04; % High Heating Value of Charcoal (kJ/kg)
gChar=0.3; % Total Amount of Charcoal Briquette (kg)
BurnR=0.44; % Burning Rate of Charcoal Briquette (g/min)
PHRate=HHV*BurnR*1e-3/60; % Heat Rate with Conversion Factor (kJ/s)
PHRateC=PHRate*1e3; % Heat Rate with Conversion Factor (J/s)
Qcoal=PHRateC*(2403/10675); % Heat Rate per Time (J/s) with Heat Loss

DHeat=0.2; % Width and Length of Prototype Device (m)
% Void of Grate
DiaGrate=0.01; % Grate Diameter (m)
NVoid=2*8*14; % Total Number of Void
AHeat=(DHeat^2)-(pi()*(DiaGrate^2)/4*NVoid);
% Heat Transfer Area without Void (m^2)
qcoal=Qcoal/AHeat; % Flux of Charcoal Briquette (W/m^2)
qrad=Qrad/AHeat; % Flux of Heat Radiation (W/m^2)

%% Calculation Expression
fprintf('\nThe Radiosity at Each Surfaces are Shown as below: \n')
for i=1:6
    fprintf(' Surface %d: %.4f W/m^2 \n',i,Radiosity(i,1))
end
fprintf('Heat from Heat Radiation (Qrad) is %.4e Watt\n',Qrad)
fprintf('Heat from Charcoal Briquette (Qcoal) is %.4f Watt\n',Qcoal)

%% Data from Experimental
t_Exp=1:60:1801; % Experiment Time (s)
% Temperature that Measure from Thermocouple in Experiment (Degree Celsius)
T_ExpLoc1=[ 34.2, 157.3, 284.3, 450.5, 545.3, 638.0, 760.2, 815.7, 829.0, 857.5, ...
            905.7, 894.5, 938.7, 947.0, 948.7, 966.7, 972.0, 978.5, 979.5, 983.7, ...
            984.2, 985.0, 991.0, 992.2, 1000.2, 1007.7, 998.0, 993.0, 991.0, 980.5, ...
            976.5];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
T_ExpLoc2=[ 33.7, 33.7, 36.2, 41.0, 56.5, 84.3, 100.5, 115.5, 163.0, 209.5, ...
            319.0, 416.0, 522.7, 546.0, 558.0, 552.0, 549.2, 547.5, 546.5, 543.7, ...
            542.7, 543.5, 545.7, 546.2, 544.0, 538.0, 527.5, 522.5, 520.5, 519.5, ...
            518.7];
```

```
T_ExpLoc3=[ 33.7, 34.2, 34.2, 34.5, 34.7, 35.7, 38.0, 39.0, 43.2, 47.7, ...
            66.0, 89.0, 130.0, 147.0, 176.5, 192.8, 196.0, 226.8, 227.0, 231.0, ...
            240.5, 232.0, 231.3, 228.3, 222.0, 218.8, 213.8, 206.5, 198.3, 187.8, ...
            186.5];
```

```
% Initial and Final Temperature from Numerical Methods
```

```
% Initial Temperature at Coconut Charcoal Briquette (Degree Celsius)
```

```
T_iniC=T_ExpLoc1(1,1);
```

```
% Initial Temperature at Coconut Charcoal Briquette (Kelvin)
```

```
T_ini=T_iniC+273.15;
```

```
% Final Temperature at End of Layer (Degree Celsius)
```

```
T_iniF= T_ExpLoc3(1,31);
```

```
% Final Temperature at End of Layer (Kelvin)
```

```
T_inf=T_iniF+273.15;
```

```
fprintf('\nInitial Temperature from Experiment is %.1f Degree Celsius\n',T_ExpLoc1(1,1))
```

```
%% Time Stepping for Stability Criterion Selection
```

```
M=1440000; % Number of Time Steps
```

```
t=1800; % Total Time (s)
```

```
deltatS=t/M; % Time Steps Duration (s)
```

```
for j=1:M % Loop for Time Indications
```

```
    time(j)=(j-1)*deltatS;
```

```
end
```

```
%% Properties of Materials Calculation
```

```
% Thermal Diffusivity (m2/s) = k/rho/cp
```

```
for i=1:5 % Loop for Thermal Diffusivity Calculation
```

```
    TP(i,4)=TP(i,1)/TP(i,2)/TP(i,3);
```

```
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Stability Criterion (s)
for i=1:5 % Loop for Stability Criterion
    TP(i,5)=0.5.*(deltax^2)./TP(i,4);
end

% Dimensionless Time (s)
for i=1:5 % Loop for Dimensionless Time or tauAir
    TP(i,6)=TP(i,4)*deltatS/(deltax^2);
end

%% Numerical Methods using Finite Difference Method
% Node Separation
Node=L/deltax; % Number of Nodes
x=0:deltax:L; % Position of Each Nodes

% Initial Wall Temperatures
for i=1:Node+1 % Loop for Node Indications
    TNode(i,1)=T_ini;
end

%Step through Time
for j=1:(M) % Loop for Time Indication
    % First Node of Prototype Device
    % Heat Convection
    Tsurface=800+273.15; % Surface Temperature (Kelvin)
    Tinf=50; % Ambient Temperature (Degree Celsius)
    TinfK=Tinf+273.15; % Ambient Temperature (Kelvin)
    TFilm=(Tsurface+TinfK)/2; % Film Temperature (Kelvin)

    % Properties of Air using Curve Fitting from Data
    % Thermal Conductivity of Air (W/m.K)
    TP(1,1)=polyval(ppolyk,TNode(1,j)-273.15);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Density of Air (kg/m^3)
TP(1,2)=polyval(ppolyrho,TNode(1,j)-273.15);
% Specific Heat Capacity of Air (J/kg.K)
TP(1,3)=polyval(ppolycp,TNode(1,j)-273.15);
% Thermal Diffusivity (m^2/s)
TP(1,4)=TP(1,1)/TP(1,2)/TP(1,3);
% Stability Criterion (s)
TP(1,5)=0.5*(deltax^2)/TP(1,4);
% Dimensionless Time (s)
TP(1,6)=TP(1,4)*deltatS/(deltax^2);

% Properties of Air at Film Temperature
kAir=polyval(ppolyk,TFilm-273.15); % Thermal Conductivity of Air
PrAir=polyval(ppolyPr,TFilm-273.15); % Prandtl Number of Air
miuAir=polyval(ppolymiu,TFilm-273.15); % Kinematic Viscosity of Air
beta=1/TFilm; % Volume Expansion Coefficient (1/K)
g=9.80665; % Standard Gravitational Acceleration (m/s^2)
Lc=0.073; % Characteristic Length (m)
RaL=g*beta*(Tsurface-TinfK)*(Lc^3)*PrAir/(miuAir^2);

% Nusselt Number (Nu) Correlation from Holland et al. (1976)
if 1-(1708/RaL)<0
    NuTermA=0;
else
    NuTermA=1.44*(1-(1708/RaL));
end

if ((RaL^(1/3))/18)-1<0
    NuTermB=0;
else
    NuTermB=((RaL^(1/3))/18)-1;
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Combined all Term to Calculate Nusselt Number
Nu=1+NuTermA+NuTermB;
hconv=kAir*Nu/Lc; % Natural Convection Heat Transfer Coefficient (W/m^2.K)
qconv=hconv*(Tsurface-TinfK);

% First Node of Prototype Device
TNode(1,j+1)=(TP(1,6)*TNode(2,j))+ ...
((1-TP(1,6))*TNode(1,j))+TP(1,6)*deltax/TP(1,1)*(qcoal-qrad-qconv));
for i=2:Node % Loop for Node Indication
    TNode(i,j+1)=TNode(i,j)+(TP(1,6)*TNode(i-1,j))+TP(1,6)*TNode(i+1,j)- ...
(2*TP(1,6)*TNode(i,j));
end
% Change Lower Boundary Condition to Interface Condition
A=2*TP(1,6)*TP(3,6)*TP(1,1)*(TNode(Node-1,j)-TNode(Node,j));
B=2*TP(1,6)*TP(3,6)*TP(3,1)*(TNode(Node,j)-T_inf);
C=(TP(3,6)*TP(1,1))+TP(1,6)*TP(3,1);
TNode(Node+1,j+1)=TNode(Node,j)+((A-B)/C);
end
% Temperature Indication for Comparison Chart
for i=1:31
    TPlot(:,i)=TNode(:,(1.44e+4*(i-1)+1));
end

% Plot Colormap Chart to Describe Heat Transfer in Stove for Each Node
TPlotDegreeC=TPlot-273.15; % Temperature (Degree Celsius)
figure()
imagesc(TPlotDegreeC(:,31))
hold on
title({'Temperature Distribution within Stovebox', ...
    'using 1D Transient Heat Transfer', ...
    'with 25 mm Thickness of PCMs Box'})

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

h=gca;
h.XAxis.Visible='off';
yticks([1:5:56])
ylabel('Number of Node')
TempBar=colorbar
colormap jet
set(TempBar,'Ticks',[0:50:1100])
TempBar.Label.String='Temperature (Degree Celsius)'
TempBar.Label.FontSize=11;
hold off

% Comparison Chart for Experimental Data to Numerical Methods at Node 1
t_TvTime=1:1:1801;
for i=1:1801
    TvTime(1,i)=TNode(1,15*i)-273.15;
end
figure()
plot(t_Exp,T_ExpLoc1,'o',t_TvTime,TvTime(1,:),'-r')
hold on
title({'Temperature Comparison between Experimental and Numerical Methods', ...
    'at Charcoal Briquette Combustion Zone', 'or Thermocouple Location 1'})
xlabel('Time (Minutes)')
ylabel('Temperature (Degree Celsius)')
legend({'Experimental Data', 'Numerical Methods'}, ...
    'FontSize',9,'Location','southeast')
xlim([0 30])
xticks([0:5:30])
ylim([0 1200])
grid on
axis square
hold off

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Comparison Chart for Experimental Data to Numerical Methods at Node 44
for i=1:1801
    TvTime(2,i)=TNode(44,18*i)-273.15;
end
figure()
plot(t_ExpM,T_ExpLoc2,'o',(t_TvTime-1)/60,TvTime(2,:),'-r')
hold on
title({'Temperature Comparison between Experimental and Numerical Methods', ...
    'at Thermocouple Location 2'})
xlabel('Time (Minutes)')
ylabel('Temperature (Degree Celsius)')
legend({'Experimental Data', 'Numerical Methods'}, ...
    'FontSize',9,'Location','southeast')
xlim([0 30])
xticks([0:5:30])
ylim([0 600])
grid on
axis square
hold off

% Comparison Chart for Experimental Data to Numerical Methods at Node 56
for i=1:1801
    TvTime(3,i)=TNode(56,18*i)-273.15;
end
figure()
plot(t_ExpM,T_ExpLoc3,'o',(t_TvTime-1)/60,TvTime(3,:),'-r')
hold on
title({'Temperature Comparison between Experimental and Numerical Methods', ...
    'at Thermocouple Location 3'})
xlabel('Time (Minutes)')
ylabel('Temperature (Degree Celsius)')
legend({'Experimental Data', 'Numerical Methods'}, ...
    'FontSize',9,'Location','southeast')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
xlim([0 30])  
xticks([0:5:30])  
ylim([0 250])  
grid on  
axis square  
hold off
```

```
close(waitshow)
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้