

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ
เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์
THERMAL CONDUCTIVITY CALCULATION OF
THERMOELECTRIC MODULE USING
FINITE ELEMENT ANALYSIS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ
เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์
THERMAL CONDUCTIVITY CALCULATION OF
THERMOELECTRIC MODULE USING
FINITE ELEMENT ANALYSIS



สงวนลิขสิทธิ์...
เลขทะเบียน... 149435
รับเดือนปี... ๕ ๘ ค.ค. 2561

b. 1288490X
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL CONDUCTIVITY CALCULATION OF
THERMOELECTRIC MODULE USING
FINITE ELEMENT ANALYSIS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN
PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อนักศึกษา	นายสมานี ธรรมศร รหัสนักศึกษา 55051632 นางสาวสาวิตรา คงตะโก รหัสนักศึกษา 55051638
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อาภาภรณ์ สกุลภาวะเวก

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยใช้การออกแบบการทดลองอย่างง่ายและสมการการนำความร้อนของฟูเรียร์ร่วมกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ฮีตเตอร์ถูกใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน และใช้ฮีตซิงค์ที่ติดตั้งระบบหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นเป็นแหล่งระบายความร้อน พร้อมทั้งใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติในการบันทึกอุณหภูมิที่อุณหภูมิฮีตเตอร์ (T_1), อุณหภูมิด้านบนฮีตซิงค์ (T_2), อุณหภูมิด้านล่างฮีตซิงค์ (T_3) และใยหิน (T_4) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ข้อมูลของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ (T_1, T_3, T_4) ถูกใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก (K) ค่า K จะถูกปรับเปลี่ยนจนกระทั่งอุณหภูมิ T_3 ที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ T_3 ที่ได้จากการทดลองให้มากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อุณหภูมิ 111, 164, 219 และ 272 °C มีค่าเท่ากับ 2.06, 2.28, 2.48 และ 2.74 w/mK ตามลำดับ โครงการพิเศษนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดอื่นได้ โดยใช้ระบบที่มีราคาถูกและไม่ซับซ้อน

คำสำคัญ : เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล สัมประสิทธิ์การนำความร้อน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

Title	Thermal Conductivity Calculation of Thermoelectric Module Using Finite Element Analysis
Students	Mr.Samati Tummasorn Student ID 55051632 Miss Savitra Kongtako Student ID 55051638
Degree	Bachelor of Science (Applied physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Dr.Aparpon Sakulkalavek

Abstract

In this special project, a thermal conductivity (K) measurement system was designed and set up for thermoelectric module. The measurement system consists of a plate heater with stone wool as the sample hot side, water cooling heat sink as the sample cold side, and a temperature measurement at interesting points such as the stone wool (T_1), heater (T_2), on top of heatsink (T_3), and bottom of heatsink (T_4). The temperatures, T_1 , T_2 , T_3 , and T_4 were automatically measured at thermal equilibrium and then T_1 , T_2 , and T_4 were used as boundary conditions for calculating the thermal conductivity. Finite element simulation based on 2D heat conduction equation was used in calculation. In order to achieve the best solution, thermal conductivity (K) was adjusted until measured T_3 corrected with the value from the simulation. Results show that thermal conductivities of thermoelectric module were 2.06, 2.28, 2.48, and 2.74 W/mK at 111, 164, 219, and 272 °C, respectively. The thermal conductivity value was agreed with the other previous works. The design system with the finite element simulation has simple and good performance for thermal conductivity measurement.

Keywords : Thermoelectric module, Thermal conductivity, Finite element

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของ
ทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ ดร.อภาภรณ์ สุกุลภาวะ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้
คำแนะนำ และให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด ทั้งยังแนะนำแนวทางที่ดีในการแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ
ตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนได้นำความรู้ที่ได้ร่ำเรียนมาใช้ในโครงการ
พิเศษนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษา
ตลอดจนคอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน รวมถึงเป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้
สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งเพื่อนๆและบุคคลอื่นๆ ที่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษ
ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สมาธิ ธรรมศร
สาวิตรา คงตะโก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์	4
2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบก	4
2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์	5
2.2 การวัดสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์	5
2.2.1 การวัดสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า	5
2.2.2 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบก	6
2.2.3 การวัดสภาพการนำความร้อน	8
2.3 เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เซลล์ เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์โมดูลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์	10
2.3.1 เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เซลล์	10
2.3.2 เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์โมดูล	10
2.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์	11
2.3.4 ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์	12
2.3.5 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ที่ดี	13
2.4 การถ่ายเทความร้อน	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การนำความร้อน	14
2.4.2 การพาความร้อน	15
2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน	15
2.5 สมการการนำความร้อน	16
2.5.1 การเกิดความร้อน	17
2.5.2 สมการการนำความร้อนใน 1 มิติ	17
2.5.3 สมการการนำความร้อนใน 3 มิติ	18
2.6 ครีประบายความร้อน	19
2.6.1 ประสิทธิภาพของครีประบายความร้อน	20
2.6.2 ประสิทธิภาพของครี	21
2.6.3 ความยาวที่เหมาะสมของครี	22
2.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์	23
2.7.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	23
2.7.2 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์	24
2.7.3 สมการพื้นฐานทั่วไปในสามมิติ	25
2.7.4 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	32
3.1.1 ไยหีน	32
3.1.2 เครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน	32
3.1.3 แผ่นอะลูมิเนียม	33
3.1.4 ฮีตเตอร์แท่ง	33
3.1.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45	34
3.1.6 ฮีทซิงค์	34
3.1.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K	35
3.1.8 ซิลิโคนสำหรับงานส่งผ่านความร้อน	35
3.1.9 ท่อทองแดง	36
3.1.10 สายยาง	36
3.1.11 ปีม	37
3.1.12 เครื่องทำความเย็น	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.13 เครื่องบันทึกข้อมูล	38
3.1.14 โปรแกรม LAB VIEW	38
3.2 วิธีการทดลอง	39
3.2.1 การออกแบบระบบทำความร้อน	39
3.2.2 ออกแบบระบบระบายความร้อน	39
3.2.3 ขั้นตอนการประกอบชุดการทดลอง	40
3.2.4 ขั้นตอนการทดลอง	41
3.3 การใช้โปรแกรม Finite element ในการออกแบบโมเดล	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	49
4.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	49
4.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของจุดที่ทำการวัดกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ	50
4.1.2 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ	54
4.1.3 กราฟจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	56
4.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ได้จาก โครงการพิเศษนี้กับงานวิจัยอื่นๆ	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก ก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
2.1 ค่า aL	22
3.1 คุณสมบัติของฮีตเตอร์	33
3.2 ลักษณะจำเพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	34
4.1 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ ฮีตซิงค์ และใยหิน ที่สภาวะสมดุล ของอุณหภูมิต่างๆ	54
4.2 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C	57
4.3 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 100 °C	57
4.4 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 150 °C	58
4.5 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 150 °C	59
4.6 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 200 °C	60
4.7 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 200 °C	60
4.8 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 250 °C	61
4.9 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 250 °C	62
4.10 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆที่กำหนด	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	1
2.1 ไดอะแกรมของการวัดสภาพนำไฟฟ้า	6
2.2 ไดอะแกรมการสัมผัสประสิทธิซึ่งเบกของสารตัวอย่างแบบพื้นฐาน	6
2.3 ไดอะแกรมการวัดความต่างศักย์และอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของสารตัวอย่างด้วยวิธีคอปเปอร์คอนสแทนแทนเทอร์โมคัปเปิล	7
2.4 ไดอะแกรมการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีสถานะคงตัว	8
2.5 ไดอะแกรมการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีเลเซอร์แฟลช	9
2.6 คู่ของเทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์	10
2.7 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	10
2.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	11
2.9 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ	14
2.10 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา	15
2.11 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี	16
2.12 พิกัดแนวแกนสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ตามลำดับ	18
2.13 ครีบบระบายความร้อนที่มีหน้าตัดผิวคงที่	20
2.14 การแบ่งเอลิเมนต์ภายในวัสดุ	23
2.15 หน้าต่างหลักของ COMSOL	27
2.16 กล่องสนทนา Block	27
2.17 กล่องสี่เหลี่ยมที่สร้างจากคำสั่ง Draw>block	28
2.18 การกำหนดค่า Subdomain กล่องที่ 1	28
2.19 การกำหนดค่า Subdomain กล่องที่ 2	29
2.20 การกำหนดค่าอุณหภูมิ 373.15 K	29
2.21 การเลือกเป็น Continuity	30
2.22 การกำหนดค่า Heat flux	30
2.23 กล่องสนทนา Free Mesh Parameters	31
2.24 การแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ	31
2.25 ผลการกระจายอุณหภูมิด้วยแถบชั้นสี่	31
3.1 ไยหิน	32
3.2 เครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.3	แผ่นอะลูมิเนียม	33
3.4	ฮีตเตอร์	33
3.5	เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45	34
3.6	ฮีตซิงค์	35
3.7	เทอร์โมคัปเปิลแบบ K	35
3.8	ซิลิโคนสำหรับงานส่งผ่านความร้อน	36
3.9	ท่อทองแดง	36
3.10	สายยาง	36
3.11	ปั๊ม	37
3.12	เครื่องทำความเย็น	37
3.13	เครื่องบันทึกข้อมูล NI9211	38
3.14	โปรแกรม LAB VIEW	38
3.15	การออกแบบฮีตซิงค์	40
3.16	ระบบระบายความร้อน	40
3.17	ระบบการทดลอง	41
3.18	การสร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	42
3.19	การสร้างแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียม	42
3.20	การสร้างแบบจำลองฮีตเตอร์	43
3.21	การสร้างแบบจำลองไยหิน	43
3.22	การสร้างแบบจำลองฮีตเตอร์	44
3.23	โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	44
3.24	การกำหนดคุณสมบัติของไยหิน	45
3.25	การกำหนดคุณสมบัติของอะลูมิเนียมและฮีตซิงค์	45
3.26	การกำหนดขอบเขตของไยหิน	46
3.27	การกำหนดขอบเขตของแผ่นอะลูมิเนียมและเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	46
3.28	การกำหนดขอบเขตของฮีตซิงค์	47
3.29	การกำหนดขอบเขตของฮีตเตอร์	47
3.30	แสดงภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ	48
4.1	แสดงการติดตั้งระบบเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตไฟฟ้า	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (a) การทดลองครั้งที่1 (b) การทดลองครั้งที่2	50
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (a) ทดลองครั้งที่1 (b) ทดลองครั้งที่2	51
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (a) ทดลองครั้งที่1 (b) ทดลองครั้งที่2	52
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส (a) ทดลองครั้งที่1 (b) ทดลองครั้งที่2	53
4.6 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ (a) 100 องศาเซลเซียส (b) 150 องศาเซลเซียส (c) 200 องศาเซลเซียส (d) 250 องศาเซลเซียส	55
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	56
4.8 ข้อมูลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	56
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	58
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	59
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	61
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ยของวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดบิสมาทเทลลูไรด์กับอุณหภูมิ	63
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	63

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ความร้อนไหลผ่าน
C	ความร้อนจำเพาะ
d	ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง
dT	อุณหภูมิเกรเดียนต์ที่เปลี่ยนไป
dV	ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไป
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
I	กระแสไฟฟ้า
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ
L	ความยาวของวัสดุ
m ²	ตารางเมตร
P	กำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้
Q _c	อัตราการไหลของความร้อนที่ออกจากระบบ
Q _H	อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ
Q̇	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหน่วยเวลา
Q̇ _{fin}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของครีบจริง
Q̇ _{fin max}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของครีบในอุดมคติ
Q̇ _{no fin}	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ซึ่งไม่มีครีบ
q _r	ปริมาณความร้อนที่ตกกระทบเนื่องจากการแผ่รังสี
R	ความต้านทานภายในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
R _L	ความต้านทานของโหลด
R _n	ความต้านทานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น
R _p	ความต้านทานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี
S	สัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
S _n	สัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น
S _p	สัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี
t _{1/2}	เวลาที่อุณหภูมิของสารตัวอย่างนี้ไปถึงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ต้องการ
T _H	อุณหภูมิด้านร้อน
T _s	อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ
T _{surr}	อุณหภูมิที่บริเวณใกล้เคียงผิวของวัตถุ
T _∞	อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ใกล้ผิวของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
W	วัตต์ (หน่วยของกำลังไฟฟ้า)
x	ความหนาของวัสดุ
Z	ค่าพิกเกอร์ออฟเมอร์ริท
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
ΔV	ผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้า
Δx	ผลต่างของความยาว
η	ประสิทธิภาพ
Π	สัมประสิทธิ์เพลเทียร์
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า
σ	สภาพนำไฟฟ้า
ϵ	สภาพการเปล่งรังสีของพื้นผิว

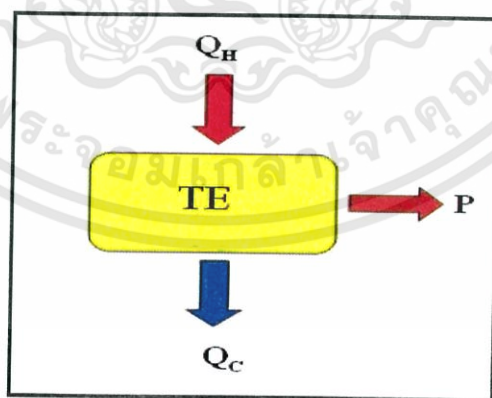
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์และการพัฒนาประเทศเป็นอย่างมาก ปัจจุบันแหล่งพลังงานไฟฟ้าหลักของประเทศไทยได้มาจากแก๊สธรรมชาติ 44% น้ำมัน 37% และถ่านหิน 13% [1] แต่เนื่องจากพลังงานเหล่านี้เป็นสาเหตุในการก่อมลพิษที่มีผลต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม พลังงานทดแทนรูปแบบต่างๆจึงเป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาพิจารณาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล และพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น ปัจจุบันมีเทคโนโลยีชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบที่มีความร้อนเหลือทิ้ง คือ เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก โดยเทคโนโลยีนี้สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าและประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนเหลือทิ้งได้หลายระดับ ตั้งแต่ระดับครัวเรือนไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลคือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบขึ้นจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ชิ้นเล็กๆมาเรียงต่อกันเป็นคู่ๆ โดยวางสลับกันและมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดให้ติดกันในแบบอนุกรมทางไฟฟ้า ด้านบนและด้านล่างของโมดูลจะถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิกซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อมีความร้อนสัมผัสกับเซรามิกด้านหนึ่งของโมดูล จะทำให้อุณหภูมิของแต่ละด้านมีค่าไม่เท่ากัน ผลต่างของอุณหภูมิจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากโมดูล หลักการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

โดยประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนมาเป็นพลังงานไฟฟ้าของระบบนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\eta = \frac{P}{Q_H} \times 100\% \quad (1)$$

โดย η คือ ประสิทธิภาพ
 P คือ กำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ (W)
 Q_c คือ อัตราการไหลของความร้อนที่ออกจากระบบ(W)
 Q_H คือ อัตราการไหลของความร้อนที่เข้ามาในระบบ (W) เมื่อไม่คิดค่าความต้านทานที่รอยต่อ (Contact resistance) ระหว่างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกกับแผ่นเซรามิก สามารถคำนวณ Q_H ได้จากสมการ (2)

$$Q_H = ST_H I + k\Delta T - \frac{I^2 R}{2} \quad (2)$$

โดย S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ($V K^{-1}$)
 T_H คือ อุณหภูมิด้านร้อน (K)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/m K)
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (K)
 R คือ ความต้านทานภายในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Ω)

อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้งานจริง ค่า S และ k จะต้องเป็นค่าที่รวมถึงผลของเซรามิกและความต้านทานที่รอยต่อต่างๆ ดังนั้นการใช้สมการที่ (2) เพื่อคำนวณ Q_H เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจึงไม่ถูกต้องและเกิดความยุ่งยาก

ในโครงการพิเศษจึงได้ออกแบบการทดลองร่วมกับการใช้โปรแกรม Finite element เพื่อใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (k_{total}) เพื่อนำไปคำนวณหา Q_H ด้วยสมการการนำความร้อนแสดงดังสมการที่ (3)

$$Q_H = \frac{k_{total} A \Delta T}{x} \quad (3)$$

โดย k_{total} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W/m K)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของวัสดุ (K)
 x คือ ความหนาของวัสดุ (m)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45 เมื่ออุณหภูมิด้านร้อนเป็น 100 , 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

1.4 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	เดือน									
	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค
1. ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	■	■								
2. ศึกษาหลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และการระบายความร้อน			■	■						
3. จัดทำระบบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล					■	■				
4. ทำการวิเคราะห์ระบบ							■	■	■	
5. สรุป										■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 2) สามารถประยุกต์ใช้ความรู้ด้าน Finite element ในการแก้ปัญหาด้านความร้อนรูปแบบอื่นๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏการณ์ซีเบก ปรากฏการณ์เพลเทียร์ การวัดสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) คือคำที่เกิดจากการผสมระหว่างคำว่า เทอร์โม (Thermo) ซึ่งหมายถึงความร้อน และคำว่าอิเล็กทริก (Electric) ซึ่งหมายถึงไฟฟ้า ดังนั้นเทอร์โมอิเล็กทริกจึงหมายถึงปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนและไฟฟ้า หรือสามารถกล่าวได้ว่า ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก คือการเปลี่ยนความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นความเย็น วัสดุที่มีคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกเรียกว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials) โดยประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถประเมินได้จากค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริท (Figure of merit , Z)

$$Z = \frac{s^2 \sigma}{k} \quad (2.1)$$

โดย σ คือ สภาพนำไฟฟ้า ($S \text{ m}^{-1}$)
 S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก ($V \text{ K}^{-1}$)
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบก คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกไปต่อกับโหลดให้เป็นวงจรปิด เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิทั้งสองด้านแตกต่างกัน โดยด้านหนึ่งมีอุณหภูมิสูง อีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิต่ำ และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย โทมัส โจแฮนน์ ซีเบก (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ในปี ค.ศ.1821 โดยสมการของปรากฏการณ์ซีเบก สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลต่างของความศักย์ไฟฟ้าและผลต่างอุณหภูมิได้ว่า

$$\Delta V = S \Delta T \quad (2.2)$$

โดย ΔV คือ ผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)
 S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก (VK^{-1})
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์ จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และสามารถมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นลบ ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นบวก

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก แล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ด้านหนึ่งของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย ยีน เพลเทียร์ ชาร์เลส อะธานาส (Jean Charles Athanase) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ในปีค.ศ.1834 ปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่ควบคู่กับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก และถูกนำมาใช้ทำระบบหล่อเย็นจากกระแสไฟฟ้า (Thermoelectric refrigeration) อัตราการดูดซับความร้อนแบบผันกลับได้ ซึ่งเกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \Pi I \quad (2.3)$$

โดยที่ Π คือ สัมประสิทธิ์เพลเทียร์ (Peltier coefficient) ของรอยต่อซึ่งจะมีค่าเป็นลบสามารถหาได้จาก

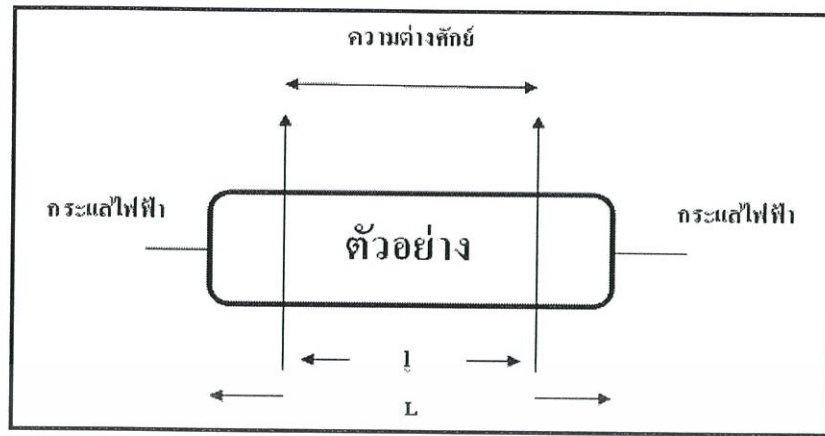
$$\Pi = ST \quad (2.4)$$

โดย I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 T คือ อุณหภูมิ (K)

2.2 การวัดสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะ กลุ่มสารกึ่งตัวนำ และกลุ่มฉนวน สิ่งที่แตกต่างกันของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 3 กลุ่ม คือ สภาพนำไฟฟ้า สภาพต้านทานไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ซีเบก และสภาพการนำความร้อน การวัดคุณสมบัติเหล่านี้สามารถทำได้โดย

2.2.1 การวัดสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้า หมายถึง สภาพที่บ่งบอกว่าวัสดุนั้นๆมีความสามารถในการนำหรือยินยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากหรือน้อยแค่ไหน โดยส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า จะถูกเรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า แสดงดังรูป



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมของการวัดสภาพนำไฟฟ้า

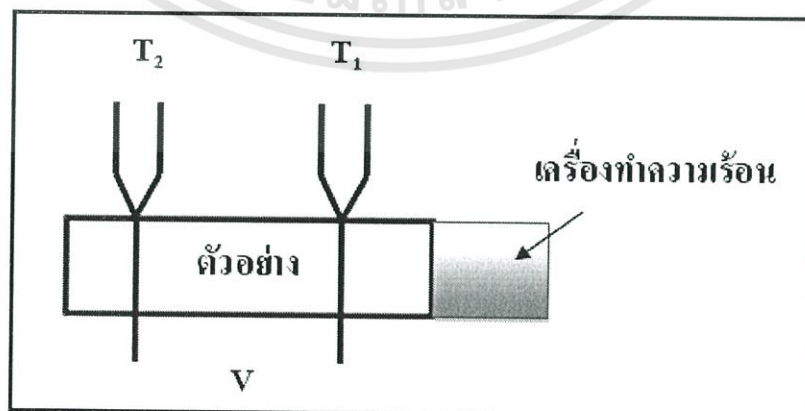
สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.5)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} \quad (2.6)$$

โดย ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
 R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (Ω)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2)
 L คือ ความยาวของวัสดุ (m)
 σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (S m^{-1})

2.2.2 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบก ถูกกำหนดขึ้นจากอัตราส่วนของผลต่างของผลต่างศักย์ วงจรเปิด กับผลต่างของอุณหภูมิสัมบูรณ์ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกของสารตัวอย่างแบบพื้นฐาน

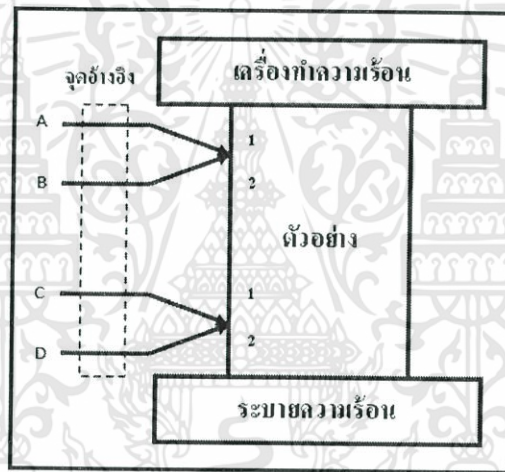
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาได้จากสมการ

$$S = - \frac{dV}{dT} \quad (2.7)$$

โดย S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก ($V K^{-1}$)
 dV คือ ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไป (V)
 dT คือ อุณหภูมิเกรเดียนต์ที่เปลี่ยนไป (K)

การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกด้วยวิธีคอปเปอร์คอนสแตนแทนเทอร์โมคัปเปิล วิธีคอปเปอร์คอนสแตนแทนเทอร์โมคัปเปิล (Copper-constantan thermocouple) คือการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกโดยใช้ผลต่างของอุณหภูมิจากสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล และวัดผลต่างความต่างศักย์จากสัญญาณที่ได้จากคู่ของทองแดง แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมการวัดความต่างศักย์และอุณหภูมิต้านร้อนและต้านเย็นของสารตัวอย่างด้วยวิธีคอปเปอร์คอนสแตนแทนเทอร์โมคัปเปิล

โดย 1 = ทองแดง
 2 = คอนสแตนแทน

สามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ซีเบกได้จากสมการ

$$S = \frac{dV_{AC}}{d(\Delta T)} \quad (2.8)$$

$$\approx \frac{V_{AC}}{\Delta T}$$

โดย V_{AC} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่หัววัด AB ลบด้วย AC
 ΔT คือ ความต่างของอุณหภูมิที่หัววัดเทอร์โมคัปเปิล AB ลบด้วย CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การนำความร้อน คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับตัวกลางที่เป็นของแข็ง เมื่อด้านหนึ่งของวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง จะทำให้เกิดการนำความร้อนขึ้น และการนำความร้อนจะสิ้นสุดลง เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางมีค่าเท่ากัน สามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.9)$$

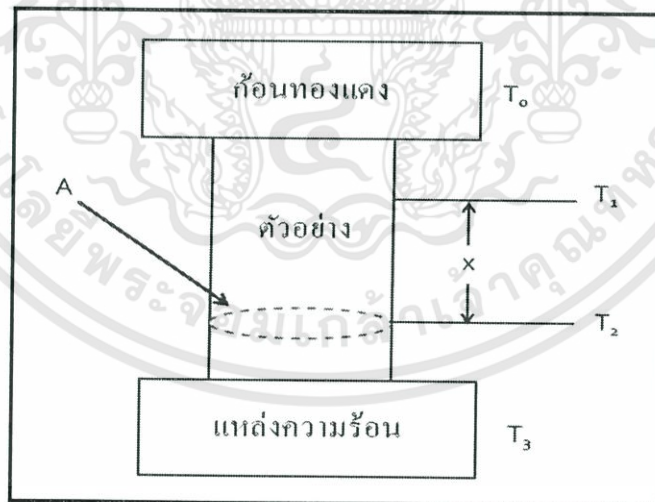
โดย k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุ (m^2)
 Δx คือ ผลต่างของความยาว ณ จุดวัดผลต่างอุณหภูมิ (m)
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

เราสามารถหาความนำความร้อน (K) และสภาพความต้านทานไฟฟ้า (R) ได้จากสมการ

$$K = \frac{k}{\Delta x} \quad (2.10)$$

$$R = \frac{1}{K} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{A(-\Delta T)}{\frac{dQ}{dt}} \quad (2.11)$$

1) การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีสถานะคงตัว



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีสถานะคงตัว

สำหรับสารตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A และอุณหภูมิอ้างอิงเป็น T_0 เมื่อทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น T_3 จะได้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังสมการ

$$K = -\frac{dQ}{dtA} \frac{\Delta x}{(\Delta T)}$$

$$= \frac{dQ}{dt} \frac{\Delta x}{A(T_2 - T_1)}$$

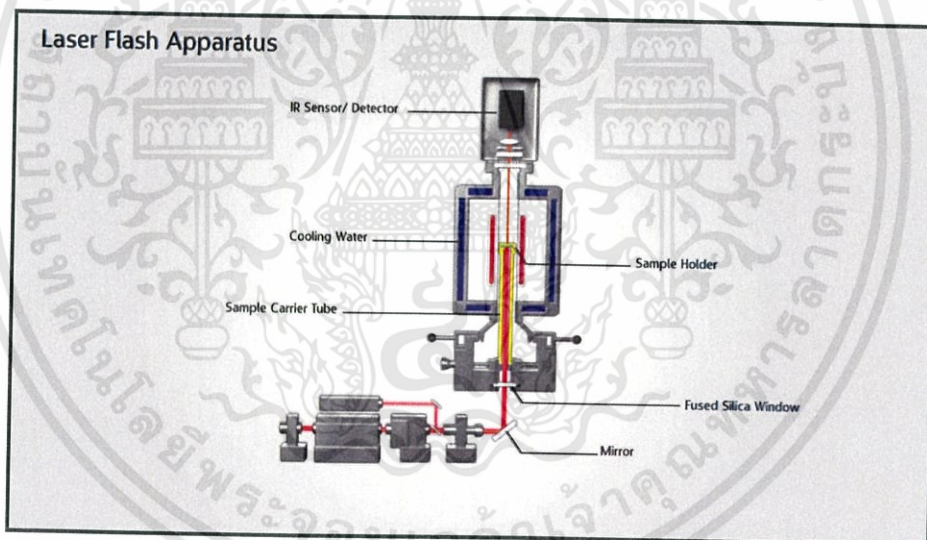
โดย Q คือ ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านสารตัวอย่าง (J)

t คือ หนึ่งหน่วยเวลา (h)

x คือ ระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2

2) การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนวิธีเลเซอร์แฟลช

วิธีเลเซอร์แฟลชเป็นวิธีที่เหมาะสมในการวัดค่าการกระจายความร้อน (Thermal diffusive, D) ของสารตัวอย่างประเภทก้อน แสดงดังรูป



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีเลเซอร์แฟลช

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการกระจาย ความร้อนได้ดังนี้

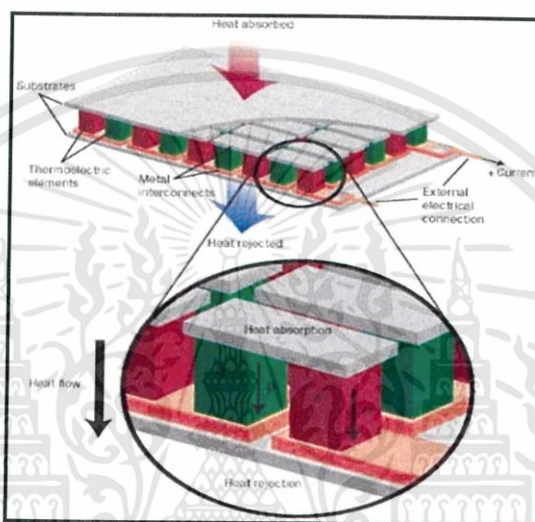
$$D = \frac{1.37d^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (2.12)$$

โดย d คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง

$t_{1/2}$ คือ เวลาที่อุณหภูมิของสารตัวอย่างนี้ไปถึงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ต้องการ

2.3 เทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

2.3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ (Thermoelectric cell) คือคู่ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี ที่ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยแผ่นโลหะ ทำให้เมื่อมีความร้อนเข้ามาสัมผัสที่ด้านหนึ่งของผนัง พหุภาคภายในสารกึ่งตัวนำจะมีการเคลื่อนที่ ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านแผ่นโลหะไปยังสายไฟและโหลดที่ถูกเชื่อมต่อไว้ได้



รูปที่ 2.6 คู่ของเทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์

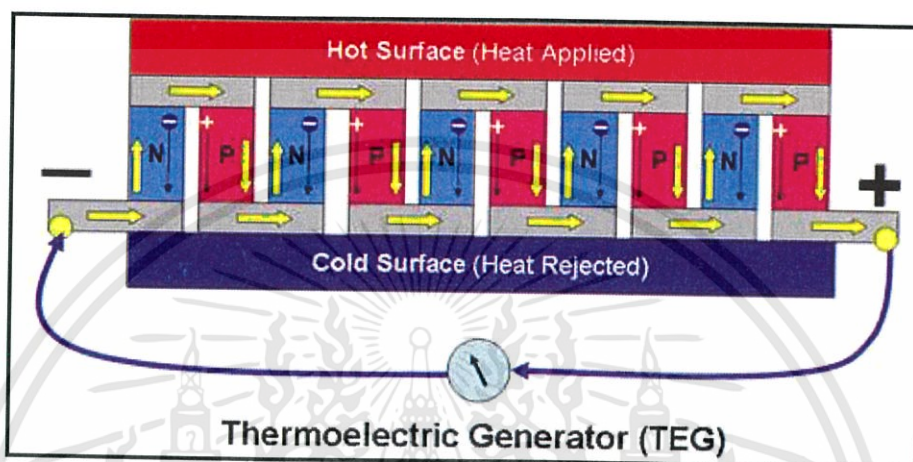
2.3.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module) คือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการนำเทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ มาเรียงต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยแต่ละด้านของโมดูลจะมีแผ่นเซรามิกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนติดอยู่ ทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรภายในโมดูล เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้า ทำความเย็น และทำความร้อน



รูปที่ 2.7 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric generator) คือการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจะมีแหล่งพลังงานเป็นแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง โดยสามารถใช้ได้กับแหล่งความร้อนเหลือทิ้งทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เช่น เตาปรุงอาหารในครัวเรือน หรือระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น



รูปที่ 2.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ในการหาพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เราจะคิดจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลอย่างง่าย โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถหาได้จากสมการ

$$I = \frac{(S_p - S_n)(T_2 - T_1)}{R_p + R_n + R_L} \quad (2.13)$$

โดย	S_p	คือ สัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี ($V K^{-1}$)
	S_n	คือ สัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น ($V K^{-1}$)
	T_1	คือ อุณหภูมิที่วัดได้ ณ จุดที่ 1 (K)
	T_2	คือ อุณหภูมิที่วัดได้ ณ จุดที่ 2 (K)
	R_p	คือ ความต้านทานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี (Ω)
	R_n	คือ ความต้านทานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น (Ω)
	R_L	คือ ความต้านทานของโหลด (Ω)

กำลังไฟฟ้าสามารถหาได้จาก $P = I^2 R$ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลอย่างง่ายจึงเป็น

$$P = I^2 R_L = \left\{ \frac{(S_p - S_n)(T_1 - T_2)^2}{R_p + R_n + R_L} \right\} R_L \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนหาได้จากสมการ

$$q_1 = (s_p - s_n)IT_1 + (K_p + K_n)(T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

โดย K_p และ K_n คือ ค่าความนำความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพีและชนิดเอ็น ตามลำดับ ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{P}{q_1}$ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าไม่เกิน 50% การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเมื่ออัตราส่วนความต้านทานที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (M) เป็นไปตามสมการ

$$M = \frac{R_L}{R_p + R_n} = (1 + ZT)^{1/2} \quad (2.16)$$

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าอาจคาดคะเนได้จากการรวมของค่าพีเกออร์ออฟเมอริท (Z) ตามสมการ

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)(M - 1)}{T_1(M + \frac{T_2}{T_1})} \quad (2.17)$$

ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ โมดูล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกทั่วไป คือ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I^2 R_{Load}}{S_{total} T_{hot} I + K_{total} \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_{internal}} \quad (2.18)$$

โดย P_{out} สามารถเขียนให้อยู่ในรูป $\frac{V_{out}^2}{R_{load}}$ และค่า $K\Delta T$ ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลทั้งก้อน สามารถเขียนแยกเป็นค่าความนำความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพีและชนิดเอ็นได้เป็น $n(k_p \Delta T + k_n \Delta T)$ เมื่อ n คือจำนวนคู่ทั้งหมดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ทำให้สามารถเขียนสมการประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้เป็น

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{V_{out}^2}{R_{load}}}{n(S_n - p)IT_{hot} + n(K_p \Delta T + K_n \Delta T) - \frac{1}{2} I^2 R_{internal}} \quad (2.19)$$

2.3.4 ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (η_t)
การคิดค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกในอุดมคติ และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกในความเป็นจริง ความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสองแบบ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกในอุดมคติจะไม่คิดความต้านทานที่รอยต่อ

(Contact resistance) ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกในความเป็นจริงจะคิดความต้านทานที่รอยต่อ

$$\text{โดยสมการการแปลงพลังงานคือ } \eta_t = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_h}$$

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกในอุดมคติสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_t = \frac{\frac{R_L(1-\frac{T_c}{T_h})}{R}}{\left(1+\frac{R_L}{R}\right) - \frac{1}{2}\left(1-\frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{1}{2ZT}\left(1+\frac{R_L}{R}\right)^2\left(1+\frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (2.20)$$

เมื่อ $\dot{W} = I^2 R_L$

$$\dot{Q}_h = S T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c)$$

โดย R คือ ความต้านทานรวมของวัสดุชนิดพีและชนิดเอ็น (Ω)

T_c คือ อุณหภูมิด้านเย็น (K)

T_h คือ อุณหภูมิด้านร้อน (K)

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกในความเป็นจริงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_t = \frac{I^2 R}{[S I T_{1c} - \frac{1}{2} I^2 R + \frac{A k}{l} (T_{1c} - T_{2c})]} \quad (2.21)$$

เมื่อ $\dot{W} = I^2 R_L$

$$\dot{Q}_h = S I T_{1c} - \frac{1}{2} I^2 R + \frac{A k}{l} (T_{1c} - T_{2c})$$

โดย T_{1c} คือ อุณหภูมิของตัวนำที่ด้านร้อน (K)

T_{2c} คือ อุณหภูมิของตัวนำที่ด้านเย็น (K)

l คือ ความยาวของสารกึ่งตัวนำในโมดูล (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสารกึ่งตัวนำ (m^2)

2.3.5 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี

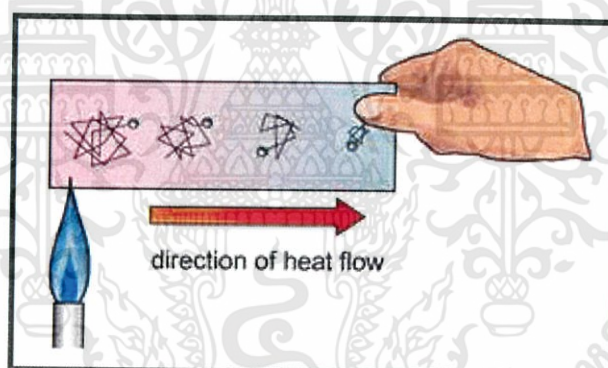
- 1) คุณสมบัติต่างๆของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ
- 2) ค่าความต้านทานของขั้วสเตรตด้านร้อนและด้านเย็นมีค่าน้อยมาก
- 3) ค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกกับขั้วสเตรตมีค่าน้อยมาก

- 4) อุณหภูมิของซับสเตรตทั้งสองเป็นอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งระบาย ความร้อนทั้งหมด
- 5) พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าคงที่
- 6) ไม่มีการสูญเสียความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและซับสเตรตให้กับสิ่งแวดล้อม

2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อน หรือ Heat transfer คือศาสตร์ที่ว่าด้วยการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่างๆ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยปริมาณความร้อนสุทธิจะถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ เช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่มีการไหลจากบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

2.4.1 การนำความร้อน (Conduction) การนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อความร้อนถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำภายในของแข็ง สมการการนำความร้อนเรียกว่ากฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ แสดงดังรูป



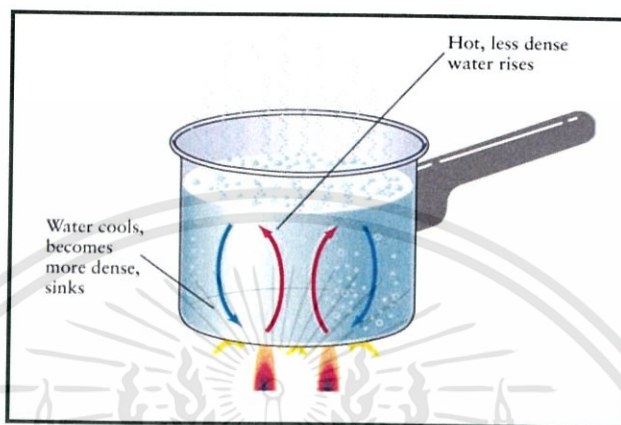
รูปที่ 2.9 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.22)$$

โดย	\dot{Q}	คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหน่วยเวลา (J/s หรือ W)
	A	คือ พื้นที่ของวัตถุ (m^2)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W m^{-1} K^{-1}$)
	$\frac{dT}{dx}$	คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ

2.4.2 การพาความร้อน (Convection) การพาความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อความร้อนมีการถ่ายเทระหว่างผิวของของแข็งไปยังของเหลวหรือแก๊ส การพาความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของของไหลรอบๆวัตถุนั้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) อีกด้วย แสดงดังรูป 2.10



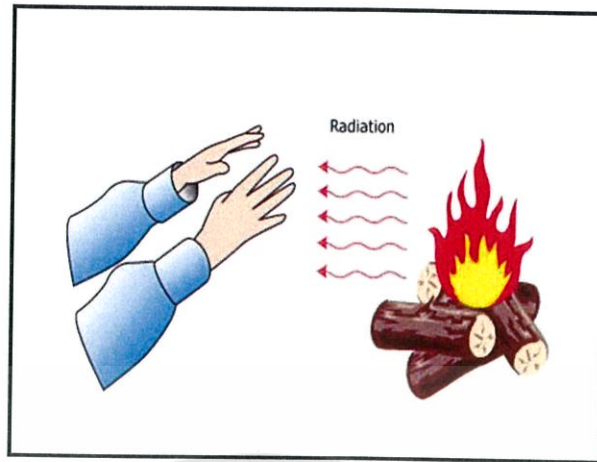
รูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

การพาความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\dot{Q}_{convection} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.23)$$

โดย	h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 C$)
	A	คือ พื้นผิวที่เกิดการพาความร้อน (m^2)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ (K)
	T_∞	คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ไกลผิวของวัตถุ (K)

2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) การแผ่รังสีความร้อนคือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกจากสสารในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการแผ่รังสี แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

การแผ่รังสีของสสารสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\dot{Q}_{\text{emit}} = \epsilon \sigma A T_s^4 \quad (2.24)$$

โดย ϵ คือ สภาพการเปล่งรังสีของพื้นผิว

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($\text{W/m}^2 \text{K}^4$)

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ (K)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสุทธิระหว่างสองผิวสามารถหาได้จาก

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2.25)$$

โดย T_{surr} คือ อุณหภูมิที่บริเวณใกล้ผิวของวัตถุ (K)

2.5 สมการการนำความร้อน

การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็นการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงที่และสภาวะไม่คงที่ โดยสภาวะคงที่หมายถึงตัวแปรต่างๆไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่จุดใดๆภายในตัวกลาง และสภาวะไม่คงที่หมายถึงตัวแปรต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่จุดใดๆภายในตัวกลาง นอกจากนี้การนำความร้อนภายในตัวกลางยังสามารถเกิดขึ้นได้ในทิศทาง 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยการนำความร้อนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจะมีลักษณะเป็นการนำความร้อนแบบ 3 มิติ แต่ถ้าหากการนำความร้อนในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมีค่าน้อยมากหรือไม่มีการนำความร้อนเลย จะสามารถตัดการนำความร้อนในทิศทางนั้นๆให้ลดลงเป็นแบบ 2 มิติ หรือ 1 มิติได้ ทำให้การคำนวณในเชิงทฤษฎีมีความซับซ้อนน้อยลง

2.5.1 การเกิดความร้อน เมื่อพลังงานรูปแบบอื่นเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วถูกสะสมไว้ในตัวกลาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดความร้อน (Heat generation) เช่น เส้นลวดทองแดงมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากถูกกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชั่วระยะเวลาหนึ่ง โดยพลังงานไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในอัตรา I^2R การเกิดความร้อนเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาณ ซึ่งปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวกลางนั้นๆ ปกตินิยมใช้สัญลักษณ์ \dot{g} มีหน่วยเป็น W/m^3

2.5.2 สมการการนำความร้อนใน 1 มิติ การนำความร้อนผ่านผนังแบนราบ เช่น ผนังของบ้าน แผ่นกระจก แผ่นเหล็ก หรือการนำความร้อนผ่านวัตถุใดๆที่มีการนำความร้อนในทิศทางเดียว หรือการนำความร้อนในทิศทางอื่นที่มีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ จะถูกเรียกว่าการนำความร้อนใน 1 มิติ

- 1) สมการการนำความร้อนในผนังแบนราบขนาดใหญ่ ผนังแบนราบมีความหนา (Δx) ความหนาแน่นของผนัง (ρ), ความร้อนจำเพาะ (C), และพื้นที่ของผนังซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของการถ่ายเทความร้อน (A) การนำความร้อนใน 1 มิติ ที่สภาวะไม่คงที่

กรณีนี้ k มีค่าไม่คงที่

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{g} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.26)$$

กรณีนี้ k มีค่าคงที่

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{g}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.27)$$

โดย $\alpha = k/\rho c$ คือ ค่าสภาพการแพร่ของความร้อนของวัตถุ

การนำความร้อนใน 1 มิติ ที่สภาวะคงที่

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{g}}{k} = 0 \quad (2.28)$$

- 2) สมการการนำความร้อนในทรงกระบอกยาว ทรงกระบอกยาวมีความยาว (L) มีชั้นความหนา (Δr) ความหนาแน่น (ρ) ความร้อนจำเพาะ (C) และมีพื้นที่ ($A = 2\pi rL$)

การนำความร้อนใน 1 มิติ ที่สภาวะไม่คงที่

กรณีค่า k มีค่าไม่คงที่

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{g} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.29)$$

กรณีค่า k มีค่าคงที่

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\dot{g}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนใน 1 มิติ ที่สภาวะคงที่

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.31)$$

- 3) สมการการนำความร้อนในทรงกลม ทรงกลมมีความหนา (Δr), ความหนาแน่น (ρ), ความร้อนจำเพาะ (C), รัศมี (R), และพื้นที่ของทรงกลมที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน ($A = 4\pi r^2$)

การนำความร้อนใน 1 มิติ ที่สภาวะไม่คงที่

กรณีค่า k ไม่คงที่

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.32)$$

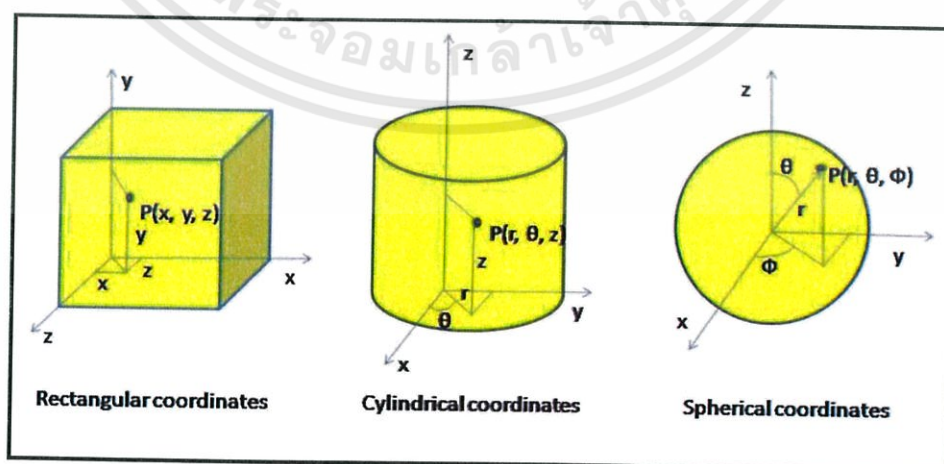
กรณีค่า k คงที่

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.33)$$

การนำความร้อนใน 1 มิติ ที่สภาวะคงที่

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.34)$$

2.5.3 สมการการนำความร้อนใน 3 มิติ สมการการนำความร้อนใน 3 มิติ คือสมการที่ใช้อธิบายการนำความร้อนในตัวกลางซึ่งเป็นของแข็ง เนื่องจากการนำความร้อนในธรรมชาติส่วนใหญ่ นั้นเกิดการนำในทั้ง 3 ทิศทาง สมการที่ใช้อธิบายจึงมีความซับซ้อนมากกว่าสมการการนำความร้อนใน 1 มิติ



รูปที่ 2.12 พิกัดแนวแกนสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) สำหรับแนวแกนสี่เหลี่ยม

การนำความร้อนใน 3 มิติ ที่สภาวะไม่คงที่

กรณีค่า k ไม่คงที่

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.35)$$

กรณีค่า k คงที่

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{g}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.36)$$

การนำความร้อนใน 3 มิติ ที่สภาวะคงที่

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{g}}{k} = 0 \quad (2.37)$$

2) สำหรับแนวทรงกระบอก

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.38)$$

3) สำหรับแนวแกนทรงกลม

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{g} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.39)$$

2.6 ครีบบระบายความร้อน

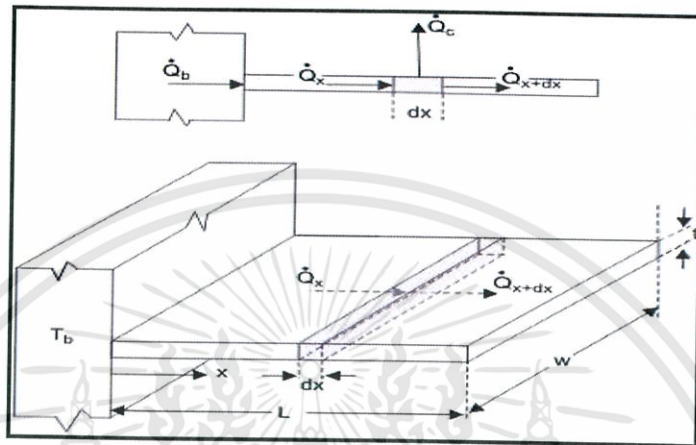
ครีบบระบายความร้อน คือ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเพิ่มการระบายความร้อนออกจากระบบ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิ T_s ไปยังตัวกลางซึ่งเป็นของไหล และมีอุณหภูมิ T_∞ สามารถคำนวณได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.40)$$

การออกแบบจะกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุและอุณหภูมิของตัวกลางซึ่งเป็นของไหลมีค่าคงที่ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการพาความร้อนจึงสามารถทำได้โดยเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) หรือเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน (A) การเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถทำได้โดยการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศ หรือเพิ่มความเร็วลม ส่วนการเพิ่มพื้นที่ระบายความร้อนสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนครีบบระบายความร้อนให้กับระบบนั้น อย่างไรก็ตาม หากทำการเพิ่มจำนวนครีบบมากเกินไป อาจส่งผลให้ของไหลที่ไหลผ่านตัวกลางของแข็งสามารถไหลผ่านได้

น้อยลง มีผลทำให้การพาความร้อนมีค่าน้อยลงไปด้วย ดังนั้นการออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยครีบจะต้องใช้จำนวนครีบและรูปทรงของครีบที่มีความพอดีกับระบบ

2.6.1 ประสิทธิภาพของครีบระบายความร้อน การออกแบบครีบระบายความร้อนใดๆต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการระบายความร้อนของครีบนั้นๆ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.13 ครีบระบายความร้อนที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม

โดยประสิทธิภาพของครีบระบายความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin,max}} = \frac{\text{อัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีบจริง}}{\text{อัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีบอุดมคติ}} \quad (2.41)$$

$$\text{หรือ } \dot{Q}_{fin} = \eta_{fin} \dot{Q}_{fin,max} = \eta_{fin} h A_{fin} (T_b - T_{\infty}) \quad (2.42)$$

โดย \dot{Q}_{fin} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของครีบจริง (W)
 $\dot{Q}_{fin,max}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของครีบในอุดมคติ (W)
 η_{fin} คือ ประสิทธิภาพของครีบ
 A_{fin} คือ พื้นที่ของครีบ (m^2)
 T_b คือ อุณหภูมิที่ฐานของครีบ (K)

ในกรณีเป็นครีบที่มีความยาวมาก สมการประสิทธิภาพของครีบคือ

$$\eta_{long\ fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin,max}} = \frac{\sqrt{hpkA_c}(T_b - T_{\infty})}{hA_{fin}(T_b - T_{\infty})} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{kA_c}{hp}} = \frac{1}{aL} \quad (2.43)$$

ครีบที่มีฉนวนหุ้มที่ปลายครีบ สมการประสิทธิภาพของครีบคือ

$$\eta_{insulated} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin,max}} = \frac{\sqrt{hpkA_c}(T_b - T_{\infty}) \tanh aL}{hA_{fin}(T_b - T_{\infty})} = \frac{\tanh aL}{aL} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของครีบริดจ์ที่ตำแหน่ง x (m^2)
 p คือ เส้นรอบรูปของครีบริดจ์ (m)
 L คือ ความยาวของครีบริดจ์ (m)
 $a = \sqrt{\frac{hp}{kA_c}}$

2.6.2 ประสิทธิภาพของครีบริดจ์ ประสิทธิภาพของครีบริดจ์ คือ พารามิเตอร์ที่บ่งบอกว่าการติดครีบริดจ์ระบายความร้อนให้กับระบบ มีผลต่อการระบายความร้อนของระบบนั้นๆอย่างไร โดยมีคำนิยามว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนขณะมีครีบริดจ์หารด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะไม่มีครีบริดจ์ เนื่องจากการติดครีบริดจ์จำนวนมากเกินไปอาจไม่ได้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ในทางกลับกันอาจลดอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบให้ลดลงอีกด้วย ดังนั้นพารามิเตอร์ตัวนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการติดครีบริดจ์ให้กับระบบระบายความร้อน โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{no\ fin}} = \frac{\text{อัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีบริดจ์ของพื้นที่ฐาน } A_b}{\text{อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ผิว } A_b} \quad (2.45)$$

โดย A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของครีบริดจ์ที่ฐาน (m^2)
 $\dot{Q}_{no\ fin}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ซึ่งไม่มีครีบริดจ์ (W)

หากประสิทธิภาพของครีบริดจ์ (ε_{fin}) มีค่าเท่ากับ 1 จะหมายความว่าครีบริดจ์บนผิวไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน หากประสิทธิภาพของครีบริดจ์มีค่ามากกว่า 1 จะหมายความว่าครีบริดจ์บนผิวมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น หากประสิทธิภาพของครีบริดจ์มีค่าน้อยกว่า 1 จะหมายความว่าครีบริดจ์บนผิวมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยลง ในทางกลับกันเมื่อรู้ประสิทธิภาพของครีบริดจ์ สามารถเขียนสมการประสิทธิภาพของครีบริดจ์ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{hA_b(T_b - T_\infty)} = \frac{\eta_{fin} h A_{fin} (T_b - T_\infty)}{hA_b(T_b - T_\infty)} = \frac{A_{fin}}{A_b} \eta_{fin} \quad (2.46)$$

ประสิทธิภาพของครีบริดจ์ที่มีความยาวเพียงพอโดยที่มีพื้นที่ผิวสม่ำเสมอภายใต้สภาวะคงที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon_{long\ fin} = \frac{\sqrt{hp k A_c} (T_b - T_\infty)}{h A_b (T_b - T_\infty)} = \sqrt{\frac{kp}{h A_c}} \quad (2.47)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวที่มีครีบริดจ์อยู่ n ครีบริดจ์ คำนวณจากผิวส่วนที่มีและไม่มีครีบริดจ์ได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{total\ fin} = \dot{Q}_{unfin} + \dot{Q}_{fin} = hA_{unfin}(T_b - T_\infty) + \eta_{fin} h A_{fin}(T_b - T_\infty) \quad (2.48)$$

ประสิทธิภาพทั้งหมดของครีบบ คือ สัดส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดของครีบบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของผิวที่ไม่มีครีบบ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\epsilon_{fin\ overall} = \frac{\dot{Q}_{total\ fin}}{\dot{Q}_{total\ no\ fin}} = \frac{h(A_{unfin} + \eta_{fin}A_{fin})(T_b - T_\infty)}{hA_{no\ fin}(T_b - T_\infty)} \quad (2.49)$$

โดย $A_{no\ fin}$ คือ พื้นที่ของผิวเมื่อไม่มีครีบบ (m^2)

A_{fin} คือ พื้นที่ผิวของครีบบทุกอันบนผิว (m^2)

A_{unfin} คือ พื้นที่ของส่วนที่ไม่มีครีบบ (m^2)

2.6.3 ความยาวที่เหมาะสมของครีบบ เมื่อนำครีบบระบายความร้อนไปติดกับผนังของระบบ ครีบบจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าต่อราคาของครีบบเมื่อครีบบมีความยาวที่พอดี หากใช้ครีบบที่มีความยาวมากเกินไป ที่ปลายของครีบบจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำมากหรือไม่มีเลย ทำให้เสียค่าใช้จ่ายโดยใช่เหตุกับการซื้อครีบบที่มีความยาวมากเกินไป ความยาวที่เหมาะสมของครีบบสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของครีบบที่มีความยาวจำกัดกับครีบบที่มีความยาวเป็นอนันต์ในสภาวะเดียวกัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin\ long}} = \frac{\sqrt{hpKA_c}(T_b - T_\infty) \tanh aL}{\sqrt{hpKA_c}(T_b - T_\infty)} = \tanh aL \quad (2.50)$$

ตารางที่ 2.1 ค่า aL

aL	$\tanh aL$
0.1	0.100
0.2	0.197
0.5	0.462
1.0	0.762
1.5	0.905
2.0	0.964
2.5	0.987
3.0	0.995
4.0	0.999
5.0	1.000

ครีบบที่เรียกว่าฮีทซิงค์ (heat sink) ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนให้กับระบบหรืออุปกรณ์ต่างๆ การถ่ายเทความร้อนของฮีทซิงค์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\dot{Q}_{fin} = \frac{(T_b - T_\infty)}{R} = hA_{fin}\eta_{fin}(T_b - T_\infty) \quad (2.51)$$

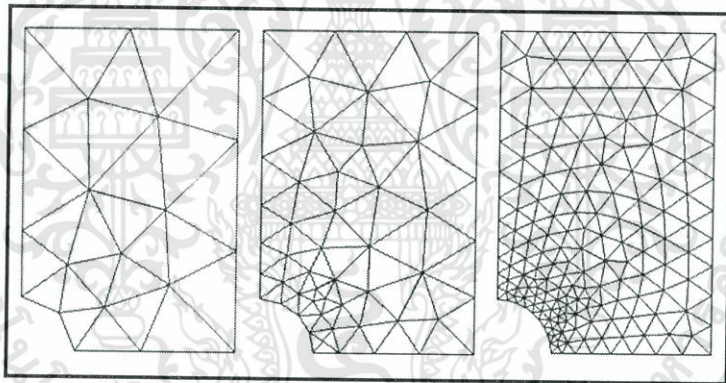
โดย R คือ ค่าความต้านทานความร้อน ($^{\circ}C/W$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง เช่น วิเคราะห์ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของของแข็ง ทั้งทางด้านสถิตศาสตร์และพลศาสตร์รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์การไหลของของไหลได้

2.7.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นมักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่างๆกันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า การหาผลเฉลยแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆจำนวนมากมายเช่นนี้ ในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (elements) ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ภายในวัสดุ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ยังบ่งชี้เป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดเป็นรูปลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงไปในระบบสมการรวมนี้ ก่อนทำการแก้ทั้งระบบสมการดังกล่าว เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

2.7.2 กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ กระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆเพียง 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) กระบวนการขั้นต้น (pre process) คือ การสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์จากรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของปัญหา จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนวิเคราะห์ปัญหานั้น การสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์อันประกอบด้วยเอลิเมนต์เป็นจำนวนมากบนรูปร่างลักษณะของปัญหาที่กำหนดมาให้ นั้น ตามปกติจะใช้เวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากรูปร่างของปัญหา มีความซับซ้อน ผู้สร้างรูปร่างบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ควรมีประสบการณ์ในการใช้ซอฟต์แวร์ชนิดนั้นๆ มาสักระยะหนึ่งจึงสามารถสร้างรูปแบบที่กำหนดให้ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพได้ เริ่มตั้งแต่การสร้างจุด เส้นตรง เส้นโค้ง รวมทั้งพื้นผิว โดยข้อมูลของจุดเส้นตรง เส้นโค้ง และพื้นผิวเหล่านี้จะถูกเก็บรูปแบบของสมการทางเรขาคณิตในหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์นั้น เพื่อผู้ใช้สามารถสร้างเอลิเมนต์ทั้งขนาดและจำนวนต่างๆกันได้ โดยรูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับรูปร่างต้นแบบของจริงมากที่สุด รูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ยังประกอบไปด้วยหมายเลขของจุดต่อหมายเลขของไฟไนต์เอลิเมนต์และขั้นตอนอื่นๆ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ขั้นต่อไป รายละเอียดต่างๆจำนวนมากเหล่านี้ปกติจะไม่แสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ยกเว้นผู้ใช้ต้องการให้แสดงเพื่อการตรวจสอบหลังจากการสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เสร็จสิ้นลงแล้ว ผู้ใช้จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตอันประกอบไปด้วยการกำหนดค่าให้กับจุดต่อของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้จำเป็นต้องเหมือนหรือใกล้เคียงกับของจริงให้มากที่สุดจึงจะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับความเป็นจริง
- 2) กระบวนการวิเคราะห์ (analysis process) ข้อมูลต่างๆของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ในขั้นตอนแรกจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ (analysis) ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งฝังตัวอยู่แล้วในซอฟต์แวร์ชุดนี้ โดยไฟไนต์เอลิเมนต์จะสร้างสมการที่สอดคล้องกับปัญหานั้นสำหรับทุกๆเอลิเมนต์ก่อนที่จะนำมาประกอบกันขึ้นเป็นระบบสมการรวมขนาดใหญ่ โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดซึ่งผู้ใช้ได้สร้างขึ้นรวมไปถึงขนาดของระบบสมการด้วย หากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (linear partial equations) ระบบสมการรวมนี้จะถูกแก้เพียงครั้งเดียวทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่มากนัก แต่หากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) ระบบสมการรวมนี้จะถูกแก้ด้วยการวนซ้ำ (iteration) หลายรอบ ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นมากขึ้น โดยเฉพาะหากรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวนมาก ดังนั้นหากผู้ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปมีความเข้าใจถึงองค์ความรู้พื้นฐานภายในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ก็จะช่วยในการตัดสินใจแก้ปัญหาต่างๆ ก่อนทำการวิเคราะห์ได้ ซึ่งจะสามารถลดเวลาการคำนวณลงไปได้มาก

- 3) กระบวนการขั้นท้าย (post process) ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่แล้วจะประกอบด้วยตัวเลขเป็นจำนวนมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ (computer graphics) ในการแสดงผล โดยเฉพาะกราฟิกส์สีเพื่อแสดงตัวเลขจำนวนมากออกมาบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว กระบวนการขั้นท้าย (post processor) นี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งซึ่งรูปแบบของการแสดงผลลัพธ์นั้นมีหลายชนิด ตั้งแต่การแสดงด้วยแถบชั้นสี (fringe plot) การแสดงด้วยเส้นชั้นสี (contour lines) และการแสดงด้วยเวกเตอร์ (vector plot) เป็นต้น

2.7.3 สมการพื้นฐานทั่วไปในสามมิติ สมการเชิงอนุพันธ์ แสดงการถ่ายเทความร้อนในของแข็ง 3 มิติที่ประกอบด้วยการนำความร้อนในโดเมน Ω โดยที่พื้นผิวรอบนอก Γ อาจมีการกำหนดอุณหภูมิ การให้ปริมาณความร้อนที่ผิว การพาความร้อน รวมไปถึงการแผ่รังสี สมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนภายใต้สถานะไม่คงที่ทั่วไป คือ

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) - Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.52)$$

โดย q_x , q_y และ q_z แทนอัตราการถ่ายเทความร้อน (heat flow rate) ในแกน x , y และ z ตามลำดับ Q คืออัตราปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นได้เอง (internal heat generation), ρ คือความหนาแน่นของมวล (mass density) และ c คือความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของวัตถุนั้น ส่วน T คืออุณหภูมิ (temperature) ที่อาจเปลี่ยนแปลงตามเวลา t ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าที่ต้องการหาจากการคำนวณ

จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) อัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความชันของการกระจายของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบเมตริกซ์โดยทั่วไปได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}}_{[k]} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.53)$$

โดย $[k]$ เรียกว่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งหากวัตถุนั้นมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic material) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้ลดรูปลงสู่แบบที่ง่าย คือ

$$[k] = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปอาจประกอบด้วย

(1) กำหนดอุณหภูมิที่ผิวตลอดผิว S_1 :

$$T_s = T_1(x, y, z, t) \quad (2.55a)$$

(2) กำหนดปริมาณความร้อนเข้าตลอดผิว S_2 :

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = -q_s \quad (2.55b)$$

(3) มีการพาความร้อนออกตลอดผิว S_3 :

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = h(T_s - T_\infty) \quad (2.55c)$$

(4) มีการแผ่รังสีออกตลอดผิว S_4 :


$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = \varepsilon \sigma (T_s^4 - \bar{T}_\infty^4) - \alpha q_r \quad (2.55d)$$

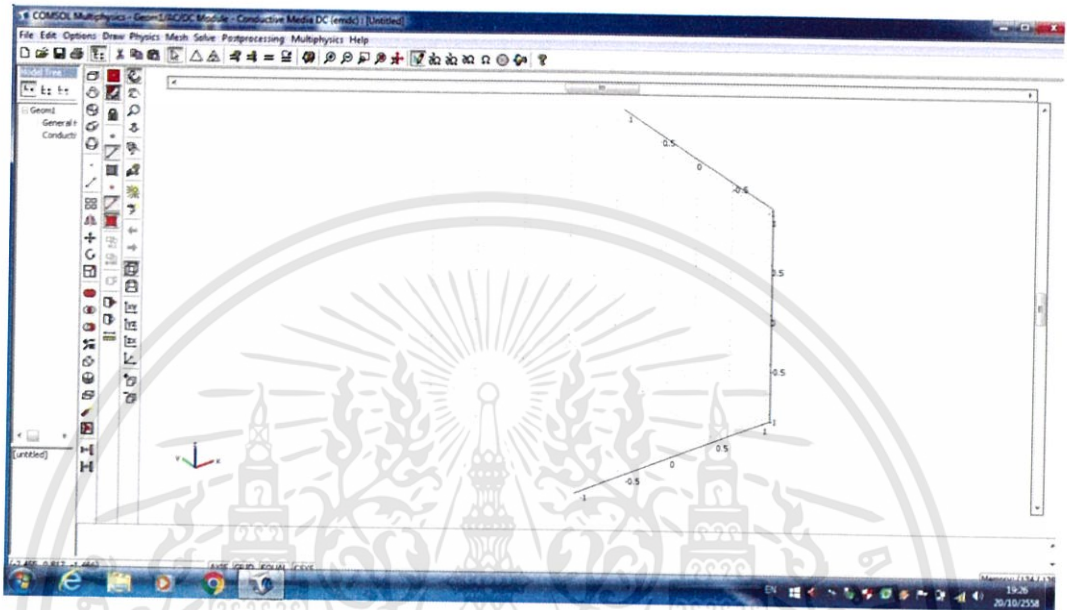
โดย q_s คือ ปริมาณความร้อนที่พุ่งเข้าสู่วัตถุ (กำหนดให้ปริมาณความร้อนที่พุ่งเข้าสู่ผิวเป็นบวก) ซึ่งอยู่ในทิศที่สวนทางกับปริมาณการนำความร้อนภายในวัตถุที่อยู่ในทิศ \hat{n} ซึ่งพุ่งตรงออกมาจากวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับผิวของวัตถุนั้น อันประกอบด้วยทิศทางโคไซน์ n_x, n_y และ n_z ตามลำดับ, h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, T_s คืออุณหภูมิที่ผิว, T_∞ คืออุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการพาความร้อน, ε คือค่าสัมประสิทธิ์การเปล่งรังสี (emissivity), σ คือค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann constance), \bar{T}_∞ คืออุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการแผ่รังสี, α คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน (absorptivity) และ q_r คือปริมาณความร้อนที่ตกกระทบเนื่องจากการแผ่รังสี

สมการเชิงอนุพันธ์ (2.52) ต้องการเงื่อนไขตอนเริ่มต้น (initial condition) ซึ่งโดยทั่วไปสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบได้ดังนี้

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2.56)$$

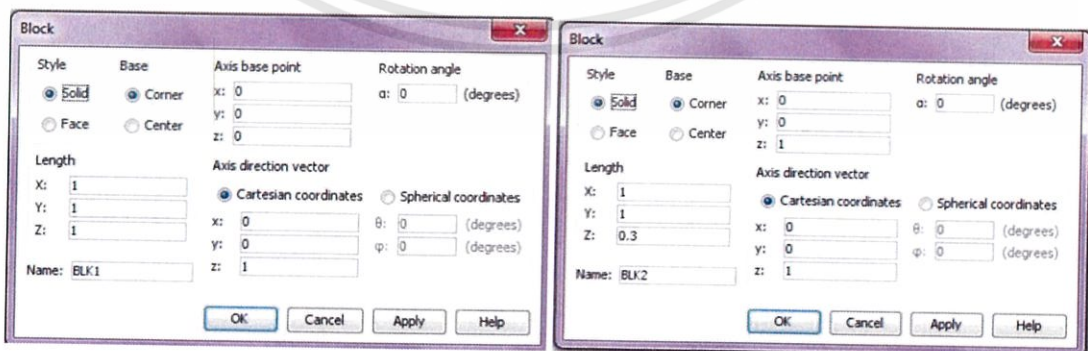
โดย T_0 แทนอุณหภูมิเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่างๆบนวัตถุนั้น

2.7.4 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซอฟต์แวร์ COMSOL เวอร์ชัน 3.5 ได้ถูกออกแบบให้สามารถทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดยเมื่อทำการติดตั้งซอฟต์แวร์เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะปรากฏไอคอน  บนเดสก์ทอปของวินโดวส์ เมื่อ COMSOL ถูกเปิดก็จะปรากฏหน้าต่างหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.15



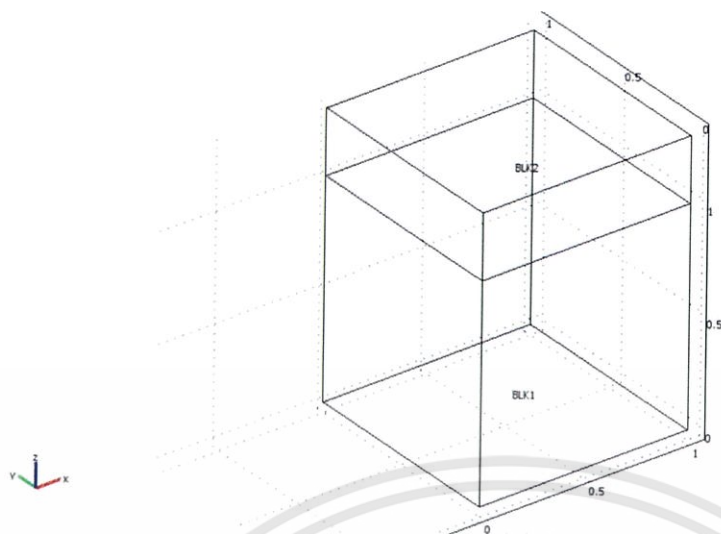
รูปที่ 2.15 หน้าต่างหลักของ COMSOL

ขั้นตอนที่1 หลังจากเปิด COMSOL ขึ้นมาแล้ว เป็นขั้นตอนการสร้างโมเดล โดยการสร้างกล่องสี่เหลี่ยมจะใช้คำสั่ง Draw > block ซึ่งจะปรากฏกล่องสนทนา Block ดังรูปที่ 7 ให้กรอกตัวเลขพิกัดเท่ากับ (1,1,1) ลงในช่อง X, Y และ Z ตามลำดับจากนั้นกดปุ่ม OK ก็จะได้กล่องขนาด 1x1x1 จากนั้นทำการสร้างกล่องสี่เหลี่ยมอีกกล่องวางทับบนกล่องแรก โดยให้กรอกตัวเลขพิกัดเท่ากับ (1,1,0.3) ลงในช่อง X,Y และ Z ตามลำดับ แล้วทำการเลื่อน Axis base point ที่แกน Z เป็น 1 จากนั้นกดปุ่ม OK



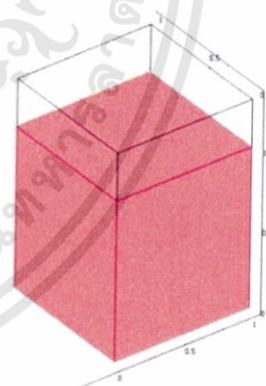
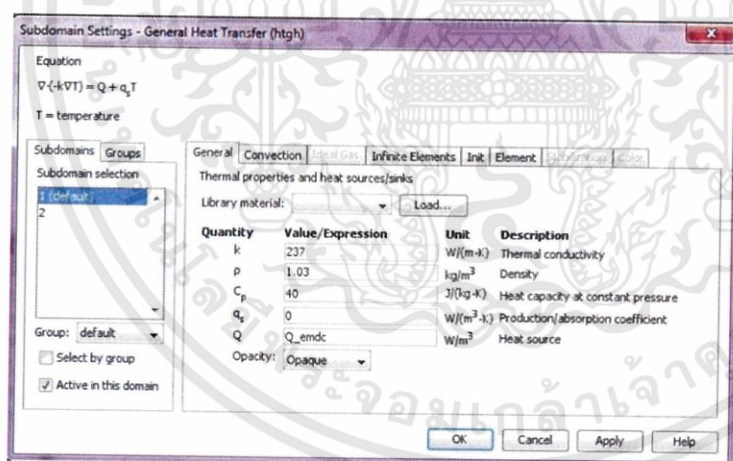
รูปที่ 2.16 กล่องสนทนา Block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



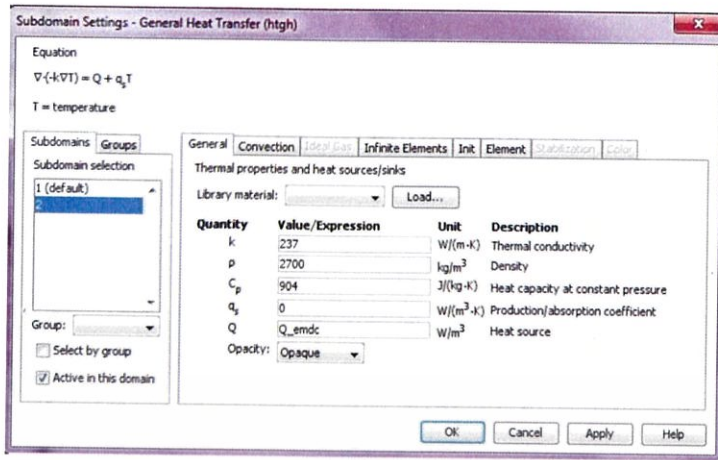
รูปที่ 2.17 กล่องสี่เหลี่ยมที่สร้างจากคำสั่ง Draw >block

ขั้นตอนที่ 2 ทำการกำหนดค่า Subdomain โดยเลือกที่ General Heat Transfer จากนั้นเลือกคำสั่ง Physics > Subdomain Settings ซึ่งจะปรากฏกล่องสนทนา Subdomain Settings-General Heat Transfer จากนั้นให้เลือกกล่องที่ 1 แล้วทำการกำหนดค่า k, ρ, c_p แล้วกดปุ่ม OK ทำเช่นเดียวกับกล่องที่ 2 แล้วกดปุ่ม OK ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



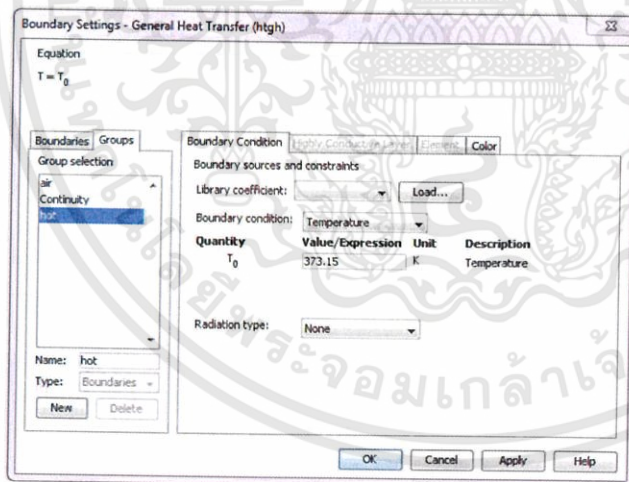
รูปที่ 2.18 การกำหนดค่า Subdomain กล่องที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

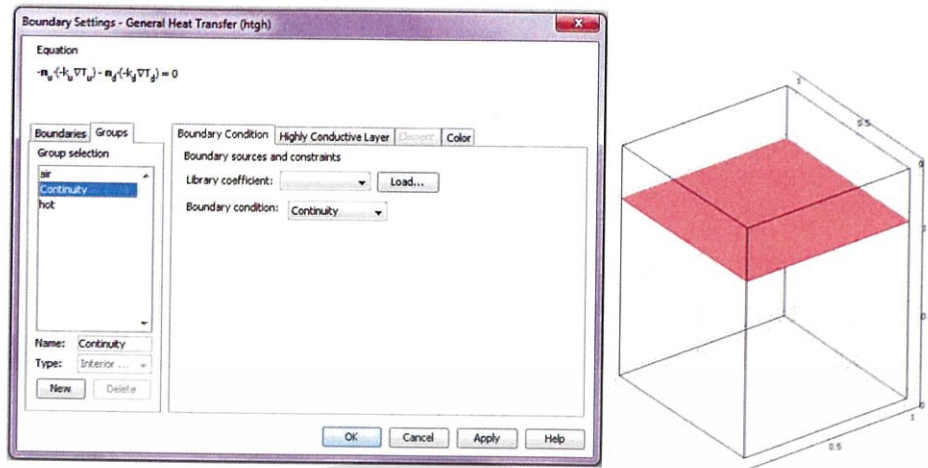


รูปที่ 2.19 การกำหนดค่า Subdomain กล่องที่ 2

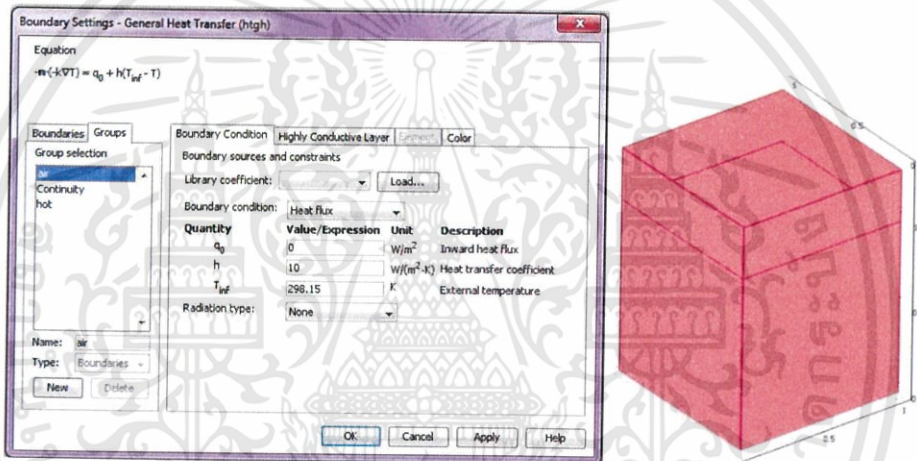
ขั้นตอนที่ 3 ทำการกำหนดค่า Boundary โดยเลือกที่ General Heat Transfer จากนั้นเลือกคำสั่ง Physics > Boundary Settings ซึ่งจะปรากฏกล่องสนทนา Boundary Settings-General Heat Transfer จากนั้นให้ทำการกำหนดขอบเขตแต่ละด้านโดยด้านบนสุดจะกำหนดให้เป็นอุณหภูมิ 373.15 K รอยต่อตรงกลางไม่นำมาคิด ให้เลือกเป็น Continuity ส่วนด้านที่เหลือให้เลือกเป็น Heat flux โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพา $h=10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ และ อุณหภูมิภายนอก $T_{\text{inf}} = 298.15 \text{ K}$



รูปที่ 2.20 การกำหนดค่าอุณหภูมิ 373.15 K

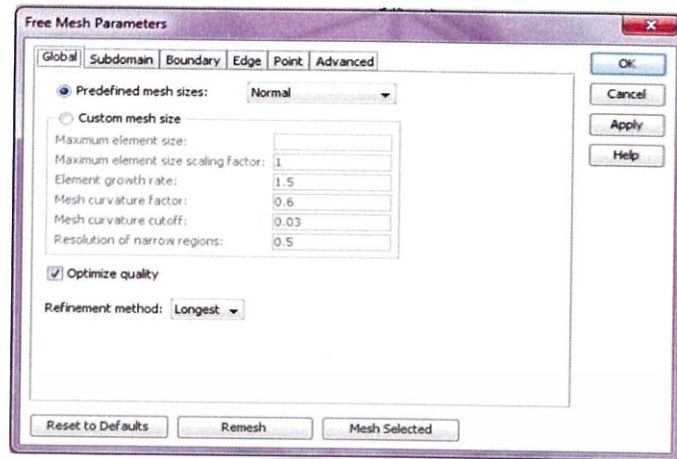


รูปที่ 2.21 การเลือกเป็น Continuity

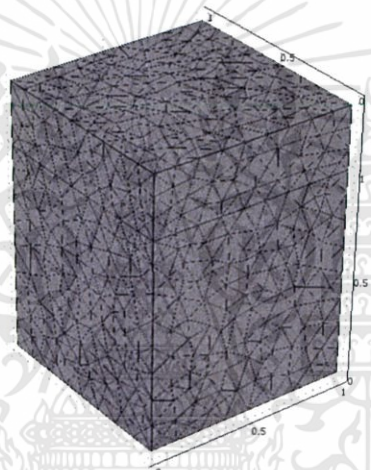


รูปที่ 2.22 การกำหนดค่า Heat flux

ขั้นตอนที่ 4 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็น
 เอลิเมนต์ย่อยๆ โดยใช้คำสั่ง Mesh > Free Mesh Parameters ซึ่งจะปรากฏกล่องสนทนา Free
 Mesh Parameters ดังรูปที่ 2.23 เลือก Predefined mesh sizes เป็น Normal กด Remesh แล้ว
 กด OK

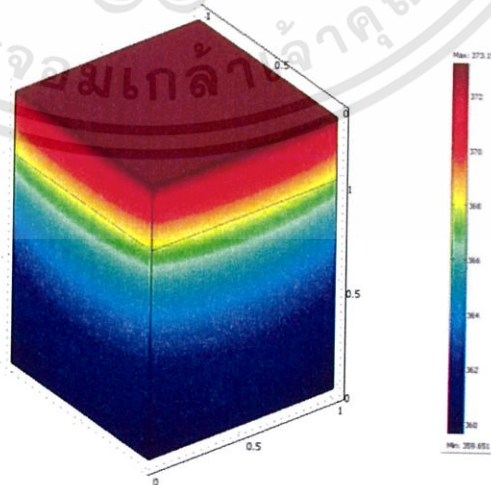


รูปที่ 2.23 กล่องสนทนา Free Mesh Parameters



รูปที่ 2.24 การแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

ขั้นตอนที่ 5 ทำการ RUN โปรแกรมโดยใช้คำสั่ง Solve > Solve Problem



รูปที่ 2.25 ผลการกระจายอุณหภูมิด้วยแถบชั้นสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 ไยหิน คือวัสดุชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน นิยมใช้ห่อหุ้มอุปกรณ์ที่มีความร้อนสูง เพื่อมิให้พลังงานความร้อนเกิดการสูญเสีย และป้องกันอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งอุณหภูมิที่ไยหินสามารถใช้ได้คือ ตั้งแต่ 1 องศาเซลเซียส ถึง 820 องศาเซลเซียส โดยไยหิน จะช่วยรักษาอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ไยหินผลิตมาจากหินธรรมชาติ น้ำหนักเบา ทนความร้อนได้สูง ดูดซับเสียงได้ดี ไม่ติดไฟ กันน้ำได้ดี ไม่ดูดซับความชื้น และ ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะ



รูปที่ 3.1 ไยหิน

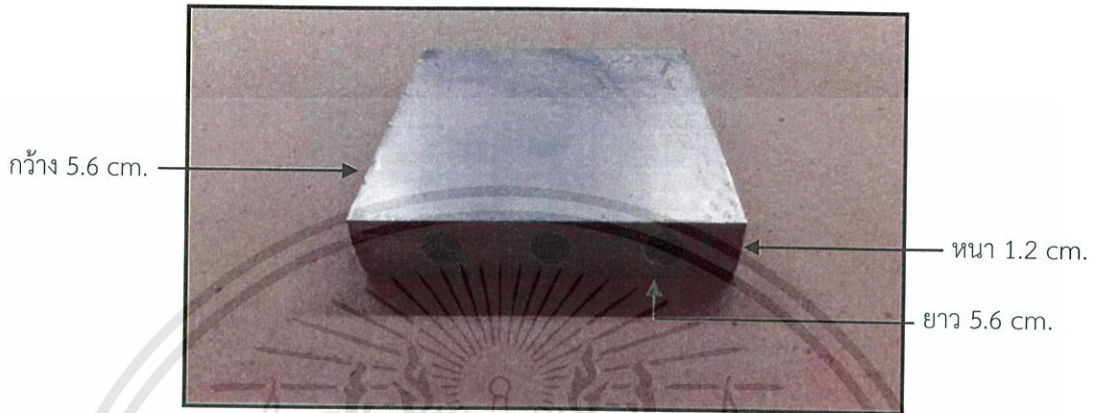
3.1.2 เครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ต่อเข้ากับเทอร์โมคัปเปิลและฮีตเตอร์ สามารถใช้วัดอุณหภูมิของวัตถุที่สัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิล และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ ทำให้ฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามที่ผู้ทดลองกำหนด



รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 แผ่นอะลูมิเนียม (Aluminium) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติคงทนต่อการหัก ความร้อน การกัดกร่อน น้ำหนักเบา และมีความสามารถในการสะท้อนแสงและความร้อนได้ดี โดยในการทดลองนี้ อลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบกับฮีตเตอร์ โดยความร้อนจากฮีตเตอร์จะทำให้อลูมิเนียมมีอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 3.3 แผ่นอะลูมิเนียม

3.1.4 ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater) มีลักษณะเป็นแท่ง เหมาะสำหรับการใช้ให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง หรือโลหะต่างๆ ลักษณะการใช้งานทั่วไปของ ฮีตเตอร์แท่ง คือ ใส่ไว้ในช่องที่ถูกเจาะไว้ในวัตถุ ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากฮีตเตอร์ไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของฮีตเตอร์

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)	6.0
ความยาวท่อของฮีตเตอร์ (mm)	50
แรงดัน (V)	220
กำลังวัตต์ (W)	200



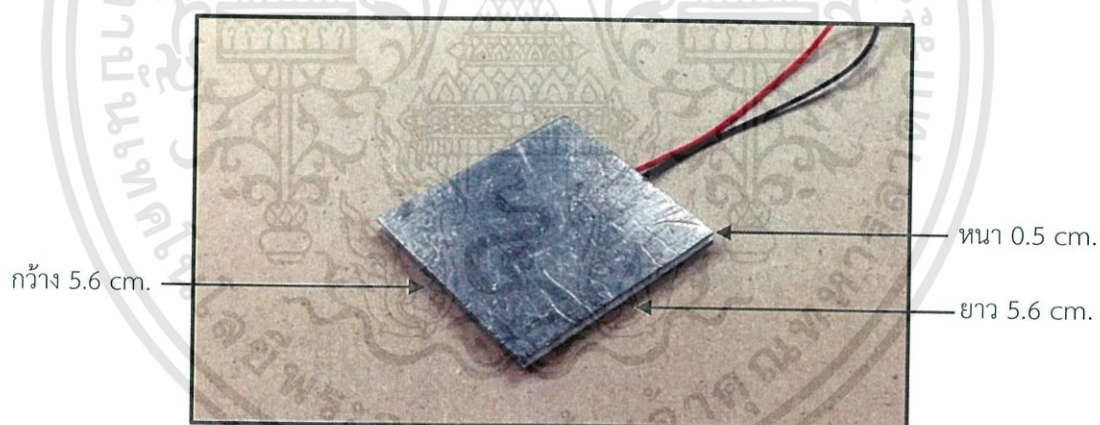
รูปที่ 3.4 ฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45 คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ถูกประกอบขึ้น จากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีที่ถูกนำมาเรียงต่อกัน และแต่ละด้านมีเซรามิกทำหน้าที่เป็นฉนวน ประกอบอยู่ทั้งสองด้าน เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดได้ เมื่อมีผลต่าง ของอุณหภูมิ

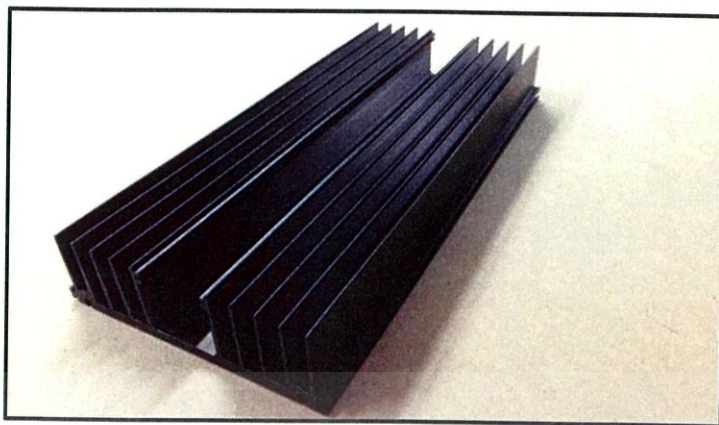
ตารางที่ 3.2 ลักษณะจำเพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

TELBP1-12656-0.45 Size: 56 mm x 56 mm	
อุณหภูมิด้านร้อน (°C)	350
อุณหภูมิด้านเย็น (°C)	30
แรงดันขณะเปิดวงจร (volts)	9.2
ความต้านทานขาออกที่เหมาะสม (ohms)	0.97
ศักย์ไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (volts)	4.6
กระแสไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (amperes)	4.7
กำลังไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (watts)	21.7
ความร้อนที่ไหลผ่านโมดูล (watts)	329
ฮีทฟลักซ์ (watts/cm ²)	10.5



รูปที่ 3.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45

3.1.6 ฮีทซิงค์(Heat Sink) เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนออกจากตัวอุปกรณ์โดยอาศัย หลักของการถ่ายเทความร้อน โดยมากทำมาจากวัสดุประเภทโลหะ ประสิทธิภาพของฮีทซิงค์ จะ ขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) พื้นที่ผิวสัมผัส การออกแบบ รูปร่าง และจำนวนครีระบายความร้อนที่เหมาะสม ในโครงการพิเศษนี้ ฮีทซิงค์ที่ใช้มีจำนวน 10 ครี



รูปที่ 3.6 ฮีตซิงค์

3.1.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ $-250 - 1300^{\circ}\text{C}$ มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง



รูปที่ 3.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K

3.1.8 ซิลิโคนสำหรับงานส่งผ่านความร้อน ซิลิโคนคือ สารประกอบพวก Thermal Compound หรือตัวนำความร้อน ทำหน้าที่ในการทำให้การส่งผ่านความร้อนระหว่างรอยต่อของวัสดุมีประสิทธิภาพ



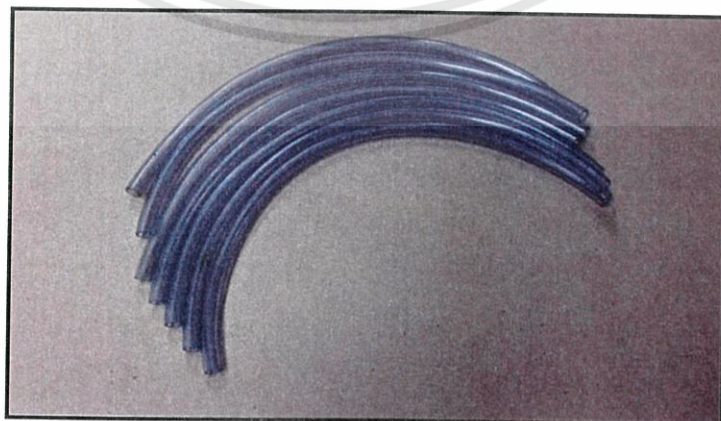
รูปที่ 3.8 ซิลิโคนสำหรับงานส่งผ่านความร้อน

3.1.9 ท่อทองแดง มีความแข็งแรงความทนทาน นิยมใช้ในงานเดินท่อระบบความเย็นและความร้อน ท่อทองแดงที่นำมาทำท่อในระบบการทำความเย็นจะมีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 cm



รูปที่ 3.9 ท่อทองแดง

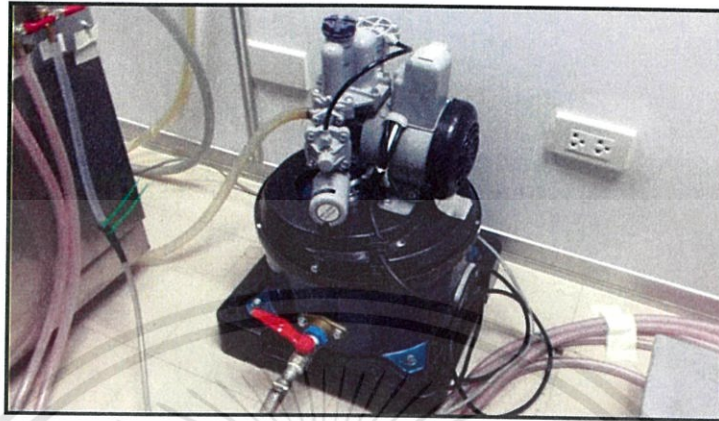
3.1.10 สายยาง



รูปที่ 3.10 สายยาง

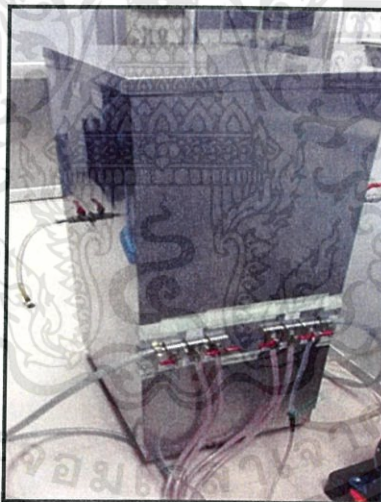
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 ปั๊ม เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยส่งผ่านพลังงานจากแหล่งต้นกำเนิดไปยังของเหลว เพื่อให้ของเหลวเคลื่อนที่จากเครื่อง Chiller ไปยังฮีตซิงค์



รูปที่ 3.11 ปั๊ม

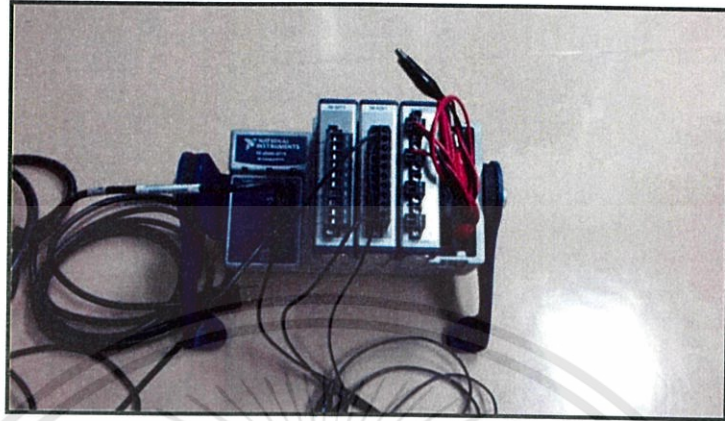
3.1.12 Chiller คือ เครื่องทำความเย็นมีหน้าที่ในการผลิตน้ำเย็น หรือปรับอุณหภูมิน้ำเย็น มีปุ่มปรับระดับความเย็นได้ 7 ระดับ



รูปที่ 3.12 เครื่องทำความเย็น

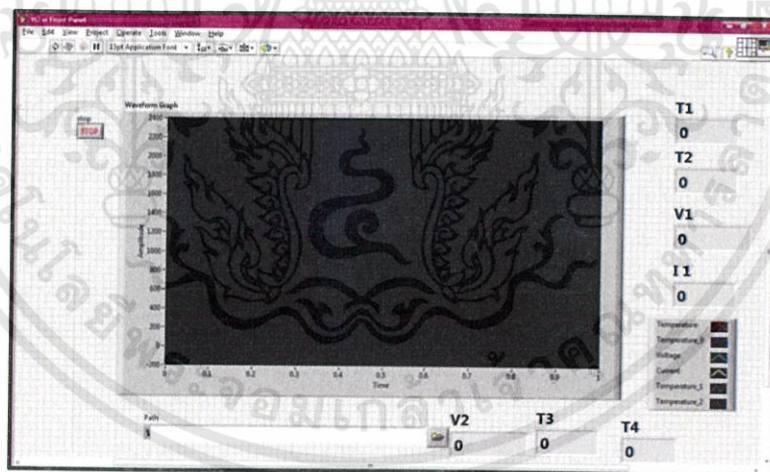
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.13 เครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า แล้วทำการบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่อง ตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้ ใช้ร่วมกับโปรแกรม LAB VIEW



รูปที่ 3.13 เครื่องบันทึกข้อมูล NI9211

3.1.14 โปรแกรม LAB VIEW เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการจัดการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานวิศวกรรม โปรแกรมจะทำการเก็บสัญญาณและแสดงผลแบบ Real Time ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บและนำมาวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.14 โปรแกรม LAB VIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

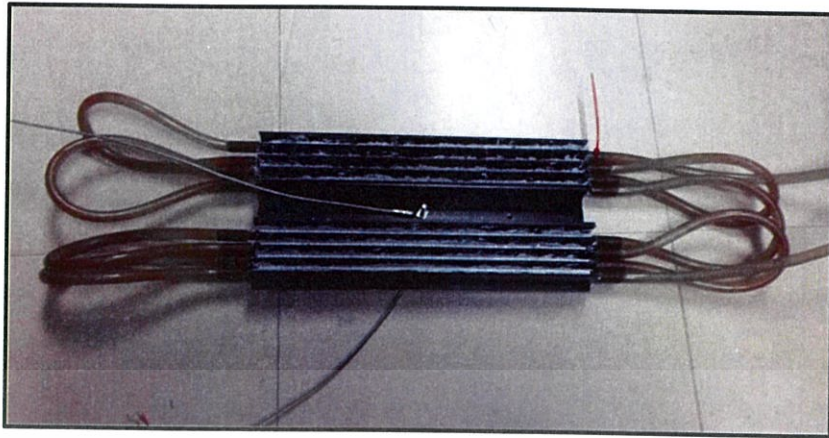
การทดลองมีจุดประสงค์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในระบบจึงประกอบด้วยระบบทำความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และระบบระบายความร้อน

3.2.1 การออกแบบระบบทำความร้อน ระบบทำความร้อนประกอบด้วย โยหิน ฮีตเตอร์ชนิดแห้ง เทอร์โมคัปเปิล เครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน และอลูมิเนียม โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดแผ่นอะลูมิเนียมให้มีขนาดเท่ากับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยด้านกว้างมีขนาด 5.6 เซนติเมตร ด้านยาวมีขนาด 5.6 เซนติเมตร
- 2) ทำการเจาะอลูมิเนียมจำนวน 3 รู เพื่อใส่ฮีตเตอร์ชนิดแห้ง โดยให้แต่ละรูมีระยะห่างเท่าๆกัน และต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกเท่ากับฮีตเตอร์ชนิดแห้ง โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูที่เจาะ 0.6 cm มีความลึก 5 cm
- 3) เจาะด้านข้างของอลูมิเนียมเพื่อทำการติดสายเทอร์โมคัปเปิล
- 4) ตัดโยหินให้มีขนาดกว้าง 4.8 cm ยาว 12.7 cm แล้วทำการเจาะบริเวณตรงกลางของโยหินให้เป็นช่อง โดยมีขนาดและความลึกพอดีให้สามารถใส่แผ่นอลูมิเนียมและเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้
- 5) ทำการใส่อลูมิเนียมและเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเข้าไปในช่องของโยหิน สอดฮีตเตอร์เข้าไปในรูของอลูมิเนียม
- 6) ทำการต่อฮีตเตอร์และเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องกำเนิดความร้อน

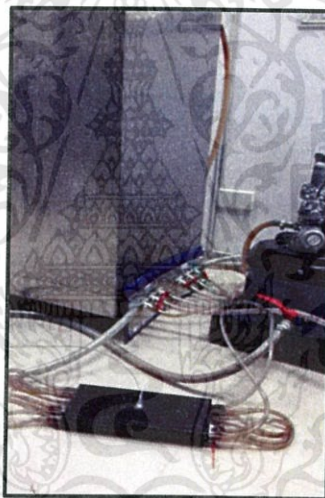
3.2.2 ออกแบบระบบระบายความร้อน เนื่องจากระบบของเราที่มีระบบทำความร้อน ระบบระบายความร้อนจึงเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากต้องใช้ในการระบายความร้อนของระบบออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบระบายความร้อนคือ ฮีตซิงค์ เทอร์โมคัปเปิล ท่อทองแดง สายยาง ซิลิโคน เครื่องทำความเย็น และปั๊ม

- 1) เจาะด้านบนและด้านหลังของฮีตซิงค์เพื่อทำการติดสายเทอร์โมคัปเปิล
- 2) ตัดท่อทองแดงให้มีความยาวเท่ากับฮีตซิงค์
- 3) ทาซิลิโคนลงไประหว่างครีบของฮีตซิงค์ เพื่อเพิ่มการส่งผ่านความร้อนระหว่างฮีตซิงค์และท่อทองแดง จากนั้นทำการสอดท่อทองแดงเข้าไปในช่องระหว่างครีบของฮีตซิงค์
- 4) ตัดสายยางให้มีความยาวพอเหมาะ ให้สายยางสามารถงอได้ นำสายยางที่ตัดแล้วมาสวมเข้ากับปลายท่อทองแดงแต่ละท่อ โดยให้ท่อที่อยู่ริมสุดของแต่ละด้านเป็นทางเข้าและทางออกของน้ำสำหรับต่อเข้ากับเครื่องทำความเย็น แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การออกแบบฮีตซิงค์

- 5) นำปลายสายทางด้านหนึ่งต่อเข้ากับก๊อกน้ำที่เป็นด้านน้ำเข้าของเครื่องทำความเย็น และปลายสายอีกด้านต่อเข้ากับด้านน้ำออก แสดงดังรูป 3.16

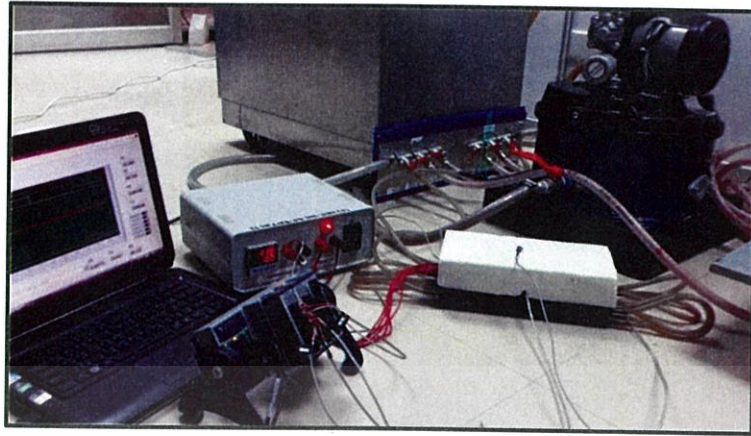


รูปที่ 3.16 ระบบระบายความร้อน

3.2.3 ขั้นตอนการประกอบชุดการทดลอง

- 1) ต่อเครื่องทำความเย็นเข้ากับปั๊ม จากนั้นต่อทางเข้าและทางออกของน้ำที่ฮีตซิงค์เข้ากับเครื่องทำความเย็น
- 2) ต่อเทอร์โมคัปเปิลของฮีตซิงค์ทั้งด้านบนและด้านล่างเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล NI9211
- 3) นำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล มาวางบริเวณตรงกลางของฮีตซิงค์
- 4) นำระบบทำความร้อนมาวางครอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 5) ต่อฮีตเตอร์และเทอร์โมคัปเปิลของระบบทำความร้อนเข้ากับเครื่องกำเนิดความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ระบบการทดลอง

3.2.4 ขั้นตอนการทดลอง

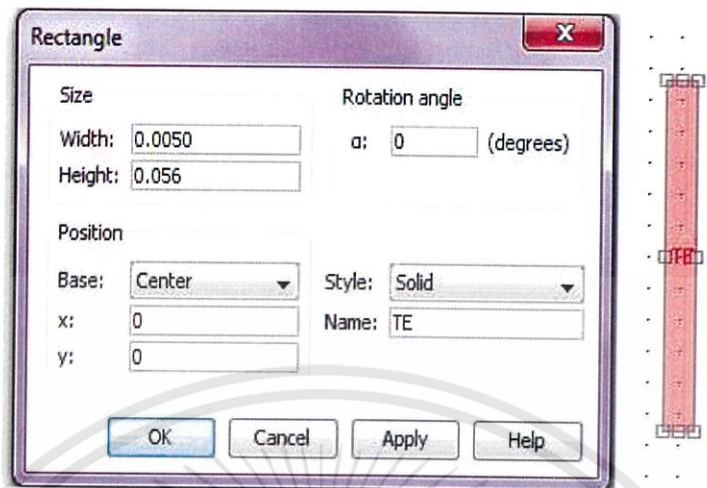
- 1) เติมน้ำลงในเครื่องทำความเย็นจนเต็ม จากนั้นเสียบปลั๊กให้เครื่องทำความเย็นทำงาน รอจนน้ำเย็น
- 2) เมื่อน้ำในเครื่องทำความเย็นเย็นแล้ว ทำการเปิดปั๊มเพื่อให้น้ำไหลผ่านท่อทองแดง
- 3) เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ จากนั้นทำการจ่ายความร้อนให้กับฮีตเตอร์ตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้
- 4) ทำการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 โดยใช้โปรแกรม LAB VIEW เป็นตัวเก็บข้อมูล รอจนระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล
- 5) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ยุติการบันทึกข้อมูลแล้วนำข้อมูลนั้นมาพล็อตกราฟ
- 6) นำข้อมูลที่ได้จากกราฟ กำหนดเป็นค่า Boundary condition ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4 การใช้โปรแกรม Finite element ในการออกแบบโมเดล

โปรแกรม Finite element คือโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม โดยสร้างแบบจำลองในระบบ 2 มิติ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม เพื่อจำลองสภาวะต่างๆที่ต้องการทดลอง

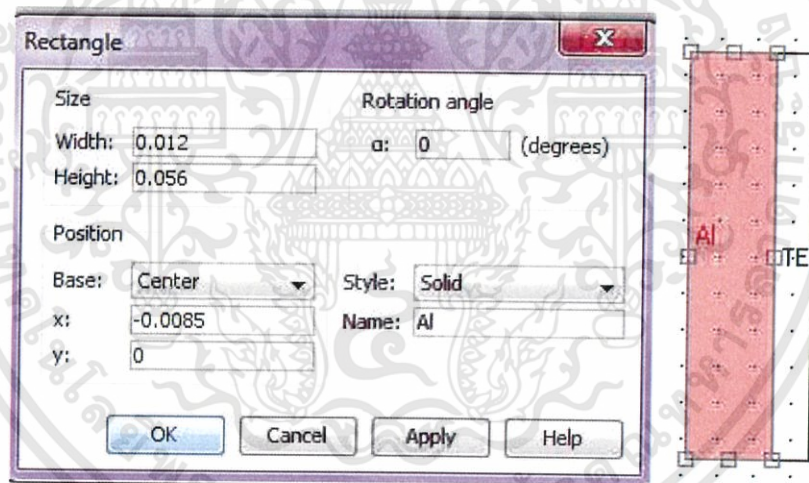
- 1) วัดขนาดของอุปกรณ์จริงที่ใช้ในการทดลอง
- 2) วาดชุดการทดลองในโปรแกรม Finite element หลังจากเปิด COMSOL ขึ้นมาแล้ว เป็นขั้นตอนการสร้างโมเดล โดยการใช้คำสั่ง Draw แล้วเลือกวัตถุที่ต้องการ กำหนดขนาดชิ้นงานจริง จากนั้นกดปุ่ม OK

สร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยกำหนดความกว้าง 0.005 m ความสูง 0.056 m



รูปที่ 3.18 การสร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

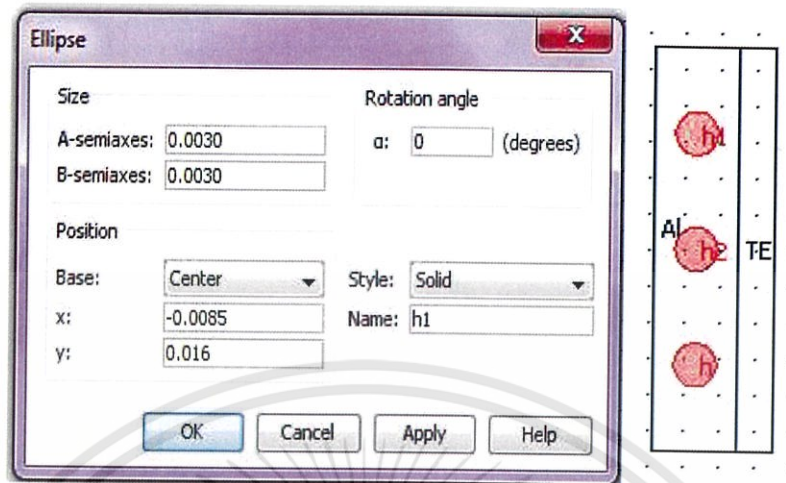
สร้างแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียม โดยกำหนดความกว้าง 0.012 m ความสูง 0.056 m



รูปที่ 3.19 การสร้างแบบจำลองแผ่นอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างแบบจำลองฮีตเตอร์ โดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.003 m



รูปที่ 3.20 การสร้างแบบจำลองฮีตเตอร์

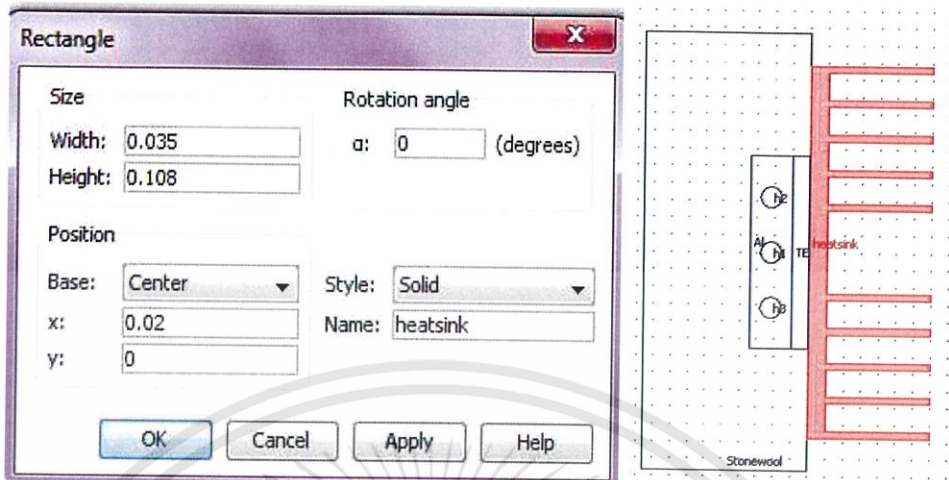
สร้างแบบจำลองใยหิน โดยกำหนด ด้านกว้าง 0.048 m สูง 0.127 m



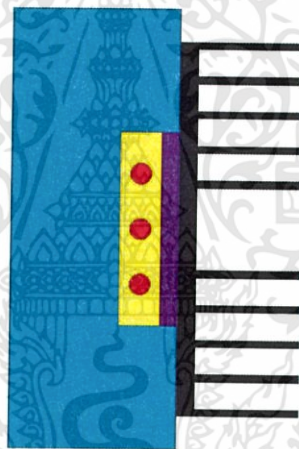
รูปที่ 3.21 การสร้างแบบจำลองใยหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างแบบจำลองฮีตเตอร์ โดยกำหนด ด้านกว้าง 0.035 m สูง 0.108 m



รูปที่ 3.22 การสร้างแบบจำลองฮีตเตอร์



รูปที่ 3.23 โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

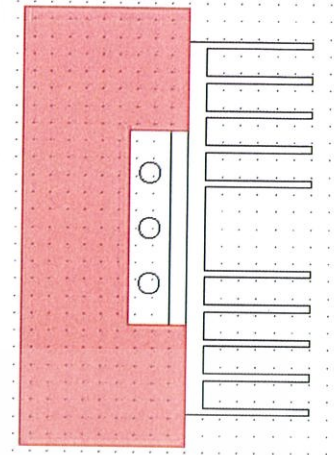
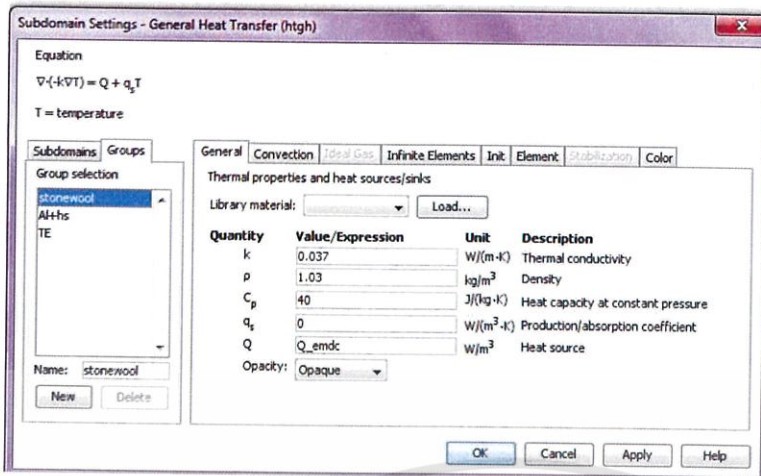
3) ทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ โดยกำหนดค่า k, ρ, c_p

- ใยหิน กำหนด k 0.037 W/mK

ρ 1.03 kg/m^3

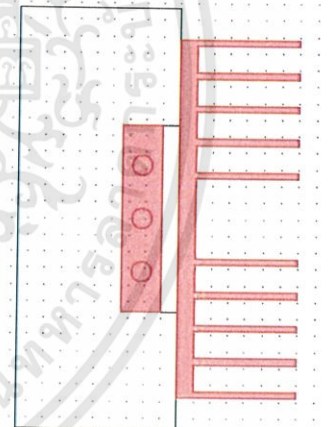
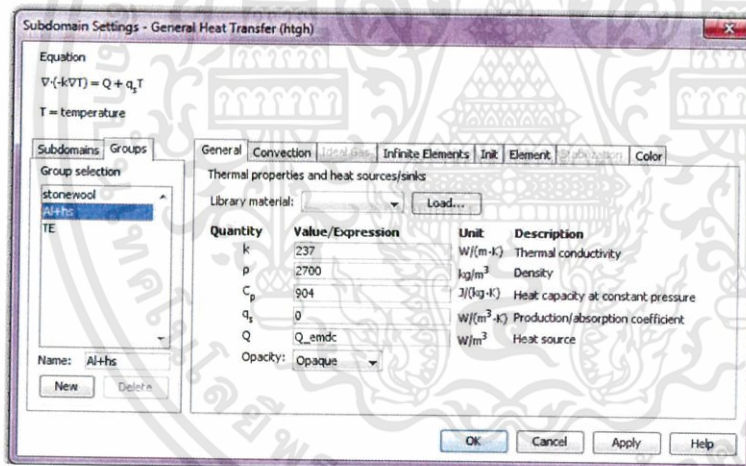
c_p 40 $J/(kg \cdot K)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 การกำหนดคุณสมบัติของใยหิน

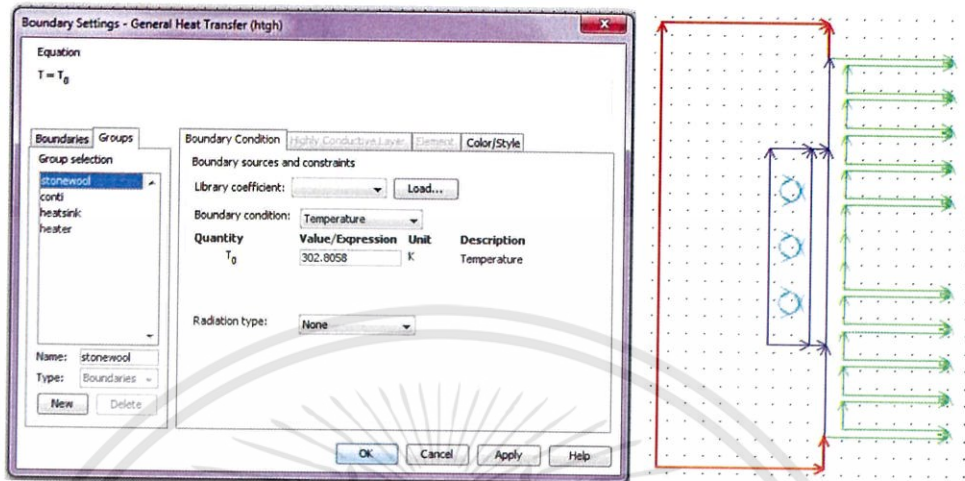
- อะลูมิเนียมและฮีตซิงค์ กำหนด k 237 W/mK
 ρ 2700 kg/m^3
 c_p 904 $J/(kg \cdot K)$



รูปที่ 3.25 การกำหนดคุณสมบัติของอะลูมิเนียมและฮีตซิงค์

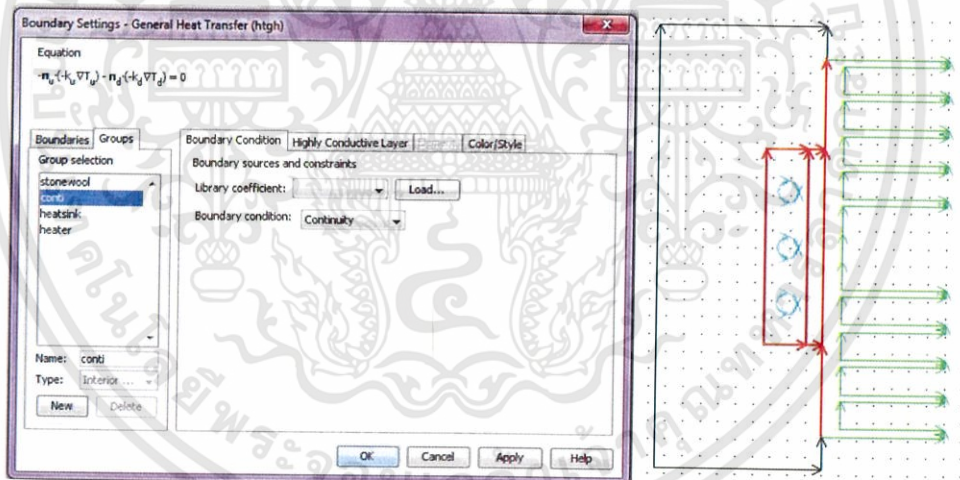
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ทำการกำหนดขอบเขตของวัสดุ
- ไยหิน กำหนดเป็น Temperature



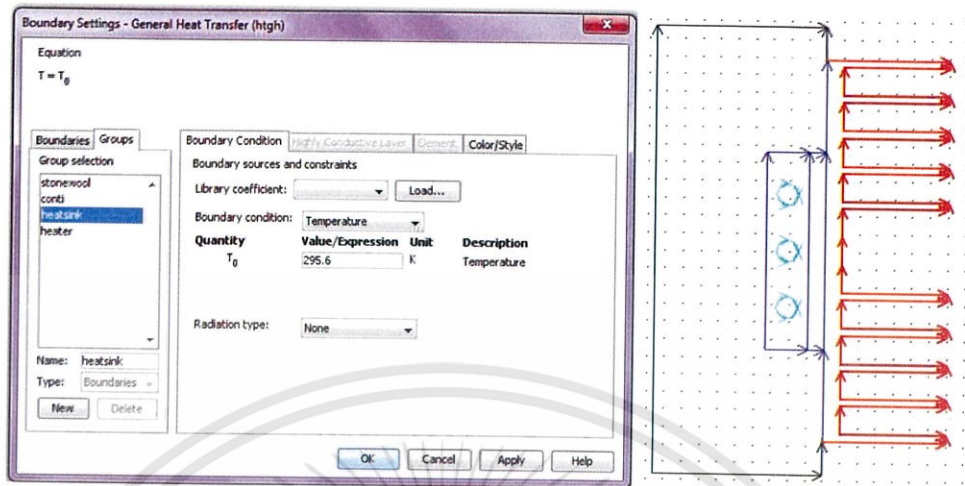
รูปที่ 3.26 การกำหนดขอบเขตของใยหิน

- แผ่นอะลูมิเนียมและเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล กำหนดเป็น Continuity



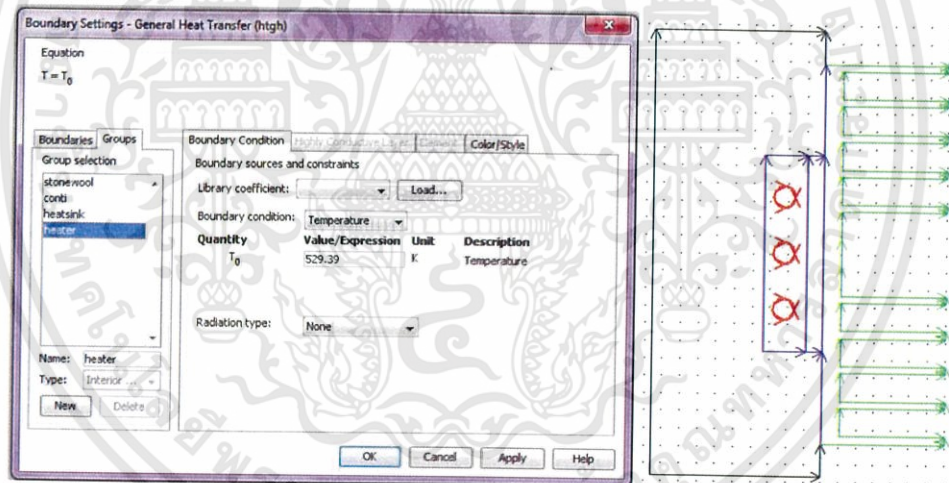
รูปที่ 3.27 การกำหนดขอบเขตของแผ่นอะลูมิเนียมและเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

- ฮีตซิงค์ กำหนดเป็น Temperature



รูปที่ 3.28 การกำหนดขอบเขตของฮีตซิงค์

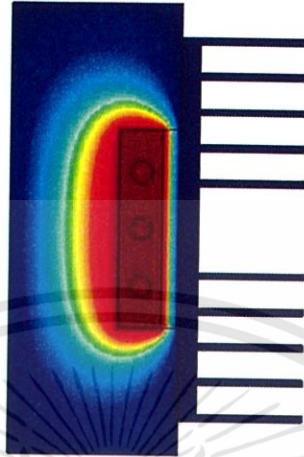
- ฮีตเตอร์ กำหนดเป็น Temperature



รูปที่ 3.29 การกำหนดขอบเขตของฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ใช้คำสั่งให้โปรแกรมประมวลผลตามเงื่อนไขที่กำหนด โปรแกรมจะแสดงภาพที่เป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิ แล้วนำผลที่ได้ไปพล็อตกราฟ



รูปที่ 3.30 แสดงภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

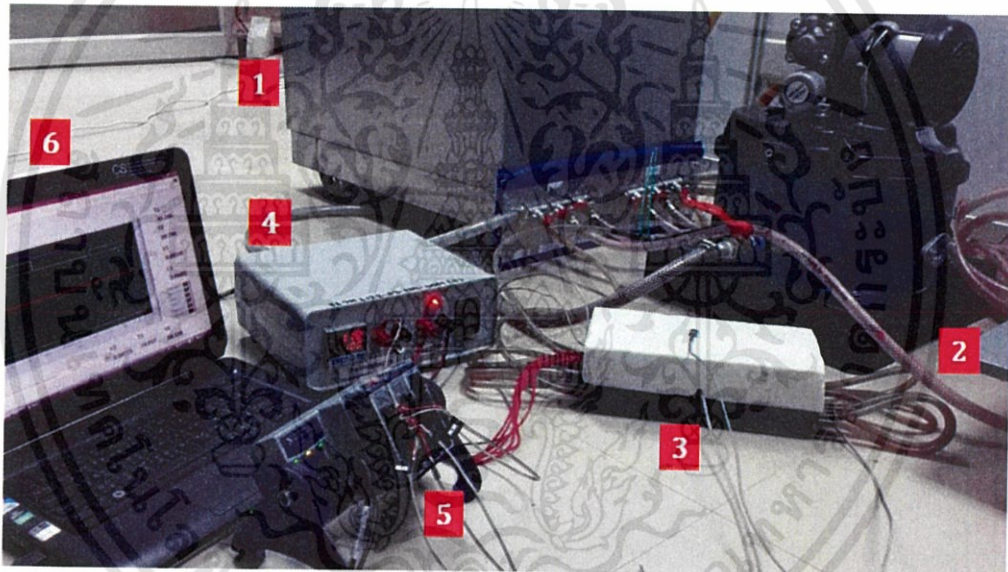
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายผลการวิจัยและการอภิปรายผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่อุณหภูมิต่างๆ กำหนดให้ฮีตเตอร์จ่ายความร้อนจนกระทั่งด้านร้อนมีอุณหภูมิเป็น 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส
- 2) เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ได้จากโครงการพิเศษนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

4.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



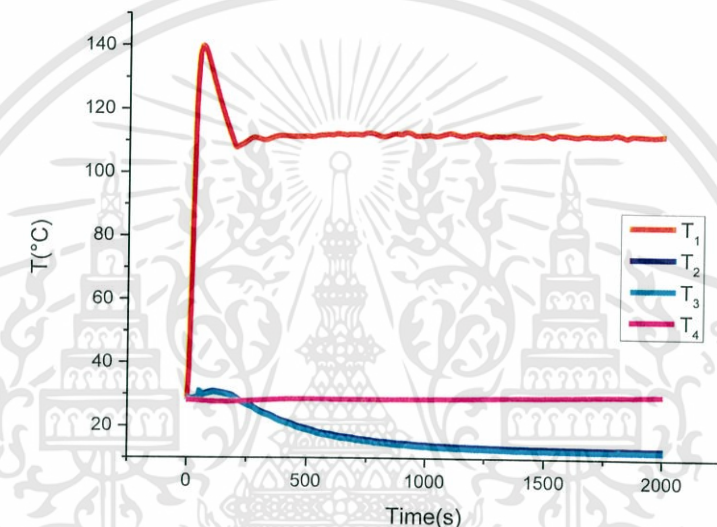
รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตไฟฟ้า

- หมายเหตุ :
- 1 คือ Chiller ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิด้านเย็น
 - 2 คือ ปั๊ม ใช้สำหรับควบคุมน้ำเข้าสู่ชุดการทดลอง
 - 3 คือ ชุดการทดลอง
 - 4 คือ Temp Control ใช้สำหรับจ่ายความร้อน
 - 5 คือ เครื่อง NI 9211 ใช้สำหรับบันทึกค่าอุณหภูมิ
 - 6 คือ คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจัดเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม LAB VIEW

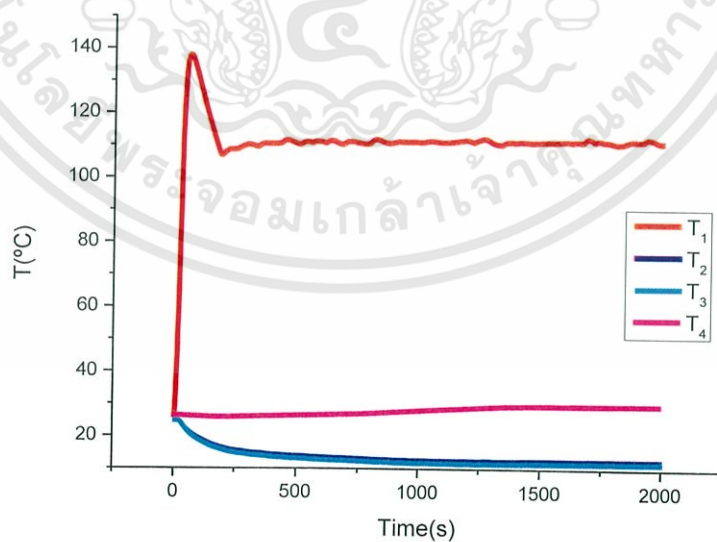
ในเบื้องต้นจะทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยการกำหนดให้ฮีตเตอร์จ่ายความร้อนจนกระทั่งด้านร้อนมีอุณหภูมิเป็น 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส ในขณะเดียวกันก็เปิดระบบระบายความร้อนที่ฮีตซิงค์ ใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ทั้งหมด 4 ตัว ในการวัดอุณหภูมิ และใช้เครื่อง NI9211 ในการวัดผล ใช้โปรแกรม LABVIEW เป็นตัวเก็บข้อมูล รอจนกระทั่งระบบทั้งหมดอยู่ในสภาวะคงที่ นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิต่างๆ ทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของจุดที่ทำการวัดกับเวลา ที่อุณหภูมิต่างๆ

- กำหนดค่าอุณหภูมิด้านร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียส



(a)



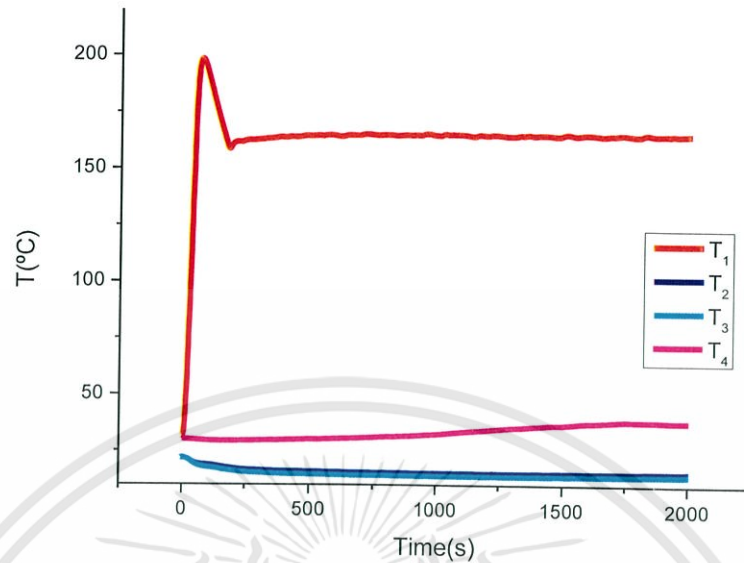
(b)

รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิด้านร้อน 100 องศาเซลเซียส

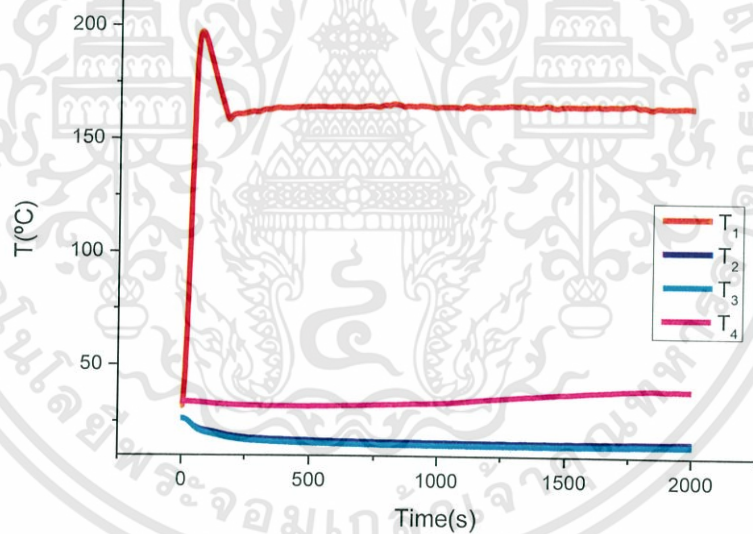
(a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดค่าอุณหภูมิด้านร้อนเป็น 150 องศาเซลเซียส



(a)



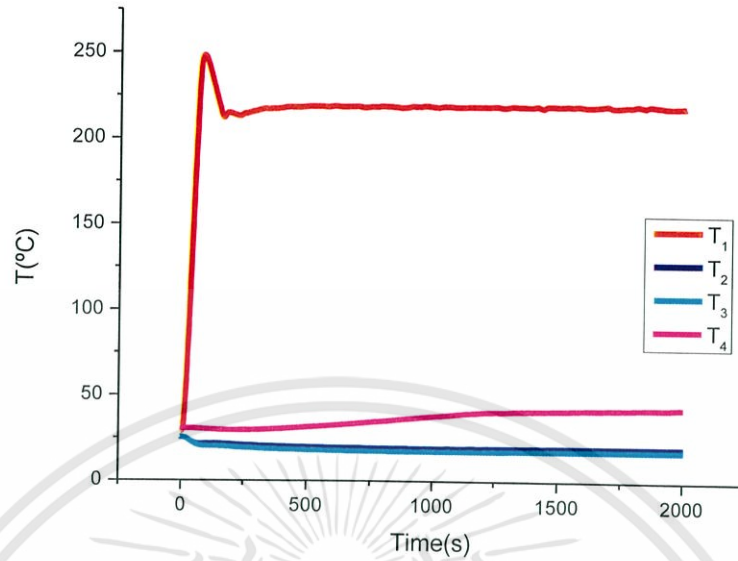
(b)

รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิด้านร้อน 150 องศาเซลเซียส

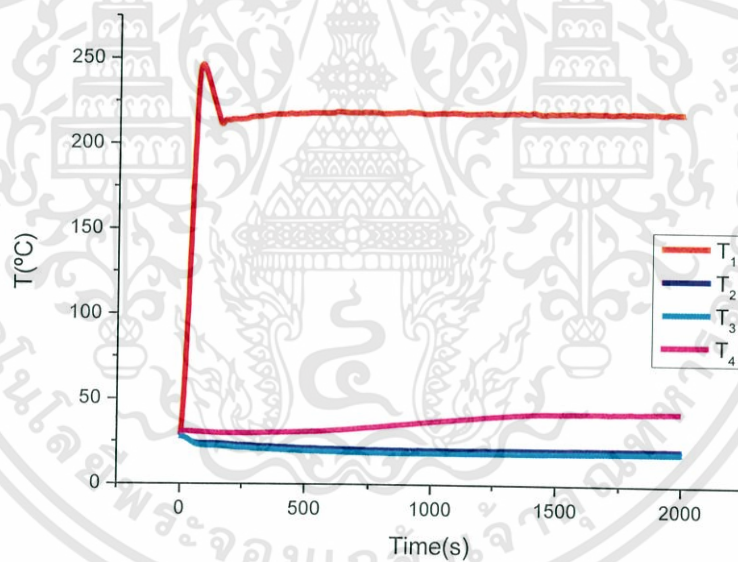
(a) ทดลองครั้งที่1 (b) ทดลองครั้งที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดค่าอุณหภูมิด้านร้อนเป็น 200 องศาเซลเซียส



(a)



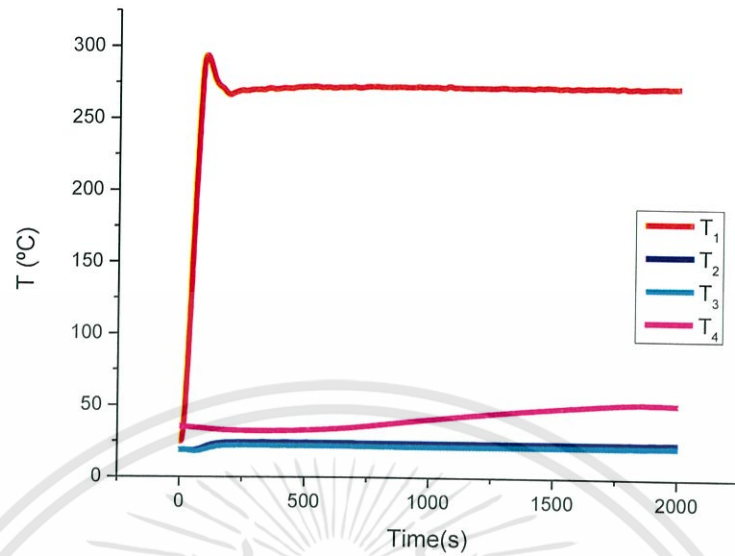
(b)

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส

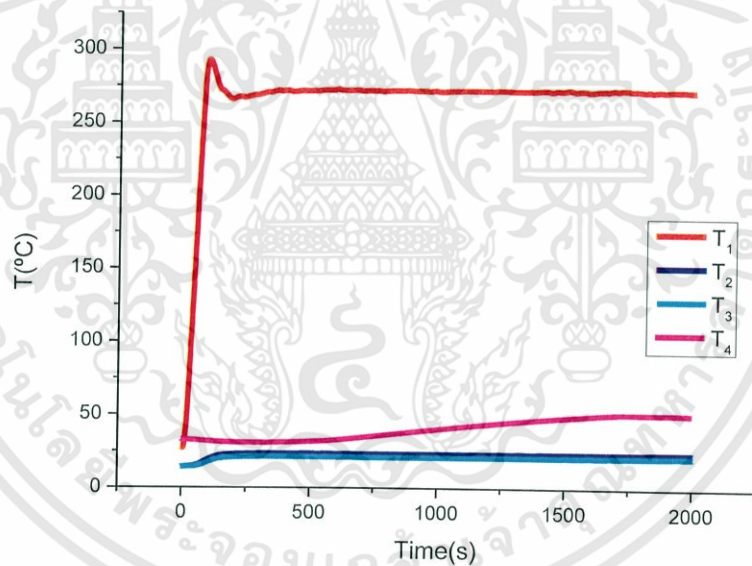
(a) ทดลองครั้งที่1 (b) ทดลองครั้งที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดค่าอุณหภูมิเป็น 250 องศาเซลเซียส



(a)



(b)

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส

(a) ทดลองครั้งที่1 (b) ทดลองครั้งที่2

จากรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4, และ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส โดยจะแสดงกราฟทั้งหมด 4 เส้น ซึ่งแสดงข้อมูลของ T_1 (อุณหภูมิด้านร้อน), T_2 (อุณหภูมิด้านบนฮีตซิงค์), T_3 (อุณหภูมิด้านล่างฮีตซิงค์) และ T_4 (อุณหภูมิไยหิน) ในรูป (a) ทดลองครั้งที่1 (b) ทดลองครั้งที่2 อุณหภูมิที่ได้จะใกล้เคียงกัน ที่อุณหภูมิ 100,

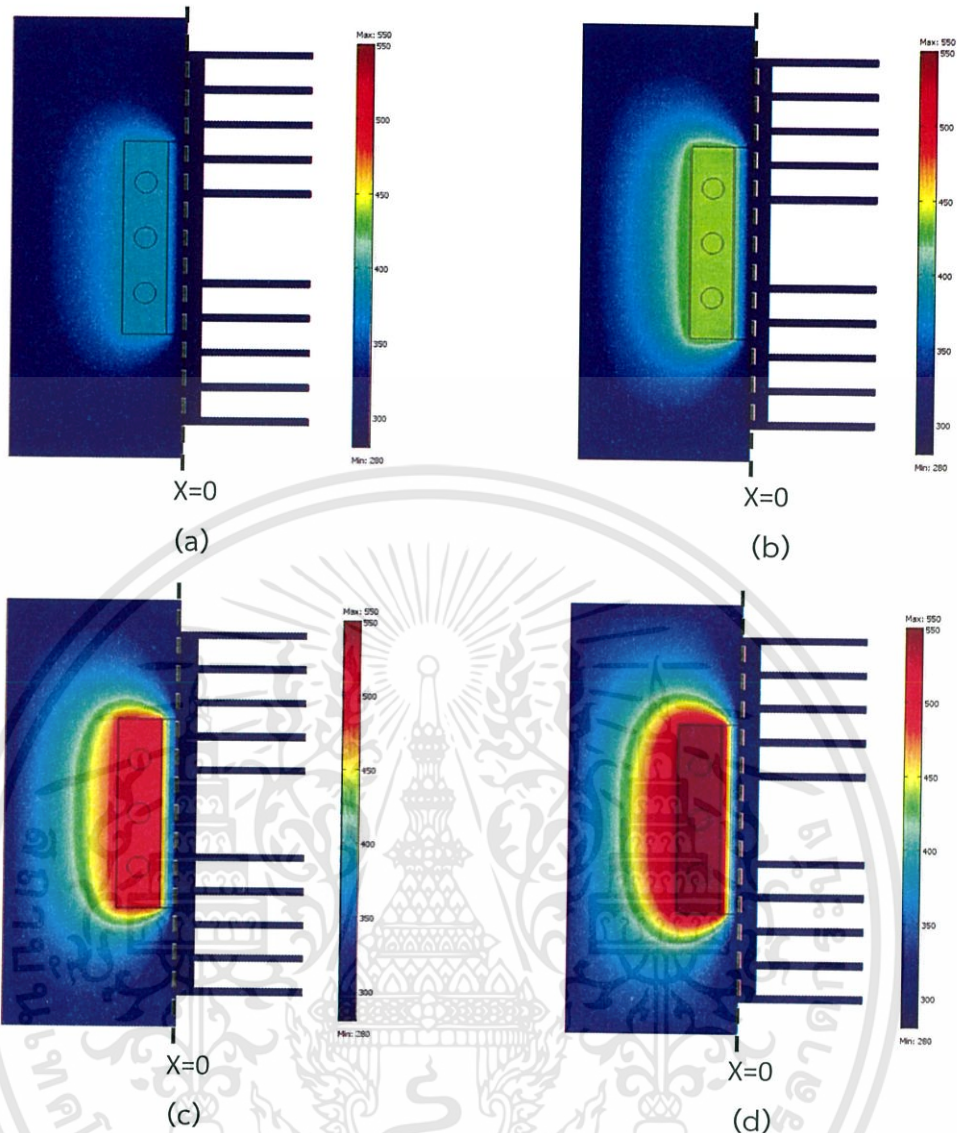
150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส เส้นกราฟมีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือจะมีการเพิ่มขึ้น จนระบบทั้งหมดอยู่ในสภาวะคงที่ ที่เวลาประมาณ 1500 วินาที

ทำการเลือกอุณหภูมิของฮีตเตอร์ ฮีตซิงค์ และใยหิน ที่อยู่ในสภาวะสมดุล ในโครงการพิเศษนี้ทำการเลือกอุณหภูมิที่เวลา 1500 วินาที ซึ่งแสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ ฮีตซิงค์ และใยหิน ที่สภาวะสมดุล ของอุณหภูมิต่างๆ

T_{setup} (°C)	ครั้งที่	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)
100	1	111.9470	12.8660	12.1258	29.6558
	2	111.5128	12.4514	11.6717	29.6374
150	1	164.9636	15.3892	14.1143	38.1553
	2	164.4927	16.0513	14.7961	39.2698
200	1	219.0477	19.4616	17.6206	42.4467
	2	218.5422	20.6743	18.8603	42.4925
250	1	272.2940	24.1588	21.6417	51.9934
	2	272.1473	23.6962	21.1878	50.8130

4.1.2 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยใช้โปรแกรม COMSOL เริ่มทำการวาดรูประบบเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตไฟฟ้าในระบบ 2 มิติ ลงในโปรแกรม ทำการกำหนดค่าคุณสมบัติของตัววัสดุและกำหนดค่า Boundary condition โดยนำค่าจากตารางที่ 4.1 คือ T_1 (อุณหภูมิด้านร้อน), T_3 (อุณหภูมิด้านล่างฮีตซิงค์) และ T_4 (อุณหภูมิใยหิน) ของแต่ละอุณหภูมิมากำหนดเป็นค่า Boundary condition เพื่อให้โปรแกรมแสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในส่วนต่างๆของระบบดังรูปที่ 4.6

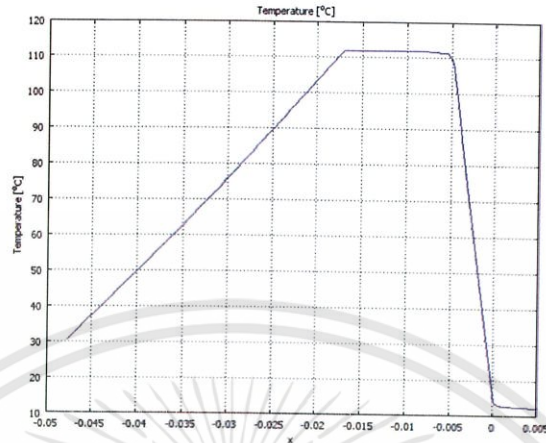


รูปที่ 4.6 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ (a) 100 องศาเซลเซียส (b) 150 องศาเซลเซียส (c) 200 องศาเซลเซียส (d) 250 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.6 เป็นแผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ (a) 100 องศาเซลเซียส (b) 150 องศาเซลเซียส (c) 200 องศาเซลเซียส (d) 250 องศาเซลเซียส ในระบบ 2 มิติ โดยที่ตำแหน่ง $x=0$ เป็นรอยต่อระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลกับฮีตซิงค์ ผลจากรูปจะเห็นว่าที่ฮีตเตอร์และแผ่นอะลูมิเนียมอุณหภูมิจะสูงที่สุด และความร้อนจะค่อยๆ แพร่กระจายไปรอบๆ โดยทางด้านที่เป็นใยหินจะสังเกตเห็นชั้นสีอุณหภูมิได้ชัดเจน ส่วนด้านที่เป็นฮีตซิงค์อุณหภูมิจะต่ำ เพราะเกิดจากระบบระบายความร้อน เมื่อดูจากชั้นสีแล้วไม่สามารถบอกอุณหภูมิที่แม่นยำได้ จึงต้องทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ในโปรแกรม COMSOL เพื่อดูค่าอุณหภูมิในแต่ละจุด

4.1.3 กราฟจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

- ที่อุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.7 เมื่อทำการพิจารณากราฟจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึงอุณหภูมิที่เราทำการป้อนค่าลงในโปรแกรมคือ 111.9470 °C จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่ง $x=0.005$ จนถึงตำแหน่ง $x=0$ ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและฮีตซิงค์ อุณหภูมิก็จะเริ่มคงที่

เมื่อได้ข้อมูลจากกราฟดังรูปที่ 4.8 จึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ในตัวโปรแกรม COMSOL โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ไปเรื่อยๆ จนอุณหภูมิในตำแหน่งที่ $x=0$ มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ทดลองได้จริง T_2 ดังตารางที่ 4.2

x	Temperature [°C]
-0.014522608	111.94009
-0.013919596	111.947
-0.013316583	111.947
-0.012713566	111.947
-0.01211055	111.947
-0.0115075335	111.947
-0.010904521	111.947
-0.010301508	111.947
-0.009698488	111.947
-0.009095479	111.947
-0.008492462	111.947
-0.007889442	111.923584
-0.0072864294	111.808556
-0.0066834167	111.70899
-0.0060803965	111.62046
-0.0054773837	111.54053
-0.004874371	108.998024
-0.0042713583	97.07545
-0.003668338	85.15791
-0.0030653179	73.24379
-0.0024623126	61.332638
-0.0018592924	49.423073
-0.0012562796	37.515438
-6.532669E-4	25.608255
5.0246716E-5	13.701211
5.52766E-4	12.6446085
0.001177788	12.374271
0.001758799	12.503931
0.0023618117	12.433588
0.002964832	12.36324
0.0035678372	12.2928915
0.0041708574	12.222538
0.0047738776	12.152183

รูปที่ 4.8 ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
1.4	12.6446
1.6	12.7177
1.7	12.7542
1.8	12.7906
1.9	12.8270
2.0	12.8633

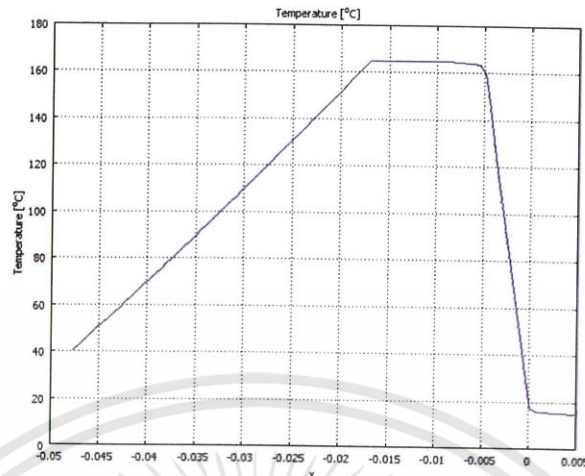
จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.0 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 12.8633 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 12.8660 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.3 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 100 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
1.90	12.3731
2.00	12.4094
2.05	12.4275
2.10	12.4457
2.11	12.4493
2.12	12.4529

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.12 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 12.4529 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 12.4514 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

- ที่อุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.9 เมื่อทำการพิจารณากราฟจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึงอุณหภูมิที่เราทำการป้อนค่าลงในโปรแกรมคือ 164.9636 °C จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่ง $x=0.005$ จนถึงตำแหน่ง $x=0$ ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและฮีตซิงค์ อุณหภูมิก็จะเริ่มคงที่

เมื่อได้ข้อมูลจากกราฟดังรูปที่จึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ในตัวโปรแกรม COMSOL โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ไปเรื่อยๆ จนอุณหภูมิในตำแหน่งที่ $x=0$ มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ทดลองได้จริง T_2 ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 150 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
1.90	15.1740
2.10	15.2289
2.12	15.2946
2.25	15.3657
2.27	15.3766
2.28	15.3821

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.28 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 15.3821 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 15.3892 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

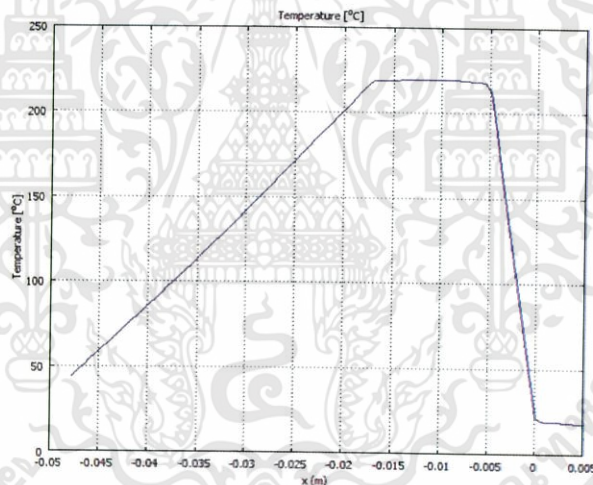
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 150 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
1.80	15.7932
1.90	15.8477
2.00	15.9022
2.10	15.9565
2.20	16.0108
2.28	16.0542

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.28 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 16.0542 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 16.0513 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

- ที่อุณหภูมิเป็น 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.10 เมื่อทำการพิจารณากราฟจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิจะค่อยๆเพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึงอุณหภูมิที่เราทำการป้อนค่าลงในโปรแกรมคือ 219.0477 °C จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่ง $x=0.005$ จนถึงตำแหน่ง $x=0$ ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและฮีตซิงค์ อุณหภูมิก็จะเริ่มคงที่

เมื่อได้ข้อมูลจากกราฟ จึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ในตัวโปรแกรม COMSOL โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ไปเรื่อยๆ จนอุณหภูมิในตำแหน่งที่ $x=0$ มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ทดลองได้จริง T_2 ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 200 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
2.28	19.3135
2.30	19.3281
2.40	19.4009
2.48	19.4590
2.50	19.4736
2.49	19.4663

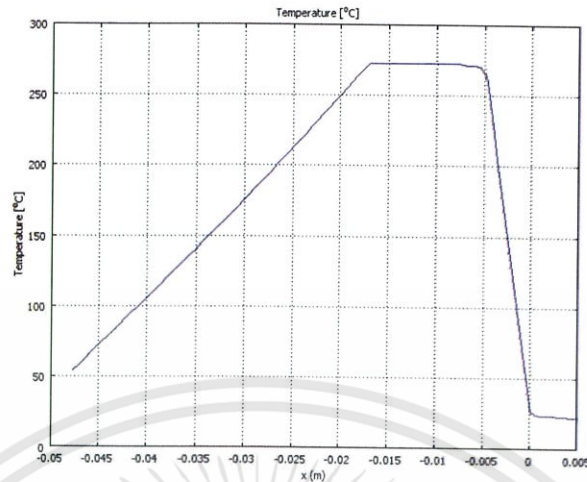
จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.49 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 19.4663 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 19.4616 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.7 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 200 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
2.30	20.5530
2.40	20.6251
2.50	20.6972
2.49	20.6900
2.48	20.6828
2.47	20.6750

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.47 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 20.6750 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 20.6743 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

- ที่อุณหภูมิเป็น 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.11 เมื่อทำการพิจารณากราฟจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึงอุณหภูมิที่เราทำการป้อนค่าลงในโปรแกรมคือ 272.2940 °C จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่ง $x=0.005$ จนถึงตำแหน่ง $x=0$ ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและฮีตซิงค์ อุณหภูมิก็จะเริ่มคงที่

เมื่อได้ข้อมูลจากกราฟ จึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ในตัวโปรแกรม COMSOL โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ไปเรื่อยๆ จนอุณหภูมิในตำแหน่งที่ $x=0$ มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ทดลองได้จริง T_2 ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 250 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
2.50	23.9475
2.60	24.0378
2.70	24.1280
2.71	24.1370
2.72	24.1460
2.73	24.1550

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.49 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 24.1550 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 24.1588 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 250 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	อุณหภูมิ(°C)
2.60	23.5678
2.65	23.6126
2.70	23.6573
2.72	23.6752
2.73	23.6842
2.74	23.6931

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2.74 w/mk ผลจากโปรแกรมจะได้อุณหภูมิเท่ากับ 23.6931 °C ซึ่งใกล้เคียงกับผลจากการวัดค่าจริงซึ่งเท่ากับ 23.6962 °C (แสดงในตารางที่ 4.1)

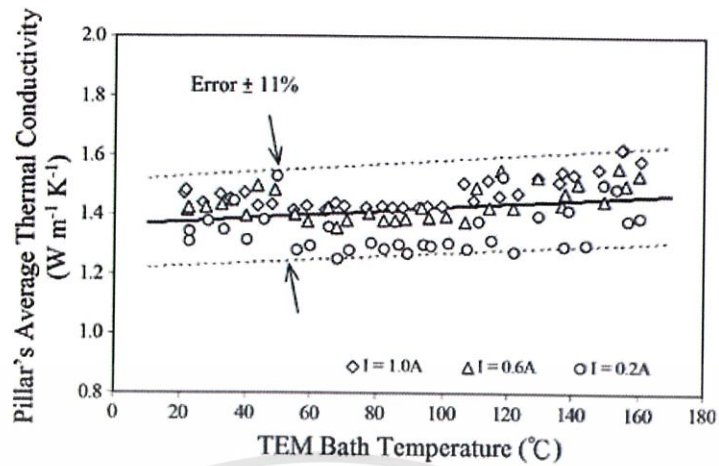
จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 ของแต่ละอุณหภูมิมาหาค่าเฉลี่ย (K_{eff}) ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆที่กำหนด

T_{heater} (°C)	K (W/mK)		K_{eff} (W/mK)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	
111	2.00	2.12	2.06
164	2.28	2.28	2.28
219	2.49	2.47	2.48
272	2.73	2.74	2.74

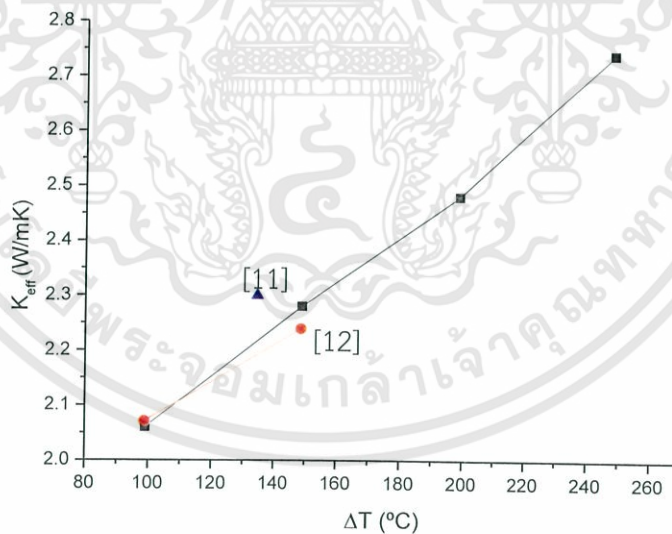
4.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ได้จากโครงการพิเศษนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

จากผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (k_{eff}) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิตั้งแต่ 2.06-2.74 W/mK ซึ่งสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (k) ประมาณ 50% - 100% [13] ซึ่งสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ยของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดบิสมาทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) จะมีค่าประมาณ 1.4 W/mK [12] แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ยของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดบิสมีทเทลลูไรด์กับอุณหภูมิ

นำสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ยของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดบิสมีทเทลลูไรด์ มาสร้างกราฟสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยการคูณกับ 1.5 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เนื่องจากในคู่มือการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลส่วนใหญ่รายงานแต่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ไม่ได้รายงานสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทั้งโมดูล ในการทดลองจะใช้ฮีตเตอร์ชนิดแท่งเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน และใช้ฮีตซิงค์ซึ่งมีท่อทองแดงสอดอยู่ระหว่างครีบบเพื่อให้น้ำเย็นไหลผ่านเป็นระบบระบายความร้อน ใช้โปรแกรม Lab view ในการบันทึกผล และใช้โปรแกรม Finite element ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ในการทดลองจะทำการกำหนดให้ฮีตเตอร์จ่ายความร้อนจนระบบทำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 , 150 , 200 และ 250 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ได้เป็น 2.06 W/mK, 2.28 W/mK, 2.48 W/mK และ 2.74 W/mK ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งผลที่ได้จากโครงการพิเศษนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง ± 0.5 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้อาจมีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเล็กน้อย วิธีแก้ปัญหาคือเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่านี้ เช่นเทอร์โมคัปเปิลชนิด T

ในระบบการทดลองหากต้องการเปลี่ยนวัสดุที่นำมาทดลอง ต้องทำให้วัสดุที่มีความยาว ความกว้าง และความหนาเท่ากับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นหากวัสดุที่นำมาทดลองมีขนาดต่างไปจากนี้จะไม่สามารถนำมาใส่ในระบบได้ ถ้าต้องการทดลองโดยใช้วัสดุที่มีขนาดต่างออกไป ต้องออกแบบพื้นที่สำหรับใส่วัสดุชิ้นนั้นๆใหม่

วัสดุที่นำมาทดลองมีความบางมากกว่านี้ อาจจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้ (k) เนื่องจากในวัตถุที่มีความบางมากๆ ผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างด้านที่สัมผัสความร้อนกับด้านที่สัมผัสกับระบบระบายความร้อนอาจมีความแตกต่างกันน้อยมาก

ผู้ทดลองคาดว่าหากวัสดุที่นำมาทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงมากๆ อาจทำให้ผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT) มีค่าน้อยมาก ซึ่งจะทำให้การวัดอุณหภูมิของวัสดุทำได้ยากขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองสารสนเทศ ฝ่ายสื่อสารองค์กร กฟผ. 2558. สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. [Online]. Available: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=579&Itemid=116 เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ต.ค. 58
- [2] จิราวัลย์ พิษะระ. (2540). หลักเบื้องต้นของกระบวนการส่งผ่าน มวล ความร้อน และโมเมนตัม. พิมพ์ครั้งที่ 7. ปทุมธานี: สำนักพิมพ์ม.รังสิต.
- [3] ตระการ ก้าวกลีกรรม. (2547). คู่มือฉนวนความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บจก.เอ็มแอนด์อี
- [4] ทศวรรษ สีตะวัน.(2558). เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก Thermoelectric Technology. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] ปภาพร วงศ์แสง และฟ้าประทาน ทวีเหลือ. 2555. “การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตไฟฟ้าและปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนของเตาหุงต้ม”. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2545). การวิเคราะห์และออกแบบงานทางวิศวกรรม ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2545). ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2555). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] ผ่องศรี ศิวราศักดิ์. (2551). Heat Transfer การถ่ายโอนความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัททริเพิ้ล กรุ๊ป จำกัด.
- [10] สุนันท์ ศันยนิษฐ์. (2545). การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ส.ส.ท. เยาวชน.
- [11] D. Champier, J.P. Bedecarrats, M. Rivaletto and F. Strub. “Thermoelectric power generation from biomass cook stoves” D. Champier et al. / Energy 35 (2010) 935–942.

- [12] HENG-CHIEH CHIEN, EN-TING CHU, HUEY-LIN HSIEH, JING-YI HUANG, SHENG-TSAI WU, MING-JI DAI, CHUN-KAI LIU, and DA-JENG YAO. "Evaluation of Temperature-Dependent Effective Material Properties and Performance of a Thermoelectric Module". *J. of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 42, No. 7, 2013.
- [13] Lauryn L. Baranowski, G. Jeffrey Snyder, and Eric S. Toberer. "Effective thermal conductivity in thermoelectric materials". *J. Appl. Phys.* 113, 204904 (2013).

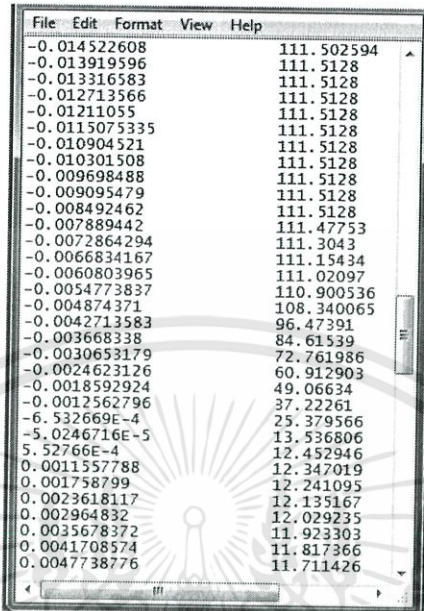


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



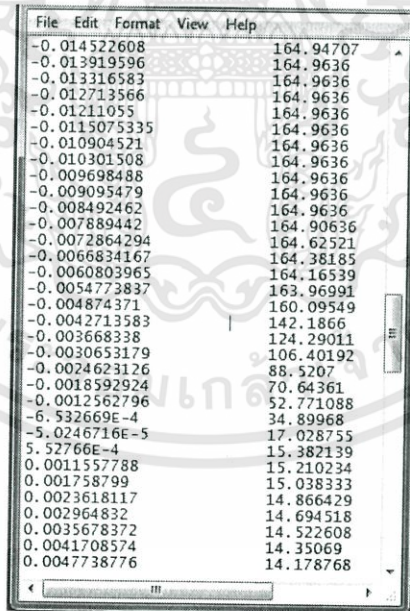
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



File	Edit	Format	View	Help
-0.014522608				111.502594
-0.013919596				111.5128
-0.013316583				111.5128
-0.012713566				111.5128
-0.01211055				111.5128
-0.0115075335				111.5128
-0.010904521				111.5128
-0.010301508				111.5128
-0.009698488				111.5128
-0.009095479				111.5128
-0.008492462				111.5128
-0.007889442				111.47753
-0.0072864294				111.3043
-0.0066834167				111.15434
-0.0060803965				111.02097
-0.0054773837				110.900536
-0.004874371				108.340065
-0.0042713583				96.47391
-0.003668338				84.61539
-0.0030653179				72.761986
-0.0024623126				60.912903
-0.0018592924				49.06634
-0.0012562796				37.22261
-6.532669E-4				25.379566
-5.0246716E-5				13.536806
5.52766E-4				12.452946
0.0011557788				12.347019
0.001758799				12.241095
0.0023618117				12.135167
0.002964832				12.029235
0.0035678372				11.923303
0.0041708574				11.817366
0.0047738776				11.711426

รูปที่ 1ก ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุนทงุมิกับระยะทาง ที่อุนทงุมิ 100 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 2



File	Edit	Format	View	Help
-0.014522608				164.94707
-0.013919596				164.9636
-0.013316583				164.9636
-0.012713566				164.9636
-0.01211055				164.9636
-0.0115075335				164.9636
-0.010904521				164.9636
-0.010301508				164.9636
-0.009698488				164.9636
-0.009095479				164.9636
-0.008492462				164.9636
-0.007889442				164.90636
-0.0072864294				164.62521
-0.0066834167				164.38185
-0.0060803965				164.16539
-0.0054773837				163.96991
-0.004874371				160.09549
-0.0042713583				142.1866
-0.003668338				124.29011
-0.0030653179				106.40192
-0.0024623126				88.5207
-0.0018592924				70.64361
-0.0012562796				52.771088
-6.532669E-4				34.89968
-5.0246716E-5				17.028755
5.52766E-4				15.382139
0.0011557788				15.210234
0.001758799				15.038333
0.0023618117				14.866429
0.002964832				14.694518
0.0035678372				14.522608
0.0041708574				14.35069
0.0047738776				14.178768

รูปที่ 2ก ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุนทงุมิกับระยะทาง ที่อุนทงุมิ 150 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 1

File	Edit	Format	View	Help
-0.014522608				164.4763
-0.013919596				164.4927
-0.013316583				164.4927
-0.012713566				164.4927
-0.01211055				164.4927
-0.0115075335				164.4927
-0.010904521				164.4927
-0.010301508				164.4927
-0.009698488				164.4927
-0.009095479				164.4927
-0.008492462				164.4927
-0.007889442				164.4359
-0.0072864294				164.1569
-0.0066834167				163.91539
-0.0060803965				163.70059
-0.0054773837				163.5066
-0.004874371				159.66179
-0.0042713583				141.88974
-0.003668338				124.13001
-0.0030653179				106.37851
-0.0024623126				88.63393
-0.0018592924				70.89344
-0.0012562796				53.157497
-6.532669E-4				35.422653
-5.0246716E-5				17.688286
5.52766E-4				16.05425
0.0011557788				15.883659
0.001758799				15.713072
0.0023618117				15.542481
0.002964832				15.371884
0.0035678372				15.201287
0.0041708574				15.0306835
0.0047738776				14.860076

รูปที่ 3ก ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 2

File	Edit	Format	View	Help
-0.014522608				219.02368
-0.013919596				219.0477
-0.013316583				219.0477
-0.012713566				219.0477
-0.01211055				219.0477
-0.0115075335				219.0477
-0.010904521				219.0477
-0.010301508				219.0477
-0.009698488				219.0477
-0.009095479				219.0477
-0.008492462				219.0477
-0.007889442				218.96437
-0.0072864294				218.55505
-0.0066834167				218.20071
-0.0060803965				217.88556
-0.0054773837				217.60092
-0.004874371				212.41725
-0.0042713583				188.53802
-0.003668338				164.67686
-0.0030653179				140.82777
-0.0024623126				116.98876
-0.0018592924				93.155815
-0.0012562796				69.32949
-6.532669E-4				45.50479
-5.0246716E-5				21.68082
5.52766E-4				19.466354
0.0011557788				19.216084
0.001758799				18.965822
0.0023618117				18.715559
0.002964832				18.465288
0.0035678372				18.215017
0.0041708574				17.964739
0.0047738776				17.714453

รูปที่ 4ก ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

File	Edit	Format	View	Help
-0.014522608				218.51857
-0.013919596				218.5422
-0.013316583				218.5422
-0.012713566				218.5422
-0.01211055				218.5422
-0.0115075335				218.5422
-0.010904521				218.5422
-0.010301508				218.5422
-0.009698488				218.5422
-0.009095479				218.5422
-0.008492462				218.5422
-0.007889442				218.46024
-0.0072864294				218.05766
-0.0066834167				217.70917
-0.0060803965				217.3992
-0.0054773837				217.11926
-0.004874371				211.98148
-0.0042713583				188.30591
-0.003668338				164.6481
-0.0030653179				141.00217
-0.0024623126				117.36617
-0.0018592924				93.73613
-0.0012562796				70.1126
-6.532669E-4				46.490665
-5.0246716E-5				22.86945
5.52766E-4				20.675655
0.0011557788				20.429506
0.001758799				20.183369
0.0023618117				19.93727
0.002964832				19.691076
0.0035678372				19.44493
0.0041708574				19.19877
0.0047738776				18.952608

รูปที่ 5ก ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 2

File	Edit	Format	View	Help
-0.014522608				272.2574
-0.013919596				272.29
-0.013316583				272.29
-0.012713566				272.29
-0.01211055				272.29
-0.0115075335				272.29
-0.010904521				272.29
-0.010301508				272.29
-0.009698488				272.29
-0.009095479				272.29
-0.008492462				272.29
-0.007889442				272.1765
-0.0072864294				271.6191
-0.0066834167				271.1366
-0.0060803965				270.7074
-0.0054773837				270.3197
-0.004874371				263.85492
-0.0042713583				234.18909
-0.003668338				204.54787
-0.0030653179				174.92307
-0.0024623126				145.31192
-0.0018592924				115.70908
-0.0012562796				86.11523
-6.532669E-4				56.523586
-5.0246716E-5				26.932976
5.52766E-4				24.155045
0.0011557788				23.814243
0.001758799				23.473461
0.0023618117				23.13268
0.002964832				22.79189
0.0035678372				22.451101
0.0041708574				22.110302
0.0047738776				21.769497

รูปที่ 6ก ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

File	Edit	Format	View	Help
-0.014522608				270.1148
-0.013919596				270.1473
-0.013316583				270.1473
-0.012713566				270.1473
-0.01211055				270.1473
-0.0115075335				270.1473
-0.010904521				270.1473
-0.010301508				270.1473
-0.009698488				270.1473
-0.009095479				270.1473
-0.008492462				270.1473
-0.007889442				270.03418
-0.0072864294				269.47855
-0.0066834167				268.99756
-0.0060803965				268.5697
-0.0054773837				268.18326
-0.004874371				261.7614
-0.0042713583				232.29749
-0.003668338				202.85808
-0.0030653179				173.43503
-0.0024623126				144.02559
-0.0018592924				114.62444
-0.0012562796				85.23225
-6.532669E-4				55.842255
-5.0246716E-5				26.453293
5.52766E-4				23.693153
0.0011557788				23.353437
0.001758799				23.013739
0.0023618117				22.67404
0.002964832				22.334332
0.0035678372				21.994627
0.0041708574				21.654911
0.0047738776				21.315191

รูปที่ 7ก ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 2

