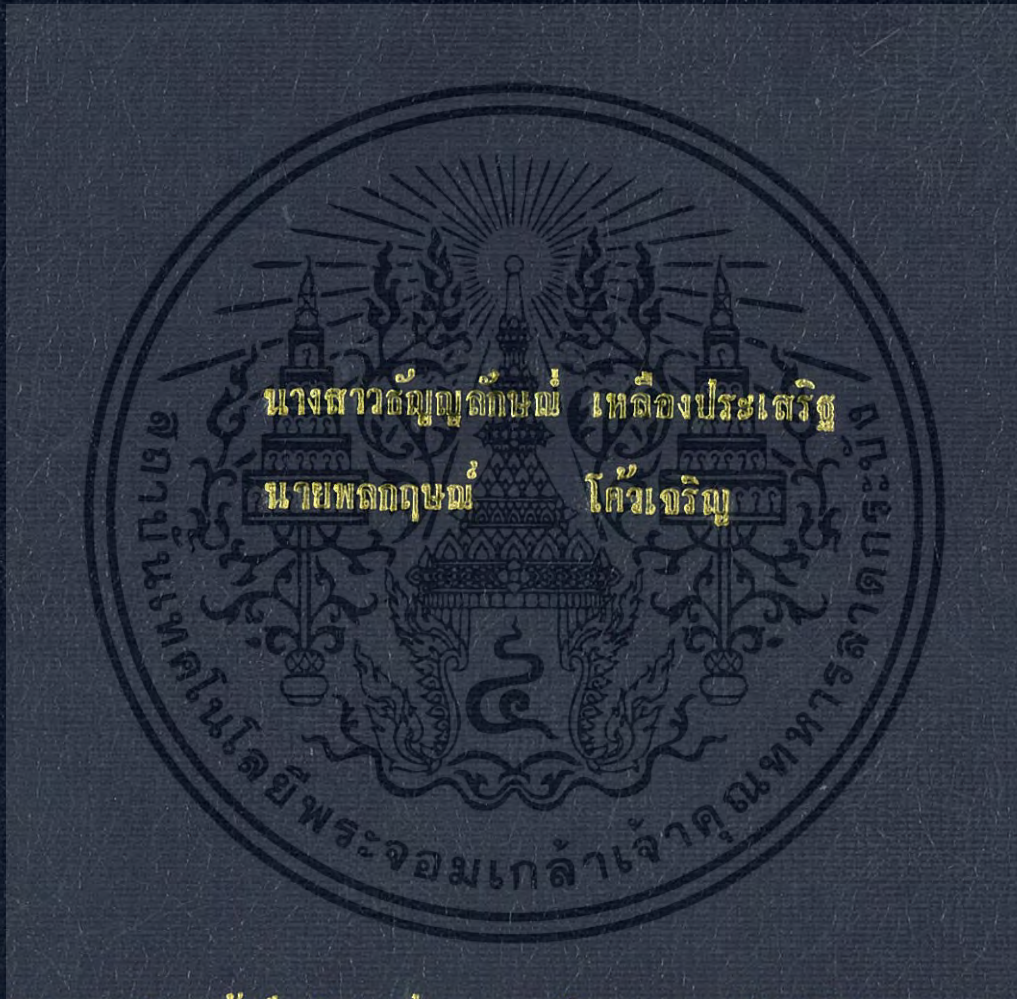


การจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขา
ชนิดบวกลบชนิดเดียว

FINITE ELEMENT SIMULATION OF UNI P-TYPE LEG
THERMOELECTRIC MODULE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขา
ชนิดบวขชนิดเดียว

FINITE ELEMENT SIMULATION OF UNI P-TYPE LEG
THERMOELECTRIC MODULE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2556 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FINITE ELEMENT SIMULATION OF UNI P-TYPE LEG
THERMOELECTRIC MODULE**

MISS THANYALAK LUANGPRASERT

MR. PHONLAKIT KHOWJALERN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2013
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
ประเภทขานิคบวขานิคเดียว
FINITE ELEMENT SIMULATION OF UNI P-TYPE LEG
THERMOELECTRIC MODULE

ชื่อนักศึกษา นางสาวธัญญลักษณ์ เหลืองประเสริฐ
นายพลกฤษณ์ ไคว้เจริญ

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ณัฐพร พรหมรส	
ดร.ประชาน บูรณศิริ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์	
ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาชนิดบวขชนิดเดียว
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธัญญลักษณ์ เหลืองประเสริฐ นายพลกฤษณ์ โส้วเจริญ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการคำนวณเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ ชั้นสารที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นแบบ 2 ขาและ 3 ขา ประเภทขาชนิด P-type ชนิดเดียว เชื่อมติดกััดแผ่นทองแดงบางมากและประกบด้วยแผ่นอลูมินา การคำนวณเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแบบเจนเนอเรเตอร์เพียงอย่างเดียว ซึ่งคำนวณโดยใช้โปรแกรม Comesol Multiphysic คุณสมบัติของชั้นสารเทอร์โมอิเล็กทริกได้ข้อมูลจากการวัด ขอบเขตที่ใช้ในการจำลองอยู่ในช่วงผลต่างอุณหภูมิ ด้านบนและด้านล่างของ โมดูล 20 – 200 K จากการศึกษา นำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด มีผลเป็นไปตามการศึกษานี้

คำสำคัญ : เทอร์โมอิเล็กทริก, ไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Finite Element Simulation of Uni P-Type leg Thermoelectric Module
Students	Thanyalak Luangprasert Phonlakit Khowjalern
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Dr. Chesta Ruttanapun

ABSTRACT

This work presents the Finite Element technique to calculate on model of thermoelectric module. The device module was fabricated by 2 and 3 Uni-legs of P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) which is connected by thin copper plate sandwiched between 2 thin alumina plates. Computational model was calculated generation. The Finite element solver commercial software of COMSOL MULTI PHYSIC was used. The thermoelectric properties of the device model were obtained from experimental data. The computational domain was simulated by setting temperature difference 20-200 K on top and bottom of module for generator mode. The results of voltage , current and power on model will be compared with experimental result. The simulation results of Uni-legs of P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) thermoelectric module will be reported.

Keywords : Thermoelectric, Finite element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ

- ดร. เชนรฐา รัตนพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำและชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย
- รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ช่วยแก้ไขและให้ข้อคิดอันเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนางานวิจัย
- นายวรรณะ โกศลวัฒน์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ทำการสร้างและวัดผลจากโมดูลที่สร้างขึ้นจริง ทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี
- ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและเพื่อนๆผู้ปรารถนาดีทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ธัญญลักษณ์ เหลืองประเสริฐ
พลกฤษณ์ โท้วเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	4
2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)	4
2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)	5
2.1.3 อุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก	6
2.2 คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	8
2.3 สมการที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมอิเล็กทริก	9
2.3.1 สมการการนำความร้อน (conduction heat transfer equation)	9
2.3.2 สมการความต่อเนื่องของประจุ (continuity of electric charge)	12
2.4 การสร้างหน้าต่าง Physics Interface สำหรับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 สมการสำหรับปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก	13
2.4.2 สมการใน Physics Builder	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	17
3.1 ศึกษาการใช้โปรแกรมและการสร้างแบบจำลอง	17
3.1.1 หน้าต่างการทำงาน	17
3.1.2 การกำหนดลักษณะทาง Physics	18
3.1.3 Global Definitions	19
3.1.4 Geometry	20
3.1.5 Materials	23
3.1.6 Mesh	24
3.2 การสร้าง Physics Interface สำหรับแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริก	25
3.2.1 การตั้งค่าเริ่มต้นในการสร้าง Physics Interface	25
3.2.2 การกำหนดตัวแปรตาม	26
3.2.3 Heat Transfer Model	27
3.2.4 Thermoelectric Model	29
3.2.5 Boundary Conditions	34
3.2.6 The Insulation Condition	40
3.2.7 สร้างการแสดงผลที่ได้จากการจำลอง	41
3.2.8 การนำ Physics Interface ที่สร้างขึ้นบรรจุลงในส่วนพื้นที่ทำงาน	42
3.3 แบบจำลองและแบบจริงของเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลประเภทขาเดี่ยว(P-type)	43
จำนวน 2 ขา และ 3 ขา	
3.3.1 ขนาดของแบบจำลอง	44
3.3.2 คุณสมบัติของวัสดุ	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ขั้นตอนการจำลองสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลประเภทขาเดี่ยว (P-type)	45
จำนวน 2 และ 3 ขา	
3.4.1 การใส่ค่าคุณสมบัติวัสดุ	45
3.4.2 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต	47
3.4.3 การกำหนดค่าความต้านทาน	49
3.5 ขั้นตอนแสดงผลการคำนวณเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล	50
3.5.1 ขั้นตอนการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	50
3.5.2 ขั้นตอนการหาค่ากระแสไฟฟ้า	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	54
4.1 สมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดP-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) ที่อุณหภูมิต่างๆ	54
4.1.1 ผลการวัดค่าคุณสมบัติของสาร	54
4.1.2 ผลการประมาณค่าคุณสมบัติของสาร	55
4.2 ผลการศึกษาเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลประเภทขาเดี่ยว(P-type)จำนวน 2 ขา	56
4.2.1 ผลจากการจำลอง โมดูลจำนวน 2 ขา	56
4.2.2 ผลจากการวัดค่าจากแบบจำลอง โมดูลจำนวน 2 ขา	57
4.2.3 ผลเปรียบเทียบ โมดูลจำนวน 2 ขา	58
4.3 ผลการจำลองเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลประเภทขาเดี่ยว(P-type)จำนวน 3 ขา	60
4.3.1 ผลจากการจำลอง โมดูลจำนวน 3 ขา	60
4.3.2 ผลจากการวัดค่าจากแบบจำลอง โมดูลจำนวน 3 ขา	61
4.3.3 ผลเปรียบเทียบ โมดูลจำนวน 3 ขา	62
4.4 ผลการศึกษาความต้านทานภายในจากแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลชนิดขาเดี่ยว	64
4.4.1 ความต้านทานภายในของ โมดูลจำนวน 2 ขา	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 ความต้านทานภายในของโมดูลจำนวน 3 ขา	66
4.5 ผลการศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล ชนิดขาเดียว	69
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลแบบจำลองและแบบจริงของเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล	71
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหา	72
5.3 การดำเนินการวิจัยในอนาคต	72
5.4 การดำเนินการวิจัยในอนาคต	73
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นใน โปรแกรม	18
3.2 แสดงขั้นตอนและวิธีการตั้งค่าต่างๆ ในส่วน Global Definitions	19
3.3 แสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง	20
3.4 แสดงขั้นตอนการใส่วัสดุในแบบจำลอง	23
3.5 แสดงการตั้งค่าเริ่มต้นในการสร้าง Physics Interface	25
3.6 แสดงขั้นตอนการประกาศตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ T และ V	26
3.7 แสดงการสร้างสมการ Heat Transfer	27
3.8 แสดงการสร้างสมการ Thermoelectric	29
3.9 แสดงการสร้างสมการ Temperature Boundary Condition	34
3.10 แสดงการสร้างสมการ Electric Potential Boundary Condition	36
3.11 แสดงการสร้างสมการ Heat Flux Boundary Condition	38
3.12 The Insulation Condition	40
3.13 แสดงการสร้างผลที่ได้จากการจำลอง	41
3.14 แสดงการนำ Physics Interface ที่สร้างขึ้นบรรจุลงในส่วนพื้นที่ทำงาน	42
3.15 แสดงคุณสมบัติของแผ่นทองแดง แผ่นอะลูมินา และ ตัวต้านทาน	44
3.16 แสดงขั้นตอนการใส่ค่าคุณสมบัติวัสดุ	45
3.17 แสดงการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต	47
3.18 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	50
3.19 แสดงขั้นตอนการหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	51
4.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ P-type ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	54
4.2 แสดงสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำ P-type ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	55
4.3 แสดงสภาพนำความร้อนของสารกึ่งตัวนำ P-type ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	55
4.4 ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นของโมดูล	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจากการจำลองของ โมดูล จำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ	58
4.6 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจากการจำลองของ โมดูล จำนวน 3 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆที่	62
4.7 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่มีความต้านทาน ภายนอก 1-20 Ω ต่อกับ โมดูลจำนวน 2 ขาที่ค่าอุณหภูมิ 20 K, 60 K และ 100 K	64
4.8 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่มีความต้านทานภายนอก 2-30 Ω ต่อกับ โมดูลจำนวน 3 ขาที่ค่าอุณหภูมิ 20 K, 60 K และ 100 K	66
4.9 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความสูงของชั้นสารต่างๆ ของโมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K	69

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงปรากฏการณ์ซีเบ็คเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่รอยต่อของโลหะ	4
2.2 แสดงปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของโลหะเมื่อมีการกระแสไฟฟ้าตรง	5
2.3 แสดงค่าโวลต์เตจที่เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด	6
2.4 แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองด้านเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าตรง เข้าไปในสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด	7
2.5 (ก) อุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก 1 เซลล์ (ข) นำแต่ละเซลล์มาประกอบรวมกัน (ค) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	7
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง power factor และ Seebeck coefficient	8
2.7 ทิศทางการไหลของพลังงานความร้อนในทิศ x	10
2.8 ทิศการไหลของพลังงานความร้อนใน 3 ทิศทาง (x,y,z)	11
2.9 ความหนาแน่นกระแส (J) ในปริมาตรย่อย (dT)	12
3.1 แสดงหน้าต่างการทำงานของโปรแกรม Comsol Multiphysic V4.3	17
3.2 แสดงการกำหนด Mesh โดยอัตโนมัติในแบบจำลองตัวอย่าง	24
3.3 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 2 ขา (ก) แบบจำลอง (ข) แบบจริง	43
3.4 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 3 ขา (ก) แบบจำลอง (ข) แบบจริง	43
3.5 แสดงส่วนประกอบของโมดูลจำนวน 2 ขา	44
3.6 แสดงผลจากการคำนวณของการกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิ	49
4.1 แสดงผลการกระจายอุณหภูมิของ โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิ 40 K	57
4.2 แสดงผลการกระจายความต่างศักย์ของ โมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิ 40K	57
4.3 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระหว่างผลจากการจำลองและผลการ วัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2 ขา	59
4.4 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2 ขา	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2 ขา	60
4.6 แสดงผลการกระจายอุณหภูมิของ โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K	61
4.7 แสดงผลการกระจายความต่างศักย์ของ โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K	61
4.8 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 3 ขา	62
4.9 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 3 ขา	63
4.10 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 3 ขา	63
4.11 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K ของ โมดูลจำนวน 2 ขา	65
4.12 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K ของ โมดูลจำนวน 2 ขา	66
4.13 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K ของ โมดูลจำนวน 2 ขา	66
4.14 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K ของ โมดูลจำนวน 3 ขา	68
4.15 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K ของ โมดูลจำนวน 3 ขา	68
4.16 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K ของ โมดูลจำนวน 3 ขา	68
4.17 แสดงกราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความสูงของชั้นสาร 3 – 100 mm ของ โมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในช่วงไม่กี่ทศวรรษ (decade) ที่ผ่านมาจากการที่ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆมากมาย อย่างก้าวกระโดดตัวเลขประชากรบนโลกนี้ก็เพิ่มสูงตามขึ้นไปด้วย ความต้องการใช้พลังงานก็เพิ่มมากตามไปด้วย ทำให้ต้องมองหาพลังงานในรูปแบบต่างๆเพื่อตอบสนองความต้องการ ในที่นี้เราลองมามองในประเทศไทยของเรา โดยหลักแล้วเราต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานจากต่างประเทศทำให้เราต้องมองหาพลังงานทดแทนมาช่วยเสริมเพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายของประเทศ เมื่อพิจารณาภูมิ-ศาสตร์ที่ตั้งของประเทศไทยที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร (Equator) มีลักษณะอากาศร้อน-ร้อนชื้น แสงแดดเฉลี่ยต่อปีมีค่ามากจึงเหมาะสมที่จะผลิตพลังงานทดแทนในรูปของไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) ที่ตอนนี้กำลังได้รับความนิยมแพร่หลายกันอย่างมาก แต่ปัญหาหลักของแผงโซลาร์เซลล์คือ กระบวนการผลิตนั้นค่อนข้างที่จะยุ่งยากและซับซ้อนจึงส่งผลให้มีราคาเฉลี่ยในการติดตั้งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ทั้งนี้เทคโนโลยีของการพัฒนาแผงโซลาร์เซลล์นั้นยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพให้ได้มากขึ้นและมีราคาถูกลง

ในปัจจุบันยังมีอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ และเหมาะสมกับประเทศไทยที่น่าจะนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานทดแทนได้ โดยใช้หลักการทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric : เป็นหลักการเกี่ยวข้องกับความร้อนและกระแสไฟฟ้า) มีปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องคือ 1) Seebeck Effect คือปรากฏการณ์ที่อธิบายการเปลี่ยนเอาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิไปเป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง 2) Peltier Effect คือปรากฏการณ์ที่จะอธิบายการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้กลายเป็นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิโดยตรง คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นต้องนำพาหะประจุได้ดีแต่เป็นตัวนำความร้อนที่แย่ และมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่ดีด้วย ซึ่งมีทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยได้มีการนำมาประยุกต์ใช้เช่น ตัวกำเนิดไฟฟ้า (Thermoelectric generator : TEG) ตัวสร้างความเย็น (Thermoelectric cooler : TEC) สำหรับในกรณีวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จะมี 2 ชนิดคือ 1) N-type มีพาหะประจุเป็นอิเล็กตรอน (มีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบ) และ 2) P-type มีพาหะประจุเป็นโฮล (มีประจุ

ไฟฟ้าเสมือนเป็นบวก) เมื่อนำทั้ง 2 ชนิดมาประกบกันเราจะเรียกว่า 1 เซลล์ เมื่อนำแต่ละเซลล์ มาต่อกันแบบอนุกรมจะรวมกันเป็น โมดูล (module) สำหรับประสิทธิภาพของวัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถบ่งได้ด้วยค่าของ Figure of merit (Z) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์ Seebeck (S) และสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity : k) เป็นหลัก โดยในงานวิจัยที่กำลังสนใจคือ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) เนื่องจากสามารถทำการสังเคราะห์ขึ้นได้แล้วในห้องปฏิบัติการเทอร์โมอิเล็กทริก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง แต่สำหรับวัสดุชนิด N-type นั้นอยู่ระหว่างการวิจัยและทำการสังเคราะห์ขึ้น

จากที่กล่าวมาทำให้ได้ทราบแล้วว่าองค์ประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นประกอบขึ้นจากแต่ละเซลล์ต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งในแต่ละเซลล์นั้นประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำทางเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P-type และ N-type แต่วัสดุชนิด N-type นั้นกำลังอยู่ระหว่างการวิจัยสังเคราะห์ขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางในการศึกษาและออกแบบระบบโมดูลที่ใช้เพียงสารกึ่งตัวนำทางเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) ชนิดเดียวในการนำมาสร้างเป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งแบบดังกล่าวเรียกว่าเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาเดียว (uni-type module thermoelectric) โดยในงานนี้จะศึกษาการจำลองแบบด้วยโปรแกรมเชิงการค้า Comsol multi-physics ช่วยในการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ค่าที่ใกล้เคียงกับแบบจริง รวมทั้งยังมีความรวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์พื้นฐานทางเทอร์โมอิเล็กทริก โดยทำการวิเคราะห์แบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาเดียว(P-type) จำนวน 2 และ 3 ขาเปรียบเทียบกับแบบที่ได้สร้างขึ้นจริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) สร้างแบบจำลองระบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) ในโปรแกรม Comsol multi-physics
- 3) เปรียบเทียบผลที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ได้สร้างขึ้นจริงกับแบบจำลอง
- 4) ศึกษาความต้านทานภายในและความสูงของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลด้วยแบบจำลอง

1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

- 1) ค้นคว้าข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาการใช้โปรแกรม Comsol multi-physics และระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- 3) ศึกษาแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) ให้อยู่บนหลักการพื้นฐานขอเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่มีขาประกอบไปด้วย P-type และ N-type
- 4) ใช้โปรแกรม Comsol multi-physics วิเคราะห์แบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 5) เปรียบเทียบผลจากการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ได้มีการสร้างขึ้นจริงกับผลที่ได้จากแบบจำลอง ผลที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใด
- 6) ใช้โปรแกรม Comsol multi-physics ในการวิเคราะห์ความต้านทานภายในและความสูงของแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 7) สรุปผลและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การใช้โปรแกรม Comsol multi-physics หรือโปรแกรมอื่นๆ ในการวิเคราะห์แบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกในรูปแบบอื่นๆ เพื่อดูผลที่ออกมาก่อนที่จะสร้างแบบจำลองขึ้นจริง โดยผลที่ออกมามีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งส่งผลให้การวิจัยและการพัฒนาหลักการทางเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อมาใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนมีความรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

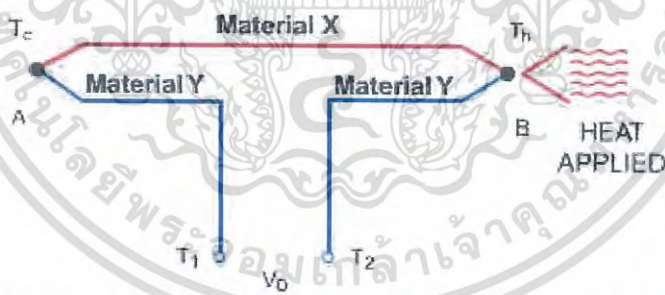
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

คำว่า “เทอร์โมอิเล็กทริก” จะสื่อให้เห็นถึงความหมายที่เป็นปรากฏการณ์อธิบายการเปลี่ยนเอาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิไปเป็นกระแสไฟฟ้า หรือในทางตรงกันข้ามเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดตามแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขึ้น โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นที่อยู่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

ในเริ่มแรกปรากฏการณ์นี้จะกล่าวถึงในวัสดุที่เป็นตัวนำ (conductors) โดย Thomas Johann Seebeck ได้พบว่า “ถ้ามีอุณหภูมิต่างกันที่รอยต่อของโลหะสองชนิดที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างรอยต่อทั้งสอง” ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้สร้างเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ซีเบ็คเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่รอยต่อของโลหะ

ปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นการผันความร้อนเป็นไฟฟ้าโดยพิจารณาการบังคับอุณหภูมิเกรเดียนต์สม่ำเสมอให้ไหลไปตามตัวนำจำกัด ซึ่งในตอนเริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายอย่างสม่ำเสมอของตัวพาหะประจุ แต่ภายใต้อุณหภูมิเกรเดียนต์ (gradient temperature) พาหะอิสระต่างๆที่ปลายด้านร้อน (hot end) จะมีพลังงานจลน์มากกว่าที่ปลายด้านเย็น (cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การเกิดขึ้นของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (back electromotive force : back emf) ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลของประจุ ความต่างศักย์ของวงจรเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(open circuit) เมื่อไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ขึ้นซึ่งเรียกว่า “ความต่างศักย์ของซีเบ็ค (Seebeck voltage)” โดยความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Delta V = S\Delta T \text{ หรือ } S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \dots\dots\dots (2.1)$$

ในสมการที่ (2.1) ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามระยะทาง (gradient)

$$E = S\nabla T \dots\dots\dots (2.2)$$

หรือเรามองว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเกิดมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากความร้อน (Thermoelectric electromotive force)

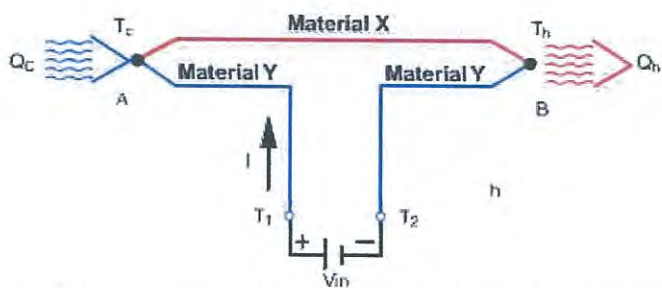
$$E = \int_{T_1}^{T_2} SdT \dots\dots\dots (2.3)$$

- เมื่อ ΔV คือผลต่างความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V)
- E คือสนามไฟฟ้า (V/m)
- S คือสัมประสิทธิ์ของ Seebeck (VK)
- ΔT คือผลต่างอุณหภูมิ (K)
- ∇T คืออุณหภูมิเกรเดียนต์ (K)

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ในเวลาต่อมา Jean Charles Athanase Peltier ซึ่งได้กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า” ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของโลหะเมื่อมีการกระแสไฟฟ้าตรง

ปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นปรากฏการณ์ที่คู่กับปรากฏการณ์ซีเบค และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำระบบหล่อเย็นจากการผันไฟฟ้าเป็นความเย็น (thermoelectric refrigeration) ในที่นี้อัตราของการดูดซับความร้อนแบบกลับได้ (rate of reversible heat absorption : q) ซึ่งส่งมาพร้อมกับการผ่านกระแสไฟฟ้า (I) ผ่านรอยต่อคือ

$$q = PI \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

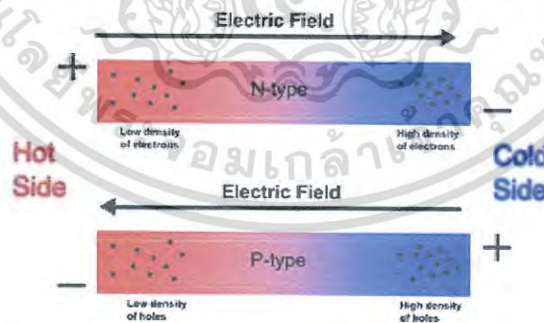
เมื่อ q คือฟลักซ์ของความร้อน (W/m^2)

P คือสัมประสิทธิ์ของ Peltier (V)

I คือกระแสไฟฟ้า (A)

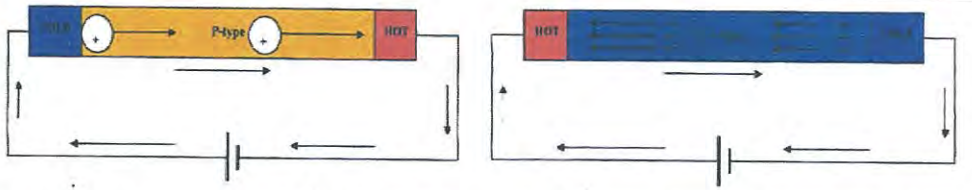
2.1.3 อุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์มีความก้าวหน้าไปอย่างมากอันเนื่องมาจากได้มีการพัฒนาวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) Abram Fedorovich Loffe ได้ริเริ่มนำสารกึ่งตัวนำมาพัฒนาไปเป็นวัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ให้ประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่สูงขึ้น โดยหลักแล้ววัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมี 2 ชนิดคือ ชนิด P-type (มีพาหะประจุคือโฮล) มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และชนิด N-type (มีพาหะประจุคืออิเล็กตรอน) มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อพิจารณาถึงปรากฏการณ์ซีเบคในวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้ง 2 ด้าน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงค่าโวลต์เตจที่เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด จากรูปที่ 2.3 เราจะพบว่าที่ปลายของวัสดุทั้ง 2 จะมีค่าความต่างศักย์ที่ตรงข้ามกันอันเนื่องมาจากพาหะประจุคนละชนิดกัน จะส่งผลให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบคในสารกึ่งตัวนำชนิด P-type มีค่าเป็นบวกและชนิด N-type มีค่าเป็นลบ นอกจากนี้ถ้าเราพิจารณาปรากฏการณ์ของเพลเทียร์โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นที่ปลายทั้งสอง ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองด้านเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปในสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด

จากรูปที่ 2.4 เราจะพบว่าที่ปลายของวัสดุทั้ง 2 จะมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิที่ตรงข้ามกัน อันเนื่องมาจากพาหะประจุคนละชนิดกัน จะส่งผลให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของเพลเทียร์ในสารกึ่งตัวนำชนิด P-type และ N-type มีค่าเช่นเดียวกันกับในกรณีของการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค

ในทางปฏิบัติในการสร้างอุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำมาใช้งานจริงนั้น จะเป็นการนำเซลล์ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P-type และ N-type โดยการนำแต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกัน โดยมีแผ่นโลหะทองแดงเป็นตัวเชื่อมแต่ละเซลล์แล้วปิดประกบด้วยแผ่นเซรามิกอะลูมินา (Al_2O_3) ดังรูปที่ 2.5 ในท้องตลาดจะมีแผ่นชนิดนี้วางขายอยู่โดยทั่วไปที่มีชื่อเรียกว่า “แผ่นเพลเทียร์” หรือ “แผ่นร้อน-เย็น” ส่วนการใช้งานที่นำมาใช้งานจริงคือ “Thermoelectric Cooler : TEC” โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงไปในอุปกรณ์ทำให้เกิดด้านร้อน-เย็นขึ้น แล้วนำด้านเย็นไปใช้ในการระบายความร้อนในระบบที่เราต้องการ หรือใช้งานเป็น “Thermoelectric Generator : TEG” โดยการทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นระหว่างผิวหน้าของอุปกรณ์ทำให้มีกำลังไฟฟ้าออกมา



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 2.5 (ก) อุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก 1 เซลล์ (ข) นำแต่ละเซลล์มาประกอบรวมกัน

(ค) เทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

คุณสมบัติที่สำคัญที่สามารถบ่งบอกความเป็นวัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริก คือ

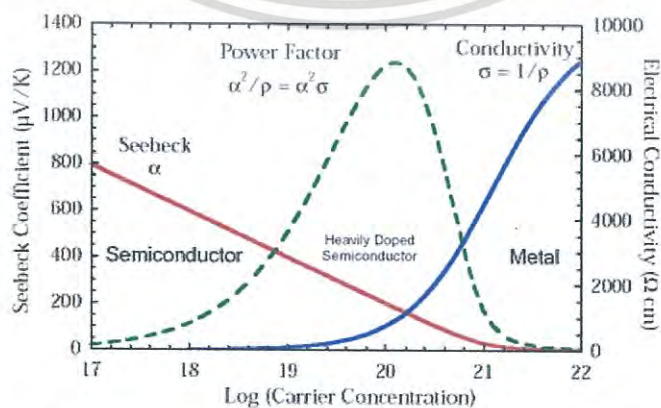
- 1) เป็นวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี
- 2) เป็นวัสดุที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำ

คุณสมบัติทั้ง 2 ประการจะมีความสัมพันธ์กันในเชิงฟิสิกส์ โดยมีสมการที่บ่งชี้คุณสมบัติในทางฟิสิกส์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกก็คือค่า Figure of merit (ZT) ดังสมการ

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k} = \frac{S^2 T}{\rho k} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ	S	คือสัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)
	σ	คือสภาพนำทางไฟฟ้า (S/m)
	ρ	คือสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ($m.S^{-1}$ หรือ $\Omega.m$)
	T	คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	k	คือสภาพการนำความร้อน (W/(m.K))

เป็นที่ทราบแล้วว่าอุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นประกอบขึ้นมาจากวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เราต้องพิจารณาเป็นความต้านทานและสัมประสิทธิ์ซีเบค ($\alpha_{ph} = |\alpha_n| + |\alpha_p|$) มีค่ารวมกันของสารกึ่งตัวนำชนิด P-type และ N-type ส่วนค่าสภาพการนำความร้อน (k) จะยึดใช้ของสารกึ่งตัวนำชนิด N-type เพราะในวัสดุโดยทั่วไปจะมีพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนเป็นหลัก จากที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 เราสามารถดูเส้นกราฟเปรียบเทียบค่า power factor และสัมประสิทธิ์ซีเบคระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำได้เพื่อดูประสิทธิภาพทางเทอร์โมอิเล็กทริก ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง power factor และ Seebeck coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการพื้นฐานของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

เราได้ทราบถึงคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกแล้วในหัวข้อที่ 2.2 ในตอนนี้จะเป็นการใช้สมการที่เกี่ยวข้อง โดยยึดอยู่บนหลักของคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อมาใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ปัญหาที่เราจะศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้ในด้านต่างๆ โดยมีสมการดังต่อไปนี้

2.3.1 สมการการนำความร้อน (conduction heat transfer equation)

การนำความร้อนจะเป็นการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนในของแข็ง โดยพลังงานความร้อนจะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ การส่งพลังงานจะส่งจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง เนื่องจากของแข็งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ชิดกันมาก จากกฎของฟูเรียร์การนำความร้อนในกรณีสภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยตรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิดังนี้

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{..... (2.6)}$$

เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปค่าคงที่

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{..... (2.7)}$$

- เมื่อ q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน (kW)
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล
 A คือพื้นที่ผิวการไหลของความร้อน (m^2)
 k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/(m.K))

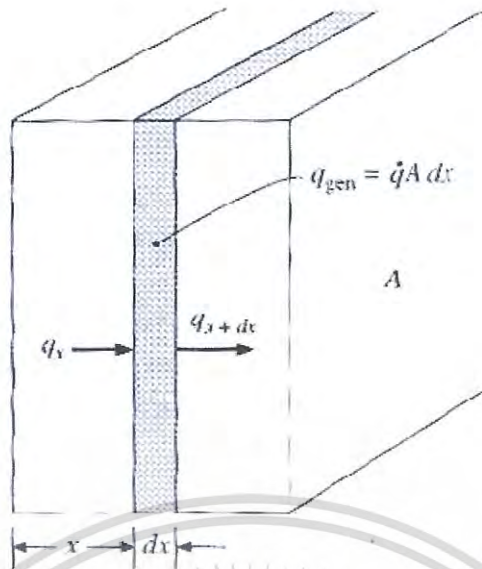
พิจารณาการเคลื่อนที่ของความร้อนในหนึ่งมิติแสดงดังรูปที่ 2.7 ถ้าระบบการไหลเป็นแบบราบเรียบ คือค่าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ความร้อนที่จ่ายออกจากเอลิเมนต์ที่มีความหนา dx สามารถเขียนสมการดุลพลังงานจะได้ดังนี้

พลังงานที่ถูกนำเข้าทวิวัสดุทางด้านซ้าย + พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในเอลิเมนต์

=

พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง + พลังงานที่ถูกนำออกจากทวิวัสดุทางด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของพลังงานความร้อนในทิศ x

แสดงสมการที่เกี่ยวข้องในแต่ละเทอมได้ดังต่อไปนี้

- พลังงานที่ถูกนำเข้าที่ผิววัสดุทางด้านซ้าย $= q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$
- พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในเอลิเมนต์ $= \dot{q}A dx$
- พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง $= \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx$
- พลังงานที่ถูกนำออกจากผิววัสดุทางด้านขวา $= q_{x+dx} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx}$
 $= -A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$

เขียนความสัมพันธ์ลงในสมการสมดุลพลังงานได้ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}A dx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} - A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

หรือ
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

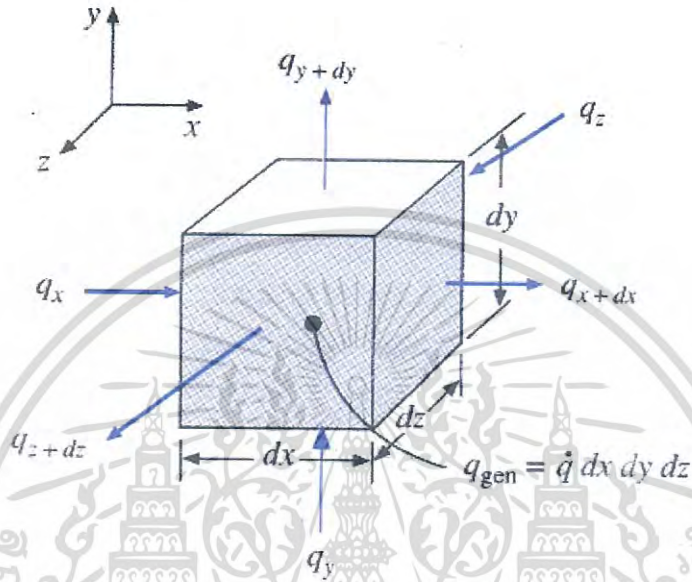
- เมื่อ \dot{q} คือพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นต่อหน่วยปริมาตร (W/m³)
- c คือค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (J/kg°C)
- ρ คือความหนาแน่น (kg/m³)

จากที่กล่าวมาสมการที่ 2.9 เป็นสมการนำความร้อนเพียงในหนึ่งทิศทาง (1 มิติ) สำหรับการไหลของความร้อนมากกว่าหนึ่งทิศทาง พิจารณาการนำความร้อนเข้าและออกในหน่วยปริมาตรทั้ง 3 ทิศทาง (3 มิติ) ดังรูปที่ 2.8 โดยเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

- เมื่อ q_x คืออัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน x
- q_y คืออัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน y
- q_z คืออัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน z



รูปที่ 2.8 ทิศการไหลของพลังงานความร้อนใน 3 ทิศทาง (x,y,z)

จากสมการที่ 2.10 แสดงปริมาณพลังงานแต่ละเทอมได้ดังนี้

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+dy} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy$$

$$q_{gen} = \dot{q} dx dy dz$$

$$\frac{dE}{dt} = \rho c dx dy dz \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

เมื่อนำเทอมของพลังแต่ละเทอมมาเขียนรวมกันจะได้สมการทั่วไปของการนำความร้อน

3 มิติ สามารถเขียนได้ดังนี้

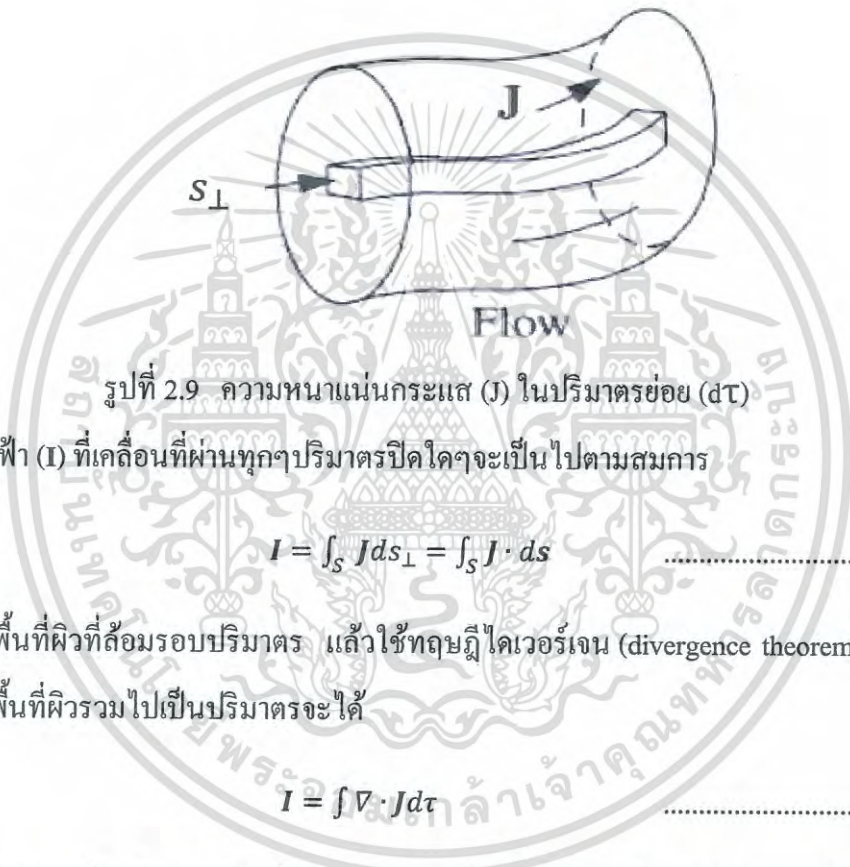
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot q = \dot{q} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

2.3.2 สมการความต่อเนื่องของประจุ (continuity of electric charge)

เป็นสมการที่บอกถึงการที่ประจุเคลื่อนที่หรือไหล จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งการส่งผ่านประจุเป็นปริมาณที่อนุรักษ์ (Electric charge conserved quantity) ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นกระแส (J) ต่อปริมาตรย่อยๆ (dτ) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความหนาแน่นกระแส (J) ในปริมาตรย่อย (dτ)

กระแสไฟฟ้า (I) ที่เคลื่อนที่ผ่านทุกๆ ปริมาตรปิดใดๆ จะนำไปตามสมการ

$$I = \int_S J ds_{\perp} = \int_S J \cdot ds \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

เมื่อ S คือพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบปริมาตร แล้วใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจน (divergence theorem) เพื่อที่เราจะเปลี่ยนพื้นที่ผิวรวมไปเป็นปริมาตรจะได้

$$I = \int \nabla \cdot J d\tau \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

เราทราบว่า $\nabla \cdot J$ เป็นปริมาณฟลักซ์ของเส้นกระแสที่พุ่งออกมาจากผิว ผลรวมของฟลักซ์สุทธิจะมีค่าตามประจุที่อยู่ภายในปริมาตร (ρ) เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\int \nabla \cdot J d\tau = -\frac{d}{dt} \int \rho_c d\tau = -\int \frac{\partial \rho_c}{\partial t} d\tau \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.14 เราจะได้สมการความต่อเนื่อง

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho_c}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

2.4 การสร้างหน้าต่าง Physics Interface สำหรับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

เนื่องจากว่าโปรแกรม Comsol Multiphysics version 4.3 ในส่วนของ Model Builder ไม่ได้รองรับการจำลองสถานการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก จึงต้องสร้างสถานการณ์นี้ขึ้นในส่วนของ Physics Interface เพื่อนำมาใช้งานเฉพาะ ทำให้เราจึงต้องเข้าใจปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกและสามารถอธิบายด้วยสมการพื้นฐาน (จากหัวข้อที่ 2.1,2.3) รวมถึงสมการเพิ่มเติมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน เพื่อใช้สำหรับในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นจะใช้สมการทางเทอร์โมอิเล็กทริกใส่เข้าไปในสมการการแปลงเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานของโปรแกรม ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่สำคัญและมีความเข้าใจได้ยากที่สุด เราจึงใช้ส่วนนี้สำหรับกาวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบเท่านั้น

2.4.1 สมการสำหรับปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นการเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมิให้เป็นค่าศักย์ทางไฟฟ้า (Thermoelectric Generator : TEG) หรือในทางตรงกันข้ามกันเมื่อมีกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิ (Thermoelectric Coolers : TEC) ซึ่งนิยมนำมาใช้กันมากในระบบระบายความร้อนของวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ การใช้ทำความเย็นในตู้เย็นขนาดเล็ก ขณะที่ Joule heating (resistive heating) เป็นปรากฏการณ์ที่ผันกลับไม่ได้ (irreversible) ผลของหลักการทางเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่ผันกลับได้ (reversible) ความเป็นมาของปรากฏการณ์ทางเทอร์โม-อิเล็กทริกจะเกี่ยวข้องกับการค้นพบที่ได้จากการทดลองของ 3 บุคคล คือ Seebeck, Peltier, และ Thomson ซึ่งในส่วนของปรากฏการณ์ Seebeck และ Peltier ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 โดยปรากฏการณ์ Thomson ได้จากการทดลองของ William Thomson หรือ Lord Kelvin กล่าวว่า “ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับการไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อนหรือจากจุดร้อน ” ทั้ง 3 ปรากฏการณ์เป็นความสัมพันธ์ในการเกิดความร้อนขึ้นที่เกี่ยวเนื่องกับความสัมพันธ์ของ Thomson ดังนี้

$$P = ST \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$\mu = T \frac{dS}{dT} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ของ Thomson (V/K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ทั้ง 3 แสดงให้เห็นการพิจารณาเป็นความสัมพันธ์เดียวกัน ซึ่งในการจำลองสถานการณ์นั้นเราจะเลือกใส่ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ้ของวัสดุเพียงอย่างเดียวก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ด้วย (สมการที่ 2.16) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของทอมสันนั้นเราจะไม่พิจารณาเพราะในกรณีสมมติว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปไม่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ (สมการที่ 2.17)

ปริมาณฟลักซ์ที่สนใจเมื่อจำลองสถานการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกคือ ฟลักซ์ความร้อน (q) และความหนาแน่นของกระแส (J) ดังนี้

$$q = -k\nabla T + PJ \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$J = -\sigma\nabla V - \sigma S\nabla T \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

เมื่อ q คือ ฟลักซ์ความร้อน (w/m^2)

J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/m^2)

ปริมาณอื่นๆที่มีความเกี่ยวข้องกัน คือ

$$E = -\nabla V \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

$$Q = J \cdot E \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

Q คือ ความร้อนของจูลหรือ Joule heating (W/m^3)

จากสมการที่ 2.12 และ 2.16 เป็นการแสดงถึงกฎการอนุรักษ์พลังงานความร้อนและกระแส แต่ในเรื่องนี้เราพิจารณากรณีที่เป็นสถานะคงที่ (stationary) ไม่ขึ้นกับเวลา รวมทั้งค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน (q) จะพิจารณาต่อพื้นที่หน้าตัด (A) ทำให้อยู่ในรูปฟลักซ์ความร้อน (q) และค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (\dot{q}) จะคิดเป็นค่าความร้อนของจูล (Q) จะได้สมการดังนี้

$$\nabla \cdot q = Q \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

จากสมการที่ 2.23 และ 2.24 เมื่อเรานำสมการที่ 2.19 -2.22 แทนลงไปจะได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (-k\nabla T + P(-\sigma\nabla V - \sigma S\nabla T)) = (-\sigma\nabla V - \sigma S\nabla T) \cdot (-\nabla V) \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma\nabla V - \sigma S\nabla T) = 0 \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการทางเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสองนี้อยู่ในรูปชัดเจน ซึ่งมีความยุ่งยากเมื่อเรานำไปใช้งาน ดังนั้นจะต้องมีสมการที่ใช้ในการรองรับเพื่อแปลงสมการทางเทอร์โมอิเล็กทริกในการใช้งานใน ส่วนของ Physics Builder ทำให้สามารถดำเนินการวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบได้สะดวกยิ่งขึ้น

2.4.2 สมการใน Physics Builder

Physics Builder ต้องใช้สมการเชิงอนุพันธ์หลายตัวแปร (partial differential equations : PDE) ใส่เข้าไปใน weak form การเปลี่ยนให้อยู่ในรูป weak form ทำได้ด้วยการคูณ ฟังก์ชันทดสอบ (test function) ในแต่ละสมการในสมการที่ 2.23 และ 2.24 ที่สอดคล้องกับตัวแปรไม่ทราบค่าคือ T กับ V (v_T และ v_V ตามลำดับ) และทำการอินทิเกรตรวม โดเมนทั้งหมด

$$\int_D (\nabla \cdot \mathbf{q}) v_T = \int_D Q v_T \dots\dots\dots (2.27)$$

$$\int_D (\nabla \cdot \mathbf{J}) v_V = 0 \dots\dots\dots (2.28)$$

แปลงไปเป็นรูป Partial integration

$$-\int_D \mathbf{q} \cdot \nabla v_T + \int_B \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} v_T = \int_D Q v_T \dots\dots\dots (2.29)$$

$$-\int_D \mathbf{J} \cdot \nabla v_V + \int_B \mathbf{n} \cdot \mathbf{J} v_V = 0 \dots\dots\dots (2.30)$$

เมื่อ B คือขอบเขตของ D

n คือ unit normal vector ของ D

สมมติว่าทราบค่าความหนาแน่นกระแสและฟลักซ์ความร้อนในทิศทางของ boundary normal เหมือนกับ q_0 และ J_0 ตามลำดับ สมการจะกลายเป็นดังนี้

$$-\int_D \mathbf{q} \cdot \nabla v_T + \int_B q_0 v_T = \int_D Q v_T \dots\dots\dots (2.31)$$

$$-\int_D \mathbf{J} \cdot \nabla v_V + \int_B J_0 v_V = 0 \dots\dots\dots (2.32)$$

Physics Builder ต้องใช้งานในส่วนของโดเมนของสมการ weak form ขณะที่ในส่วนขอบเขต จะสามารถทำการโดยอัตโนมัติโดยตัวโปรแกรม ในสมการที่ 2.31 และ 2.32 พิจารณาแต่ใน ส่วนโดเมน คือ

$$\mathbf{q} \cdot \nabla v_T + Q v_T = 0 \dots\dots\dots (2.33)$$

$$\mathbf{J} \cdot \nabla v_V = 0 \dots\dots\dots (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการใช้ Physics Builder ทำให้ทอมด้านซ้ายของสมการที่ 2.33 และ 2.34 กลายเป็นดังนี้

$$q \cdot \text{test}(\nabla T) + Q_{\text{test}}(T) \dots\dots\dots (2.35)$$

$$J \cdot \text{test}(\nabla V) \dots\dots\dots (2.36)$$

สมการที่ 3.35 และ 3.36 คือส่วนที่ใส่เข้าไปในช่องสมการ weak form ในการสร้าง physics interface ของเทอร์โมอิเล็กทริกดังที่จะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2 ของบทถัดไป นอกจากนี้ยังมีสมการส่งผ่านความร้อนเป็นระบบสมการย่อยของเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อจัดการกับบริเวณโดเมนที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแต่เป็นตัวนำความร้อน โดยสมการส่งผ่านความร้อนที่สร้างขึ้นใน physics interface ก็ทำเช่นเดียวกับสมการเทอร์โมอิเล็กทริกและเขียนให้อยู่ในรูป weak form ได้ดังนี้

$$q \cdot \text{test}(\nabla T) \dots\dots\dots (2.37)$$

ด้วยวิธีนี้เป็นการแก้ปัญหาอนุกรมที่มี degree of freedom เดียวในโดเมนที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ส่วนในการเพิ่มโดเมนที่สมการ weak form จะดูจำนวนเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$T = T_0 \dots\dots\dots (2.38)$$

$$V = V_0 \dots\dots\dots (2.39)$$

$$q_0 = 0 \dots\dots\dots (2.40)$$

$$J_0 = 0 \dots\dots\dots (2.41)$$

$$q_0 = q_{in} \dots\dots\dots (2.42)$$

ในสมการที่ 2.38 และ 2.39 เป็นการกำหนดเงื่อนไขอุณหภูมิ (T_0) และความต่างศักย์ (V_0) บนขอบเขต ส่วนสมการ 2.40 และ 2.41 เป็นการกำหนดเงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนและความหนาแน่นกระแสเป็นศูนย์ที่เรียกว่า “เงื่อนไขขอบเขตธรรมชาติ” โดยเงื่อนไขนี้จะแทนฉนวนไฟฟ้าและความร้อน สำหรับเงื่อนไขของเขตสุดท้ายที่กำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนในทิศทางขอบเขตปกติ (boundary normal) เงื่อนไขขอบเขตฟลักซ์ความร้อนเป็นการดำเนินการของสมการ Weak Form ที่แสดงในสมการ 2.31 ดังนี้

$$\int_B q_0 \cdot \nu_T \dots\dots\dots (2.43)$$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

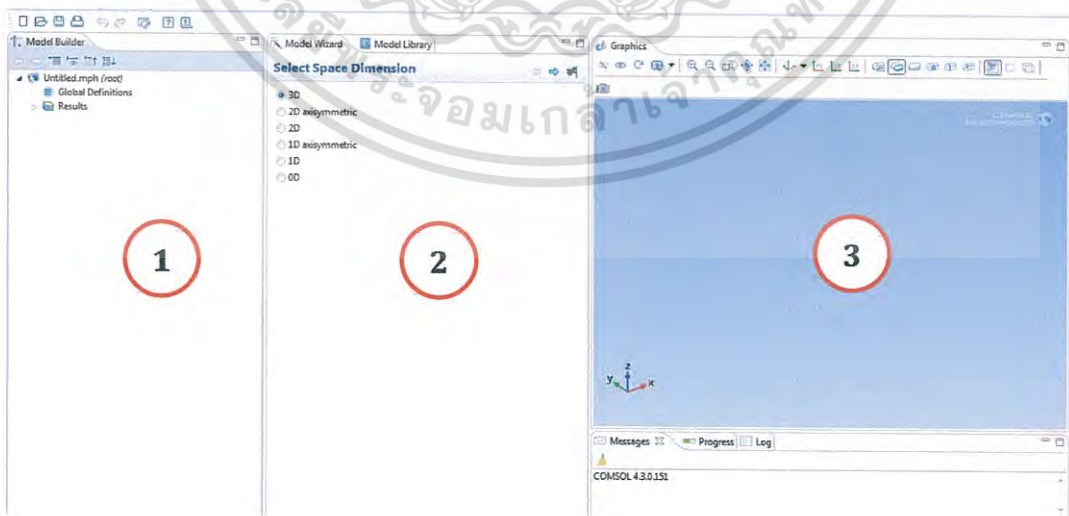
การศึกษาการจำลองแบบด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลประเภทขาชนิดบวก(P-type) ชนิดเดี่ยว เราเลือกใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics ใน การศึกษาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจะ ศึกษาโมดูลที่ประกอบไปด้วยขาชนิดเดี่ยว (P-type : $\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) ซึ่งการศึกษาจะยังคงอยู่บน พื้นฐานของโมดูลที่ประกอบไปด้วยขาสองชนิด (P-type และ N-type) ซึ่งเป็นแบบพื้นฐานของ อุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาการใช้โปรแกรมและการสร้างแบบจำลอง

ในเบื้องต้นเราจะทำการศึกษาองค์ประกอบพื้นฐานและการใช้เครื่องมือต่างๆ โดย ภาพรวมของโปรแกรมที่เราจะใช้ก่อน แล้วจึงลงรายละเอียดขั้นตอนในการกำหนดค่าต่างๆ

3.1.1 หน้าต่างการทำงาน

เมื่อเราเปิดโปรแกรมหน้าต่างแรกที่เราจะเห็นจะเป็นหน้าต่างมาตรฐานซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักดังรูปที่ 3.1 ต่อไปนี้




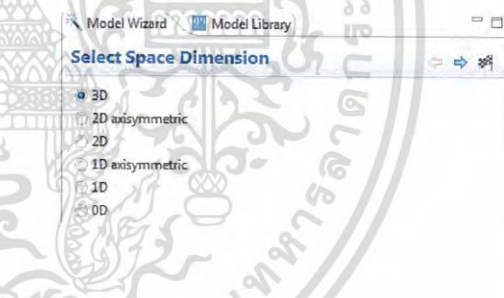

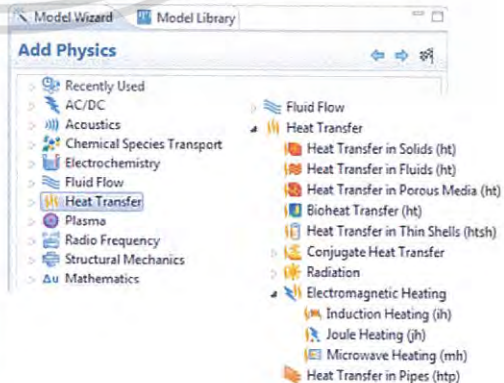
รูปที่ 3.1 แสดงหน้าต่างการทำงานของโปรแกรม Comsol Multiphysic V4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


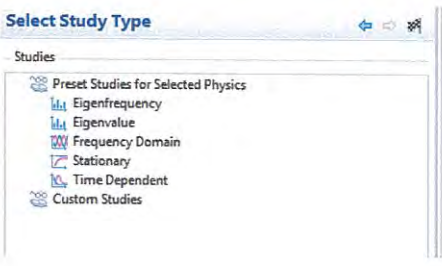
- หน้าต่างที่ 1 Model builder เป็นส่วนที่แสดงลักษณะต่างๆ ที่เราเลือกเพื่อใช้ในการศึกษา ได้แก่ เรื่องที่เราศึกษา รูปแบบแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ต่างที่กำหนด และผลการศึกษา เป็นต้น
- หน้าต่างที่ 2 เป็นส่วนกำหนดลักษณะทาง Physics ที่เราต้องการศึกษา เมื่อกำหนดเสร็จแล้ว สิ่งเราเลือกทั้งหมดจะปรากฏขึ้นที่ส่วนของ Model builder
- หน้าต่างที่ 3 Graphics เป็นส่วนที่แสดงแบบที่เราได้สร้างขึ้น และผลที่ได้จากการจำลองแบบที่ศึกษา ทำให้เราสามารถเห็นรายละเอียดที่ได้ทำการวิเคราะห์เป็นรูปธรรมและยังสามารถเลือกมุมมองระนาบต่างๆ ได้สะดวก

3.1.2 การกำหนดลักษณะทาง Physics

เป็นการใช้งานในหน้าต่างที่ 2 กำหนดค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการศึกษาให้สอดคล้องกับงานของเรา ซึ่งได้แสดงขั้นตอนและวิธีการเลือกค่าต่างๆ ไว้ตามลำดับดังตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.1 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นในโปรแกรม

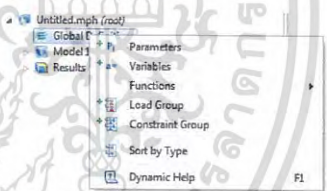
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
1) เลือกมิติในการทำงาน แล้วกด  ไปยังหน้าถัดไป	
2) เลือกเรื่องที่เราต้องการจะศึกษา โดยที่เรื่องที่เราเลือกอาจจะเป็นเรื่องเดียวหรือมีหลายเรื่องรวมกันก็ได้ แล้วกด  ไปยังหน้าถัดไป	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>3) เลือกรูปแบบการดำเนินการที่ต้องการศึกษา เช่น Stationary เป็นการดำเนินการแบบคงที่เป็นต้น แล้วกด  เพื่อบรรจุสิ่งที่เราได้กำหนดไปยัง Model Builder</p>	

3.1.3 Global Definitions

จะปรากฏในหน้าต่างของ Model Builder ใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรที่เราสามารถเรียกใช้งานได้ในทุกส่วน ซึ่งต่างจากใน Model ต่างๆ ที่จะใช้งานเฉพาะในส่วนนั้นๆ ซึ่งได้แสดงขั้นตอนและวิธีการเลือกค่าต่างๆ ไว้ตามลำดับดังตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.2 แสดงขั้นตอนและวิธีการตั้งค่าต่างๆ ในส่วน Global Definitions

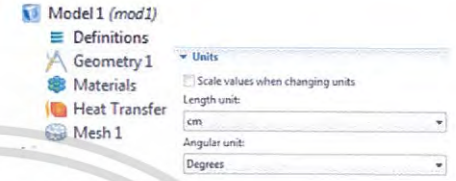
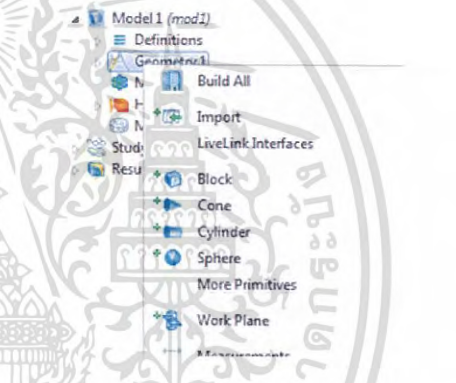
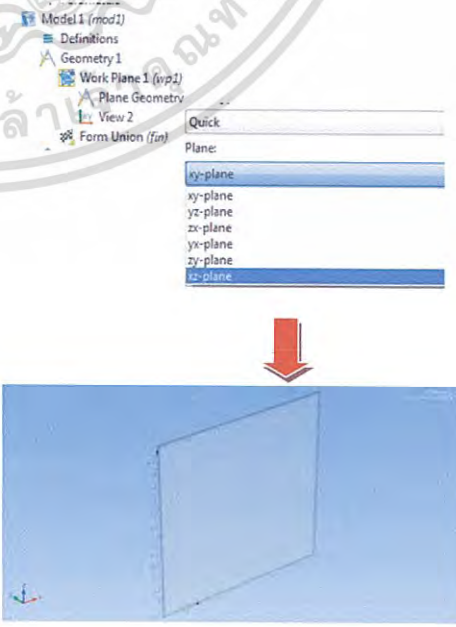
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง																				
<p>1) คลิกขวาที่ Global Definitions>Parameters</p>																					
<p>2) คลิกที่แถบ Parameters จะปรากฏหน้าต่าง Parameters</p>																					
<p>3) กำหนดตัวแปรและระบุค่าที่ช่อง Expression พร้อมใส่หน่วย จากนั้นโปรแกรมจะแปลงหน่วยไว้ในช่อง value ส่วนในช่อง Description เป็นการให้คำจำกัดความของตัวแปรที่เรากำหนดขึ้น</p>	 <table border="1" data-bbox="749 1670 1220 1840"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Expression</th> <th>Value</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>w</td> <td>.25 [cm]</td> <td>0.0025000 m</td> <td>Wide of n-p type SiGe</td> </tr> <tr> <td>tCu</td> <td>.05 [cm]</td> <td>5.0000E-4 m</td> <td>Thickness of copper plate</td> </tr> <tr> <td>tgap</td> <td>.1 [cm]</td> <td>0.0010000 m</td> <td>Thickness of gap</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>.25 [cm]</td> <td>0.0025000 m</td> <td>Length of n-p type SiGe</td> </tr> </tbody> </table>	Name	Expression	Value	Description	w	.25 [cm]	0.0025000 m	Wide of n-p type SiGe	tCu	.05 [cm]	5.0000E-4 m	Thickness of copper plate	tgap	.1 [cm]	0.0010000 m	Thickness of gap	L	.25 [cm]	0.0025000 m	Length of n-p type SiGe
Name	Expression	Value	Description																		
w	.25 [cm]	0.0025000 m	Wide of n-p type SiGe																		
tCu	.05 [cm]	5.0000E-4 m	Thickness of copper plate																		
tgap	.1 [cm]	0.0010000 m	Thickness of gap																		
L	.25 [cm]	0.0025000 m	Length of n-p type SiGe																		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

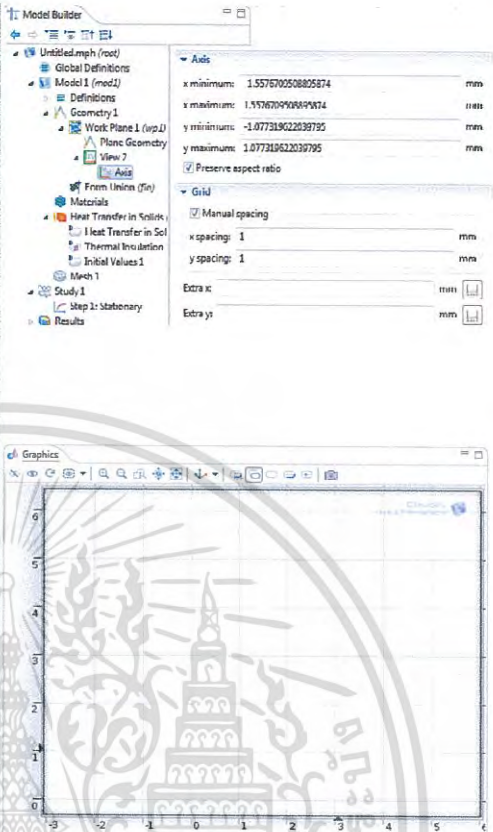
3.1.4 Geometry

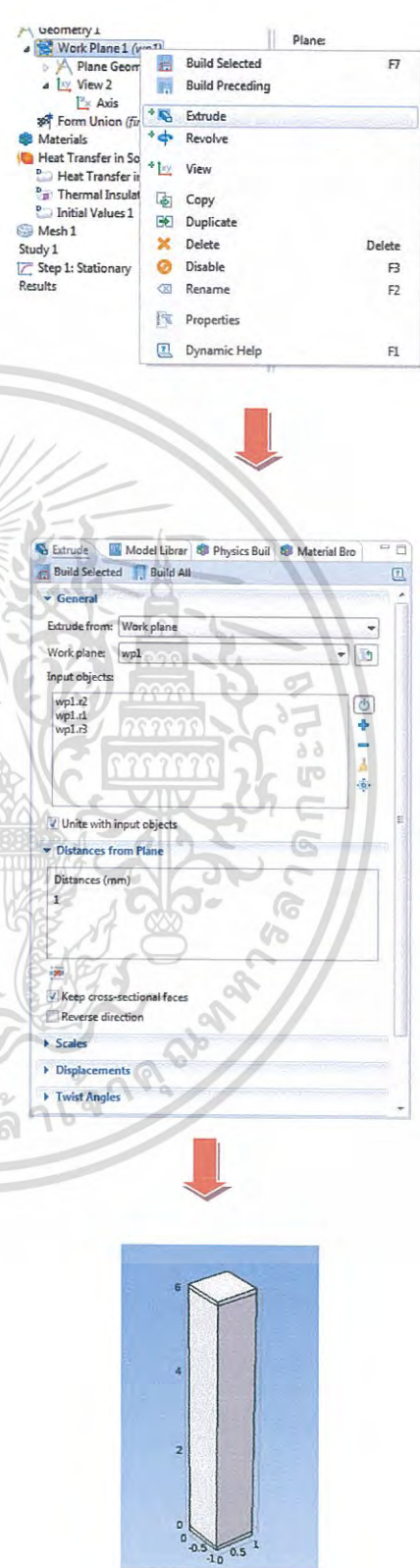
เป็นส่วนที่อยู่ใน Model ใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยสามารถสร้างได้มากกว่า 1 แบบ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ซึ่งแสดงตัวอย่างขั้นตอนในการสร้างแบบตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) คลิกที่แถบ Geometry จะปรากฏหน้าต่าง Units ให้เราเลือกหน่วยที่จะใช้ตามความเหมาะสม</p>	
<p>2) ทำการคลิกขวาที่ Geometry>Work Plane เพื่อที่จะสร้างแบบที่จะใช้ในการจำลอง</p> <p>หมายเหตุ ถ้าชิ้นงานของเราประกอบไปด้วยหลายส่วน สามารถเพิ่มwork plane ได้ตามที่ต้องการ</p>	
<p>3) คลิกที่แถบ Work Plane จะปรากฏหน้าต่าง Work Plane ให้เลือกระนาบที่เราจะใช้เขียนแบบจำลอง (model) ในหน้าต่างที่ 3 (Graphics) จะแสดงระนาบที่เรากำหนด</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>4) คลิกที่แถบ View2 > Axis จะปรากฏหน้าต่าง axis ในแถบ Grid ทำเครื่องหมายถูกที่ Manual Spacing เพื่อกำหนดค่า Grid ที่เราต้องการ โดยกำหนดให้เหมาะสมกับแบบที่เราจะสร้าง เพื่อความสะดวกในการสร้างแบบ เมื่อกำหนดเสร็จแล้วรูปแบบที่เรากำหนดจะแสดงให้เห็นในหน้าต่างที่ 3 ดังภาพตัวอย่าง</p>	
<p>5) คลิกที่แถบ Plane Geometry จะปรากฏแถบเครื่องมือที่จะใช้สำหรับสร้างแบบ</p>	
<p>6) ในการสร้างแบบในโปรแกรม Comsol multiphysics นั้นเราจะสร้างแบบ 2 มิติ ก่อน จากนั้นจึงทำการยืดออกเป็น 3 มิติ (จะเห็นในขั้นตอนที่ 7) จากขั้นตอนที่ 5) เลือกเครื่องมือที่จะใช้ตามต้องการ ในตัวอย่างนี้เราจะสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกขาเดี่ยว 1 ชิ้น เลือกใช้เครื่องมือ  สร้าง ส่วนชั้นสารและทองแดง ดังภาพตัวอย่าง</p>	

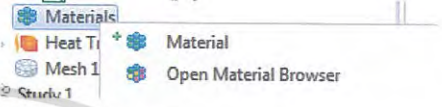

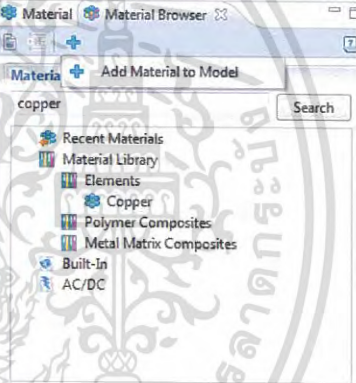
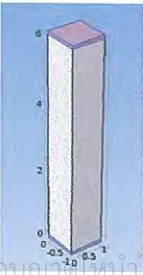
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>7) เมื่อสร้างแบบเสร็จแล้วทำการยืดออกให้เป็น 3 มิติ โดยคลิกขวาที่ Work Plane> Extrude ที่ส่วน General>input objects เลือกชิ้นส่วนที่ต้องยืดออก และที่ส่วน Distances from Plane ให้เรากำหนดระยะที่จะยืดออก จากนั้นไปที่ Build Selected หรือ Build All จะได้ดังภาพตัวอย่าง</p>	 <p>The image shows a sequence of steps in a CAD application. At the top, a context menu is open over a 'Work Plane 1' in the 'Geometry 1' tree, with 'Extrude' selected. Below this, the 'Extrude' dialog box is shown with the following settings: 'Extrude from: Work plane', 'Work plane: wp1', 'Input objects: wp1.x2, wp1.r1, wp1.r3', 'Unite with input objects' checked, 'Distances (mm): 1', 'Keep cross-sectional faces' checked, and 'Reverse direction' unchecked. At the bottom, a 3D model of a rectangular prism is displayed with dimensions 1, 1, and 3 along the x, y, and z axes respectively.</p>

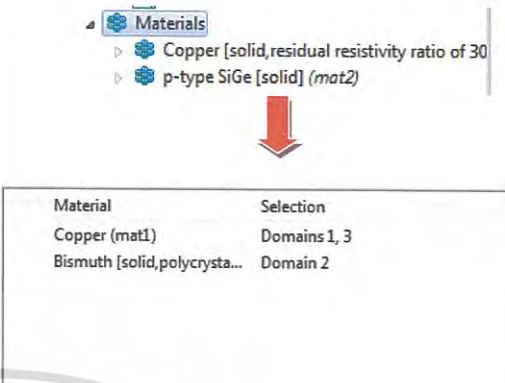
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 Materials

เป็นการเลือกวัสดุที่เราต้องการจะเลือกใช้ในแบบที่สร้างขึ้น ในบริเวณ Domain ที่เราต้องการ ซึ่งแสดงขั้นตอนและวิธีการได้ดังตารางที่ 3.4

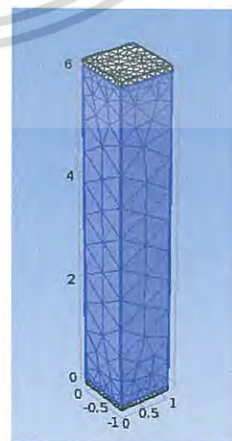
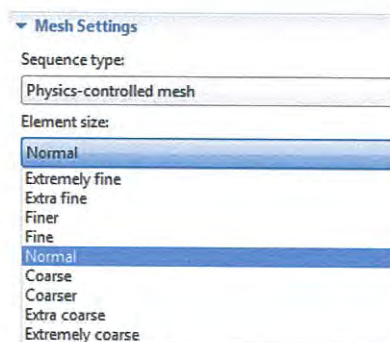
ตารางที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการใส่วัสดุในแบบจำลอง

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) คลิกขวาที่ Materials > Open Material Browser ซึ่งจะปรากฏในหน้าต่างที่ Material Browser</p>	
<p>2) ในส่วนนี้จะมีจะมีวัสดุให้เราเลือกมากมายขึ้นอยู่กับความต้องการของเรา เมื่อเลือกเสร็จแล้วให้คลิก  >Add Material to Model ในตัวอย่างเราเลือก Copper</p>	
<p>3) จะปรากฏหน้าต่าง Material ให้เราทำการเลือก Domain ที่ต้องการ ในตัวอย่างเลือก 1,3 แล้วทำการ Add to Selection ในส่วนที่เราเลือกจะแสดงเป็นสีม่วงดังภาพตัวอย่าง</p>	 <p style="text-align: center;">↓</p> 

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง						
<p>4) ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 2) - 3) เลือกวัสดุให้กับ Domain ที่ยังไม่มีวัสดุ ในตัวอย่างนี้คือ Domain 2 โดยในหน้าต่างที่ 1 ในส่วน Materials จะแสดงวัสดุที่เราได้เลือกไว้(สามารถคลิกดูคุณสมบัติต่างๆของวัสดุนั้นได้) ส่วนในหน้าต่างที่ 2 ใน Materials จะแสดงในแต่ละ Domain ว่าใช้วัสดุชนิดใด</p>	 <table border="1" data-bbox="721 457 1228 659"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Selection</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Copper (mat1)</td> <td>Domains 1, 3</td> </tr> <tr> <td>Bismuth [solid, polycrysta...</td> <td>Domain 2</td> </tr> </tbody> </table>	Material	Selection	Copper (mat1)	Domains 1, 3	Bismuth [solid, polycrysta...	Domain 2
Material	Selection						
Copper (mat1)	Domains 1, 3						
Bismuth [solid, polycrysta...	Domain 2						

3.1.6 Mesh

เมื่อเราเลือก Mesh ในหน้าต่างที่ 1 ก็จะพบว่าแบบของเราจะถูกแบ่งออกเป็นรูปสามเหลี่ยมในบริเวณ Domain ทั้งหมดดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในการคำนวณจะใช้หลักการที่มีพื้นฐานมาจากไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ(element) อาทิเช่น รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม หรือในกรณีที่เป็น 3 มิติจะใช้ ทรงลูกบาศก์ ทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ในการคำนวณก็จะกำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษาที่แต่ละจุดใน element นั้นๆ เป็นสมการ 1 ชุด เมื่อนำ element ทุกตัวมารวมกันก็จะได้ระบบสมการที่เราต้องทำการแก้ค่าแต่ละจุดนั้น ในการทำงานของเราในเริ่มแรกนั้นเราจะเป็นการกำหนด Mesh โดยอัตโนมัติก่อน แต่สำหรับผู้ที่มีความเชี่ยวชาญแล้วก็จะสามารถกำหนด Mesh ได้เองในแต่ละจุดที่ต้องการลงรายละเอียด



รูปที่ 3.2 แสดงการกำหนด Mesh โดยอัตโนมัติในแบบจำลองตัวอย่าง

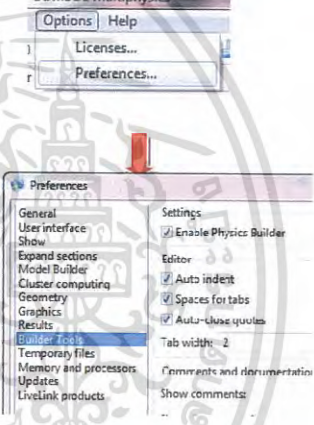

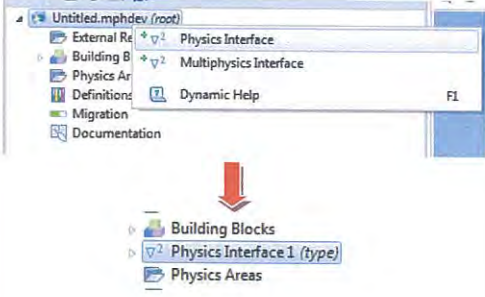
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้าง Physics Interface สำหรับแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริก

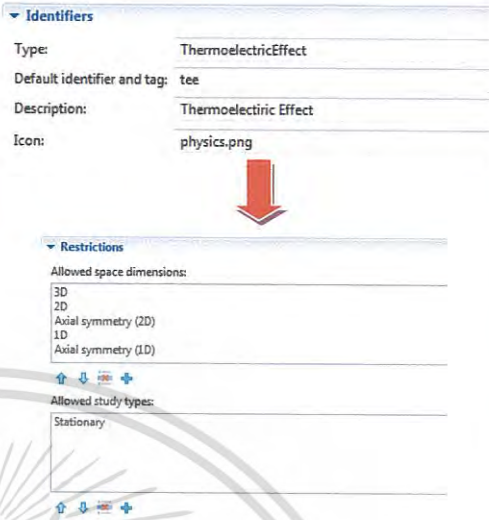
เป็นการสร้างรูปแบบที่จะใช้ในการศึกษา เนื่องจากการจำลองแบบเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น ในโปรแกรม Comsol multiphysics ไม่มีรูปแบบสำเร็จให้ ดังนั้นเราจึงต้องสร้างขึ้นมาเองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกตามขั้นตอนต่างๆดังนี้

3.2.1 การตั้งค่าเริ่มต้นในการสร้าง Physics Interface

เริ่มแรกต้องกำหนดค่าการตั้งค่าเพื่อให้เกิดการทำงานได้ใน Physics Interface อีกทั้งในการ Save งานที่สร้างขึ้นจะมีสกุลไฟล์ที่แตกต่างออกไปซึ่งมีขั้นตอนตามตารางที่ 3.5 ดังนี้ ตารางที่ 3.5 แสดงการตั้งค่าเริ่มต้นในการสร้าง Physics Interface

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) ไปที่ Option>Preferences จะปรากฏหน้าต่าง Preferences ขึ้นมา คลิกที่แถบ Builder Tool ทำเครื่องหมายถูกหน้า Enable Physics Builder > OK</p>	
<p>2) ไปที่ File>New Physics Builder จะปรากฏหน้าต่าง Physics Builder ขึ้นมาดังภาพตัวอย่าง</p>	
<p>3) คลิกขวาที่ Untitled.mpgdev > Physics Interface จะได้ Physics Interface 1 เพิ่มขึ้นมาดังภาพตัวอย่าง</p>	

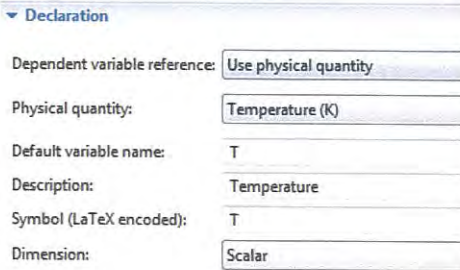
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

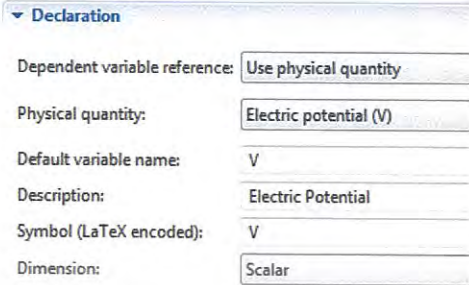
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>4) คลิกที่ Physics Interface 1 จะปรากฏหน้าต่าง Physics Interface ให้ทำการกำหนดค่าคั่งรูป ส่วนที่เหลือให้คงเดิมไว้ เมื่อเสร็จในส่วนนี้แล้วไปที่ File>Save ตั้งชื่อ ThermoelectricEffect.mphdev แล้วคลิก Save</p>	

3.2.2 การประกาศตัวแปร

หลังจากที่ตั้งค่าเริ่มต้นในการสร้าง Physics Interface เรียบร้อยแล้ว เราจะทำการประกาศตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Temperature : T) และประกาศตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential :V) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่จะใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก มีขั้นตอนตามตารางที่ 3.6 ดังนี้

ตารางที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการประกาศตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ T และ V

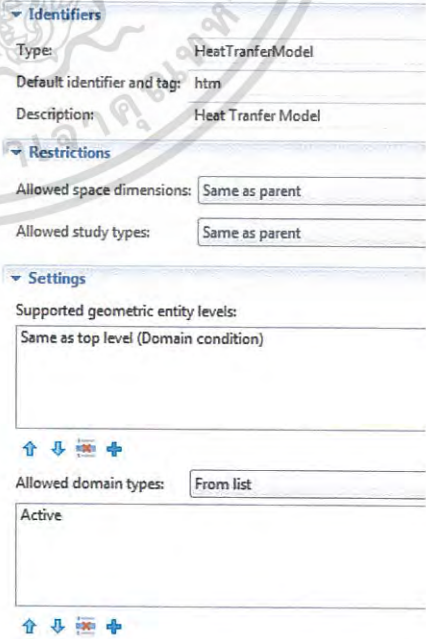
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) ประกาศตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ T (Temperature)</p> <p>คลิกขวา Physics Interface 1 เลือก Variables>Dependent Variable Declaration จะปรากฏหน้าต่าง Dependent Variable Declaration ขึ้นมาให้ตั้งค่าดังภาพตัวอย่าง ส่วนที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>2) ประกาศตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ V (Electric Potential)คลิกขวา Physics Interface 1 เลือก Variables>Dependent Variable Declaration จะ ปรากฏหน้าต่าง Dependent Variable Declaration ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังภาพตัวอย่าง ส่วนที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

3.2.3 Heat Transfer Model

การส่งผ่านความร้อนของตัวนำเป็นปรากฏการณ์พื้นฐานของอุปกรณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการ weak form ดังสมการที่ 2.37 และสามารถแสดงขั้นตอนในการสร้างได้ตามตารางที่ 3.7 ดังนี้

ตารางที่ 3.7 แสดงการสร้างสมการ Heat Transfer

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) สร้าง Feature 1 (HeatTranferModel)คลิกขวา Physics Interface เลือก Feature จะ ปรากฏแถบ Feature 1 และหน้าต่าง Feature ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังภาพตัวอย่าง ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>2) นิยามตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ T (Temperature)</p> <p>คลิกขวา Feature 1 (HeatTransferModel)</p> <p>เลือก Variable>Dependent Variable</p> <p>Definition จะปรากฏหน้าต่าง Dependent Variable Definition ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูปที่เหลื่อให้คงเดิมไว้</p>	
<p>3) สร้างตัวแปร k (Thermal conductivity)</p> <p>กำหนดค่าตัวแปรโดยผู้ใช้ คลิกขวา Feature 1 (HeatTransferModel) เลือก Inputs>User Input จะปรากฏหน้าต่าง User Input ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูปที่เหลื่อให้คงเดิมไว้</p>	
<p>4) นิยามตัวแปร k (Thermal conductivity)</p> <p>คลิกขวา User Input เลือก Variable Definition</p>	
<p>5) ใส่สมการที่ใช้ในการคำนวณ Heat Transfer คลิกขวา Feature 1 (HeatTransferModel) เลือก Equation>Weak From Equation จะปรากฏหน้าต่าง Weak From Equation ขึ้นมา ใส่สมการ $-k \cdot \nabla T \cdot \text{test}(\nabla T)$ ดังรูป ที่เหลื่อให้คงเดิมไว้</p>	

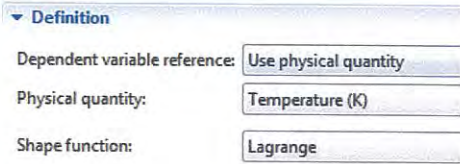
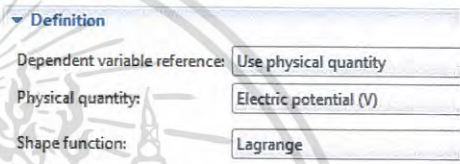
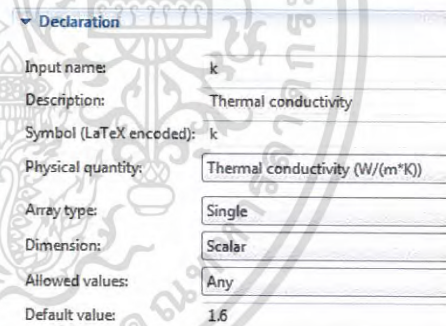
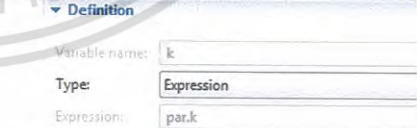
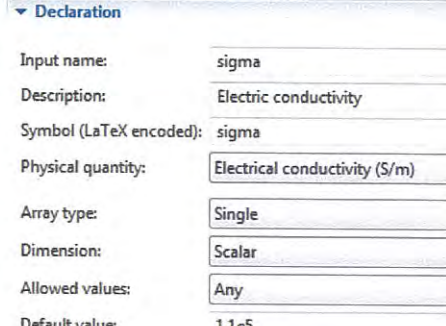
3.2.4 Thermoelectric Model

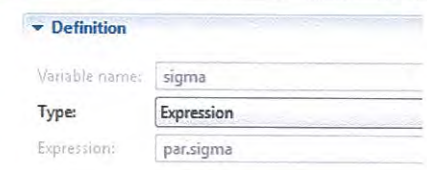
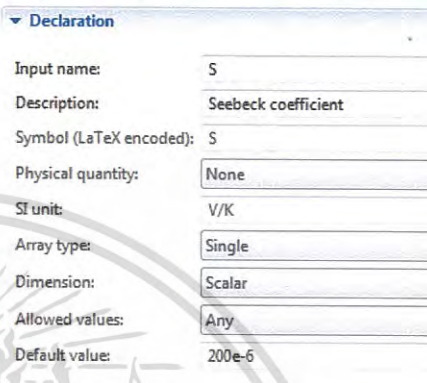

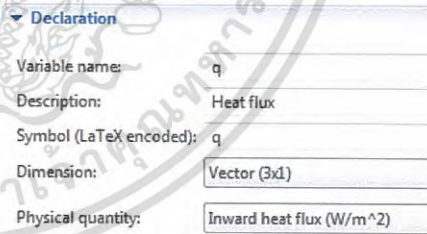
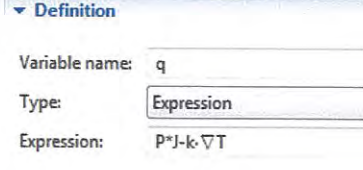
ในส่วนนี้เป็นการนำค่าตัวแปรที่ได้มีการประกาศไว้แล้วมาใช้ รวมถึงการกำหนดตัวแปรใหม่สำหรับใส่ค่าคงที่เพื่อใช้ในการกำหนดสมการที่เกี่ยวข้องขึ้นมา ทั้งหมดนี้เพื่อที่จะใช้สำหรับสมการที่ 2.35 และ 2.36 ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการที่ใช้สำหรับปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกแสดงขั้นตอนการสร้างตามตารางที่ 3.8 ดังนี้

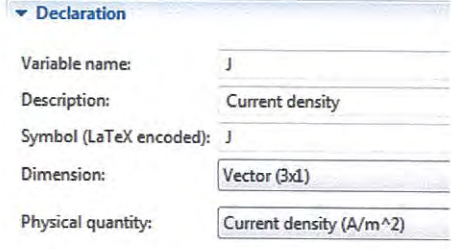
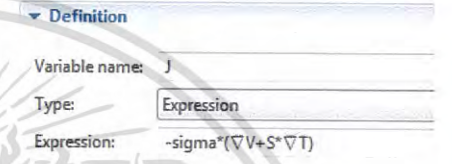
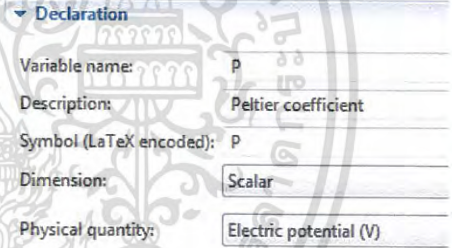
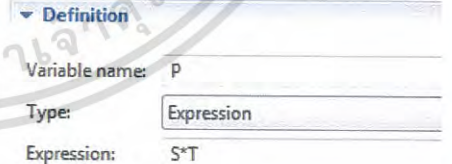
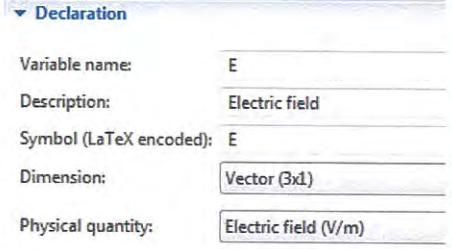
ตารางที่ 3.8 แสดงการสร้างสมการ Thermoelectric

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) สร้าง Feature 2 (ThermoelectricModel)</p> <p>คลิกขวา Physics Interface เลือก Feature จะปรากฏแถบ Feature 2 และหน้าต่าง Feature ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังภาพตัวอย่าง ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

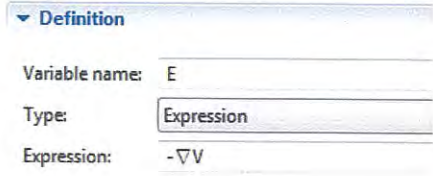
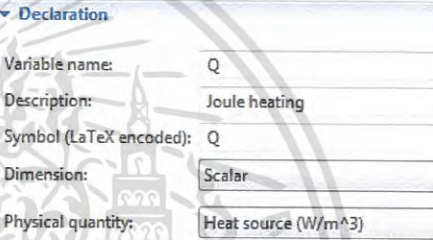
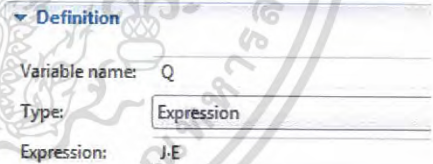
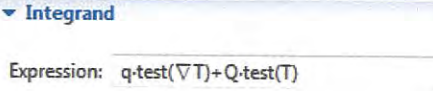
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>2) นิยามตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ T (Temperature)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variable>Dependent Variable Definition จะปรากฏหน้าต่าง Dependent Variable Definition ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>3) นิยามตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ V (Electric Potential)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variable>Dependent Variable Definition จะปรากฏหน้าต่าง Dependent Variable Definition ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>4) สร้างตัวแปร k (Thermal conductivity)</p> <p>กำหนดค่าตัวแปรโดยผู้ใช้</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Inputs>User Input จะปรากฏหน้าต่าง User Input ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>5) นิยามตัวแปร k (Thermal conductivity)</p> <p>คลิกขวา User Input เลือก Variable Definition</p>	
<p>6) สร้างตัวแปร sigma (Electric conductivity)</p> <p>กำหนดค่าตัวแปรโดยผู้ใช้</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Inputs>User Input จะปรากฏหน้าต่าง User Input ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

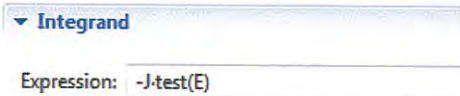
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>7) นิยามตัวแปร sigma (Electric conductivity)</p> <p>คลิกขวา User Input เลือก Variable Definition</p>	
<p>8) สร้างตัวแปร S (Seebeck) กำหนดค่าตัวแปร โดยผู้ใช้</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Inputs>User Input จะปรากฏหน้าต่าง User Input ขึ้นมา ให้ตั้งค่าคั่งรูป ที่เหลือให้ คงเดิมไว้</p>	
<p>9) นิยามตัวแปร S (Seebeck)</p> <p>คลิกขวา User Input เลือก Variable Definition</p>	
<p>10) ประกาศตัวแปร q (Heat flux)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variables>Variable Declaration จะ ปรากฏหน้าต่าง Variable Declaration ขึ้นมา ให้ตั้งค่าคั่งรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>11) นิยามตัวแปร q (Heat flux)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variables>Variable Definition จะ ปรากฏหน้าต่าง Variable Definition ขึ้นมา ให้ สมการ $P * J - k \cdot \nabla T$ คั่งรูป ที่เหลือให้คงเดิม ไว้</p>	

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>12) ประกาศตัวแปร J (Current density)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variables>Variable Declaration จะ ปรากฏหน้าต่าง Variable Declaration ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>13) นิยามตัวแปร J (Current density)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variables>Variable Definition จะ ปรากฏหน้าต่าง Variable Definition ขึ้นมา ให้ สมการ $-\sigma * (\nabla V + S * \nabla T)$ ดังรูป ที่ เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>14) ประกาศตัวแปร P (Peltier coefficient)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variables>Variable Declaration จะ ปรากฏหน้าต่าง Variable Declaration ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>15) นิยามตัวแปร P (Peltier coefficient)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variables>Variable Definition จะ ปรากฏหน้าต่าง Variable Definition ขึ้นมา ให้ สมการ $S * T$ ดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>16) ประกาศตัวแปร E (Electric field)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Variables>Variable Declaration จะ ปรากฏหน้าต่าง Variable Declaration ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>17) นิยามตัวแปร E (Electric field)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel)</p> <p>เลือก Variables>Variable Definition จะปรากฏหน้าต่าง Variable Definition ขึ้นมา ใส่สมการ $-∇V$ ดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>18) ประกาศตัวแปร Q (Joule heating)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel)</p> <p>เลือก Variables>Variable Declaration จะปรากฏหน้าต่าง Variable Declaration ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>19) นิยามตัวแปร Q (Joule heating)</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel)</p> <p>เลือก Variables>Variable Definition จะปรากฏหน้าต่าง Variable Definition ขึ้นมา ใส่สมการ $J \cdot E$ ดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>20) ใส่สมการที่ใช้ในการคำนวณปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก สมการที่ 1</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel)</p> <p>เลือก Equation>Weak Form Equation จะปรากฏหน้าต่าง Weak Form Equation ใส่สมการ $q \cdot \text{test}(\nabla T) + Q \cdot \text{test}(T)$ ดังรูป</p>	

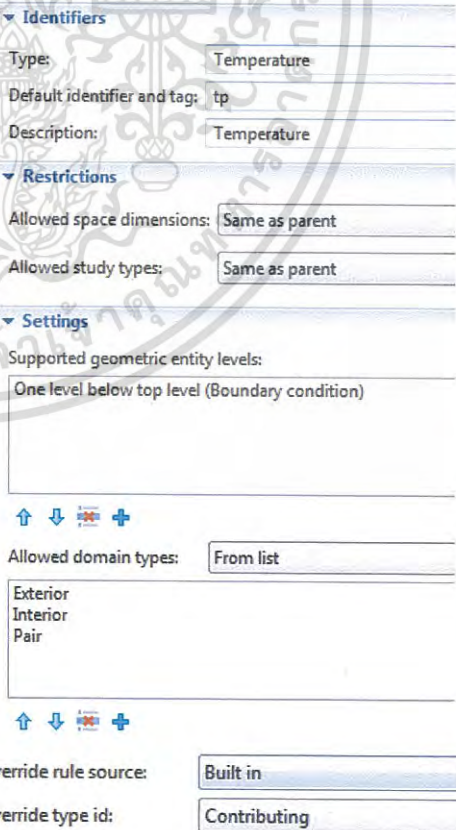
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>21) ใส่สมการที่ใช้ในการคำนวณปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก สมการที่ 2</p> <p>คลิกขวา Feature 2 (ThermoelectricModel) เลือก Equation>Weak Form Equation จะปรากฏหน้าต่าง Weak Form Equation ใส่สมการ $-J \cdot \text{test}(E)$ ดังรูป</p>	

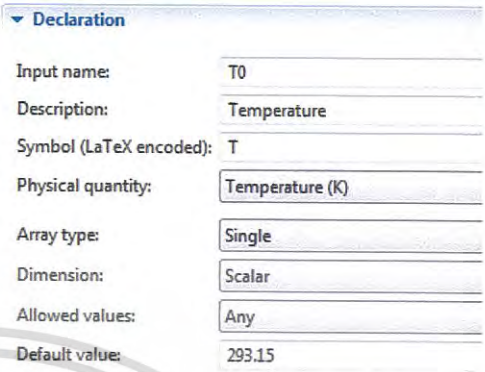
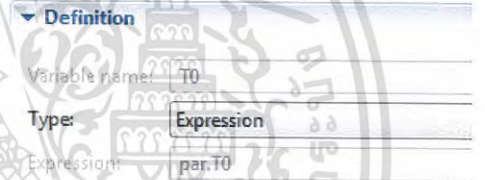
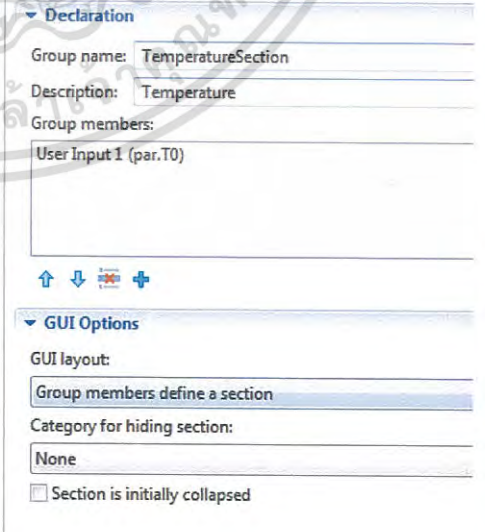
3.2.5 Boundary Conditions

ในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดค่าตามที่เรารต้องการตามแต่ละโดเมน ขั้นตอนในการสร้างตัวแปรเพื่อใส่ค่าที่ต้องการดังต่อไปนี้

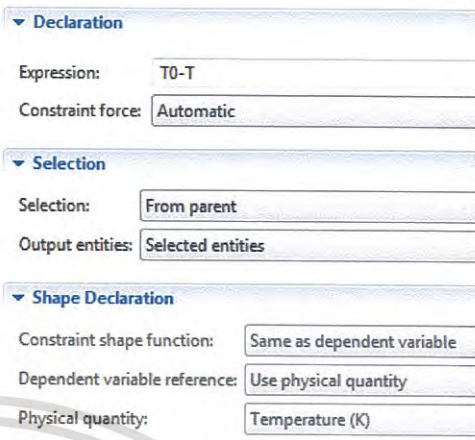
ตารางที่ 3.9 แสดงการสร้างสมการ Temperature Boundary Condition

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) สร้าง Feature 3 (Temperature)</p> <p>คลิกขวา Physics Interface เลือก Feature จะปรากฏแถบ Feature 3 และหน้าต่าง Feature ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

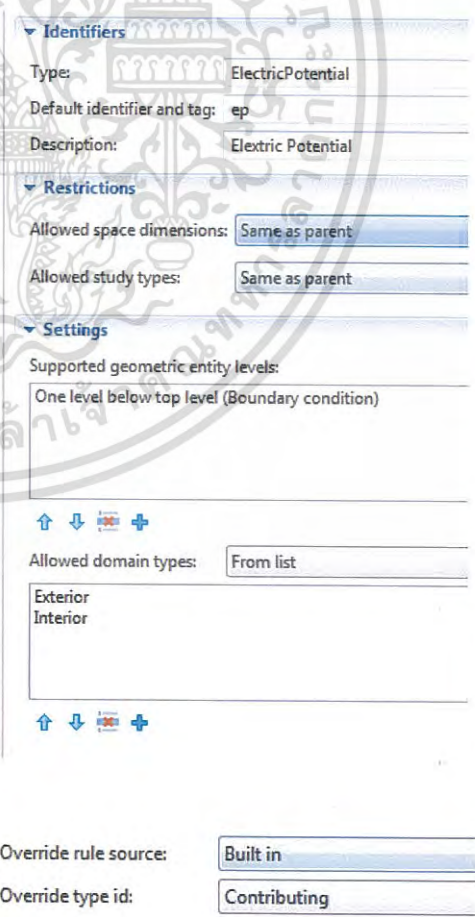
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>2) สร้างตัวแปร T0 (Temperature) กำหนดค่าตัวแปรโดยผู้ใช้</p> <p>คลิกขวา Feature 3 (Temperature) เลือก Inputs>User Input จะปรากฏหน้าต่าง User Input ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>3) นิยามตัวแปร T0 (Temperature) คลิกขวา User Input เลือก Variable Definition</p>	
<p>4) สร้างกลุ่มตัวแปร TemperatureSection</p> <p>คลิกขวา Feature 3 (Temperature) เลือก Inputs>User Input Group จะปรากฏหน้าต่าง User Input Group ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

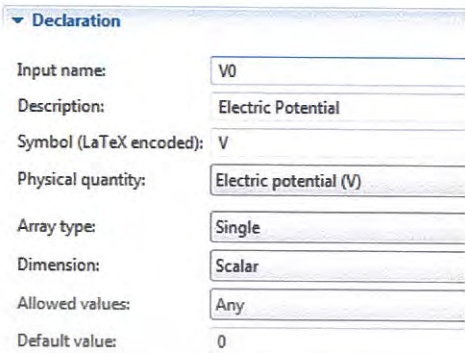

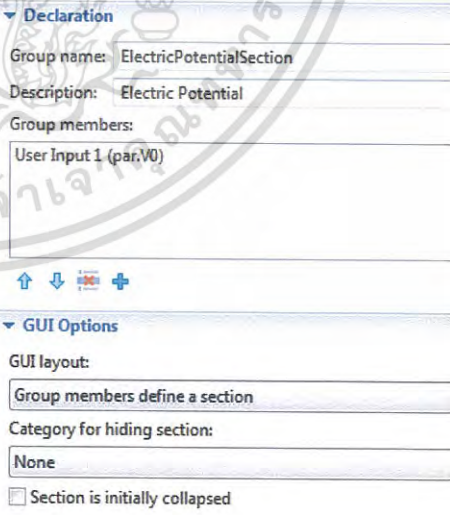
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>5) ใส่สมการที่ใช้ในการคำนวณ Temperature Boundary Condition</p> <p>คลิกขวา Feature 3 (Temperature) เลือก Equation>Constraint จะปรากฏหน้าต่าง Constraint ใส่สมการ $T_0 - T$ ดังรูป</p>	

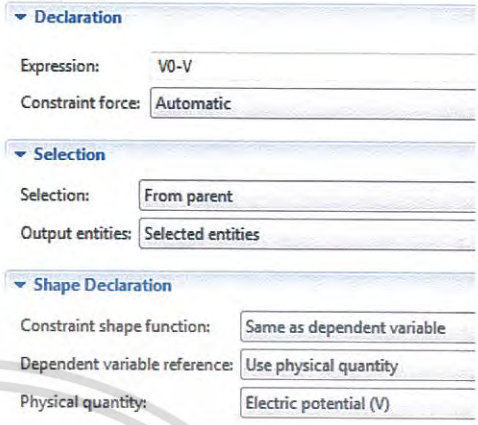
ตารางที่ 3.10 แสดงการสร้างสมการ Electric Potential Boundary Condition

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) สร้าง Feature 4 (ElectricPotential)</p> <p>คลิกขวา Physics Interface เลือก Feature จะปรากฏแถบ Feature 4 และหน้าต่าง Feature ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

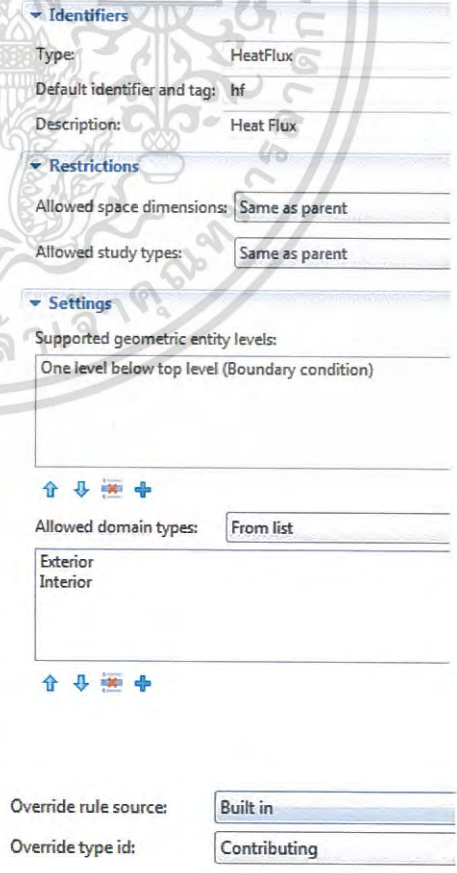
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

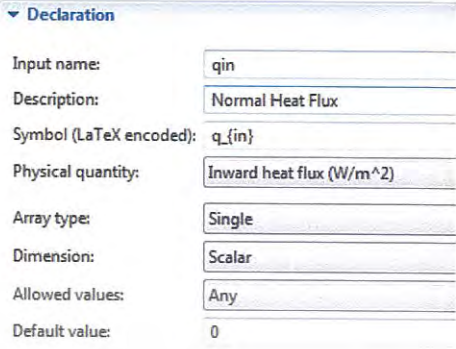
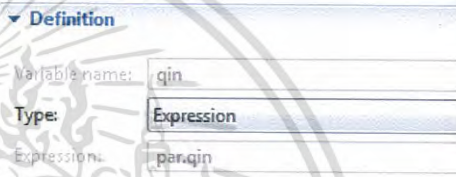
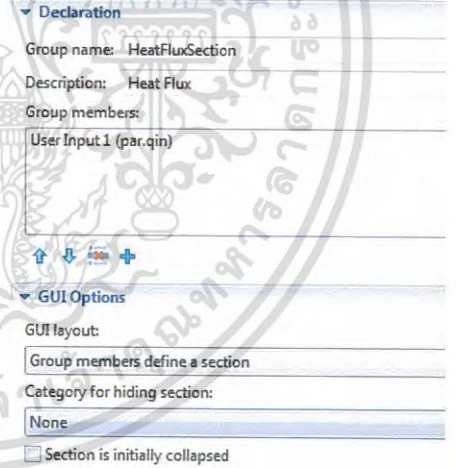
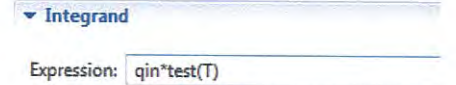
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>2) สร้างตัวแปร V0 (Electric Potential)</p> <p>กำหนดค่าตัวแปรโดยผู้ใช้</p> <p>คลิกขวา Feature 4 (ElectricPotential) เลือก Inputs>User Input จะปรากฏหน้าต่าง User Input ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>3) นิยามตัวแปร V0 (Electric Potential) คลิกขวา User Input เลือก Variable Definition</p>	
<p>4) สร้างกลุ่มตัวแปร ElectricPotentialSection</p> <p>คลิกขวา Feature 4 (ElectricPotential) เลือก Inputs>User Input Group จะปรากฏหน้าต่าง User Input Group ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>5) ใส่สมการที่ใช้ในการคำนวณ Electric Potential Boundary Condition</p> <p>คลิกขวา Feature 4 (ElectricPotential) เลือก Equation>Constraint จะปรากฏหน้าต่าง Constraint ใส่สมการ $V_0 - V$ ดังรูป</p>	

ตารางที่ 3.11 แสดงการสร้างสมการ Heat Flux Boundary Condition

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) สร้าง Feature 5 (HeatFlux)</p> <p>คลิกขวา Physics Interface เลือก Feature จะปรากฏแถบ Feature 5 และหน้าต่าง Feature ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>2) สร้างตัวแปร q_{in} (HeatFlux) กำหนดค่าตัวแปรโดยผู้ใช้</p> <p>คลิกขวา Feature 5 (HeatFlux) เลือก Inputs>User Input จะปรากฏหน้าต่าง User Input ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>3) นิยามตัวแปร q_{in} (HeatFlux)</p> <p>คลิกขวา User Input เลือก Variable Definition</p>	
<p>4) สร้างกลุ่มตัวแปร HeatFluxSection</p> <p>คลิกขวา Feature 5 (HeatFlux) เลือก Inputs>User Input Group จะปรากฏหน้าต่าง User Input Group ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	
<p>5) ใส่สมการที่ใช้ในการคำนวณ Heat Flux Boundary Condition</p> <p>คลิกขวา Feature 5 (HeatFlux) เลือก Equation>Weak From Equation จะปรากฏหน้าต่าง Weak From Equation ใส่สมการ $q_{in} * test(T)$ ดังรูป</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 The Insulation Condition

ในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดค่าความร้อนให้เคลื่อนอยู่ภายในตัวเทอร์โมอิเล็กทริก โดยไม่มีความร้อนออกมาสู่ภายนอก ระบบ แสดงการตั้งค่าได้ดังต่อไปนี้

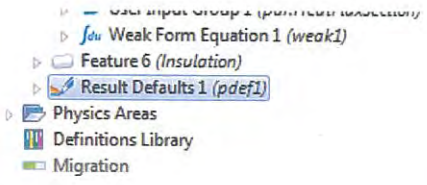
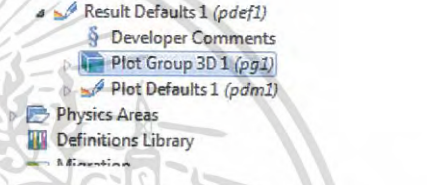
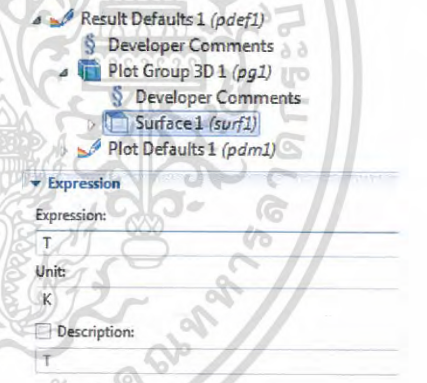
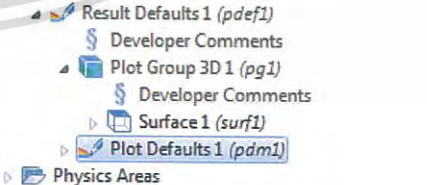

ตารางที่ 3.12 The Insulation Condition

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) สร้าง Feature 6 (Insulation)</p> <p>คลิกขวา Physics Interface เลือก Feature จะปรากฏแถบ Feature 6 และหน้าต่าง Feature ขึ้นมา ให้ตั้งค่าดังรูป ที่เหลือให้คงเดิมไว้</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 สร้างการแสดงผลที่ได้จากการจำลอง

ตารางที่ 3.13 แสดงการสร้างผลที่ได้จากการจำลอง

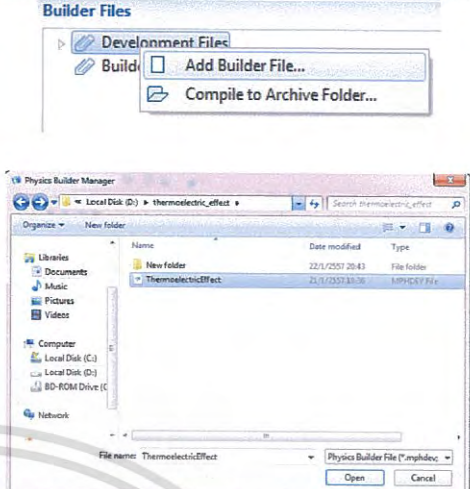
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) คลิกขวา Physics Interface 1 (ThermoelectricEffect) เลือก Result Defaults จะปรากฏแถบ Result Defaults 1 ดังรูป</p>	
<p>2) คลิกขวา Result Defaults 1 เลือก Plot Group 3D จะปรากฏแถบ Plot Group 3D 1 ดังรูป</p>	
<p>3) คลิกขวา Plot Group 3D 1 เลือก Surface จะปรากฏแถบ Surface 1 และหน้าต่าง Surface ให้ตั้งค่า ดังรูป</p>	
<p>4) คลิกขวา Result Defaults 1 เลือก Plot Defaults จะปรากฏแถบ Plot Defaults 1 ดังรูป</p>	
<p>5) คลิกขวา Plot Defaults 1 เลือก Default Scalar Plot จะปรากฏแถบ Default Scalar Plot 1 และหน้าต่าง Default Scalar Plot ให้ตั้งค่าดังรูป</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

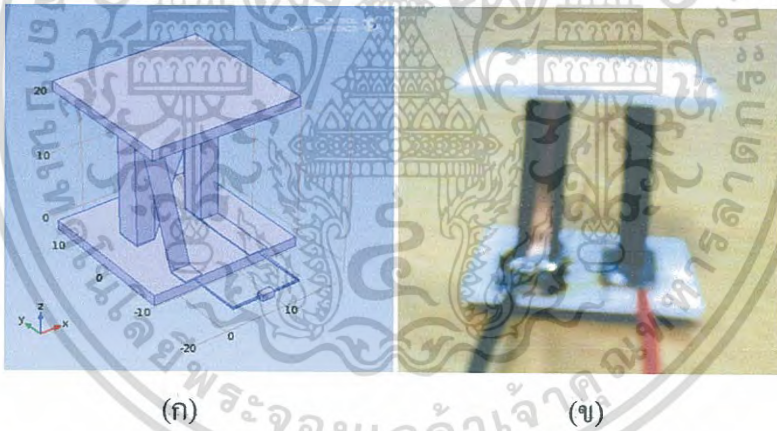
3.2.8 การนำ Physics Interface ที่สร้างขึ้นบรรจุลงในส่วนพื้นที่ทำงาน

ตารางที่ 3.14 แสดงการนำ Physics Interface ที่สร้างขึ้นบรรจุลงในส่วนพื้นที่ทำงาน

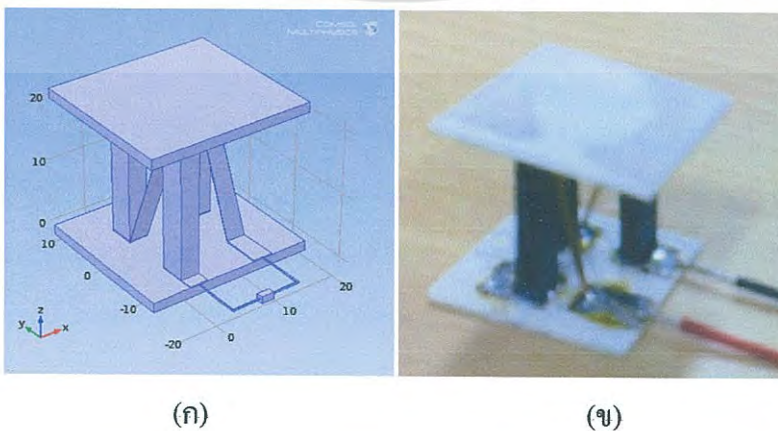
ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) คลิกขวา Physics Areas เลือก Physics Area จะปรากฏแถบ Physics Area 1 และหน้าต่าง Physics Area ส่วนของ Parent Area เลือก Heat Transfer คลิก </p>	
<p>2) ที่หน้าต่าง Physics Area ส่วนของ Physics Area Setting ให้ตั้งค่าดังรูป</p>	
<p>3) ไปที่ View>Physics Builder Manager จะปรากฏหน้าต่าง Physics Builder Manager ขึ้นมา ในส่วน Builder File ให้คลิกขวา Development File>Add Builder File หาชื่อ Physics Interface File ที่เราสร้างขึ้นซึ่งก็คือ ThermoElectricEffect.mphdev จากนั้นคลิก open สิ้นสุดขั้นตอนการสร้าง Physic Interface</p>	

ขั้นตอนและวิธีการตั้งค่า	ภาพตัวอย่าง
	

3.3 แบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาเดี่ยว(P-type)จำนวน 2 ขา และ 3 ขา
 แบบจำลองที่สร้างขึ้นของ โมดูลจำนวน 2 และ 3 ขา เมื่อเทียบกับแบบจริงมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.3 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 2 ขา (ก) แบบจำลอง (ข) แบบจริง

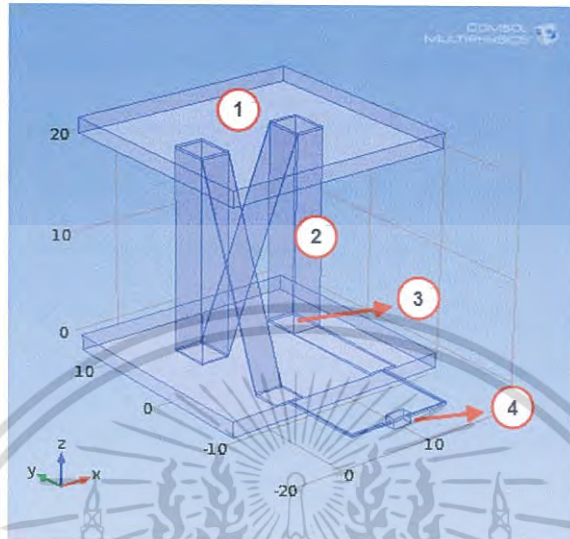


รูปที่ 3.4 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 3 ขา (ก) แบบจำลอง (ข) แบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการวิจัยนี้ เมื่อมีข้อสงสัยหรือข้อขัดข้องใดๆ กรุณาติดต่อผู้ดูแลระบบ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 ขนาดของแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้น เราได้ทำการวัดส่วนต่างจากแบบจริงซึ่งมีขนาดเป็นดังนี้



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบของโมดูลจำนวน 2 ขา

- หมายเลข 1 เซรามิก (Al_2O_3) แบบ 2 ขา ฐานกว้าง $23 \times 24 \text{ mm}^2$
 แบบ 3 ขา ฐานกว้าง $24 \times 26 \text{ mm}^2$ หนา 1.5 mm
 หนา 1.5 mm
- หมายเลข 2 ชั้นสาร ฐานกว้าง $3 \times 4 \text{ mm}^2$ สูง 20 mm
- หมายเลข 3 แผ่นทองแดง หนา 0.2 mm
- หมายเลข 4 ตัวต้านทาน พื้นที่หน้าตัด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ยาว 2 mm

หมายเหตุ ในโมดูลจำนวน 3 ขา จะมีส่วนประกอบต่างๆ เท่ากัน ยกเว้น ขนาดของเซรามิก

3.3.2 คุณสมบัติของวัสดุ

ตารางที่ 3.15 แสดงคุณสมบัติของแผ่นทองแดง แผ่นอะลูมินา และ ตัวต้านทาน

วัสดุ	สภาพนำความร้อน (W/m.K)	สภาพนำไฟฟ้า (S/m)	สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)
แผ่นทองแดง	350	5.9×10^8	6.5×10^{-6}
แผ่นอะลูมินา	40	10^{-16}	2.25×10^{-4}
ตัวต้านทาน	0.1	400	2.49×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

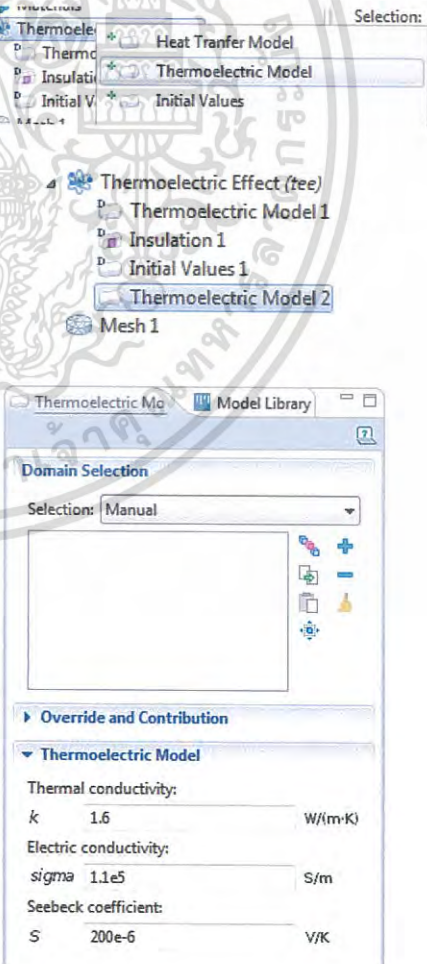
3.4 ขั้นตอนการจำลองสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาเดียว(P-type)จำนวน 2 และ 3 ขา


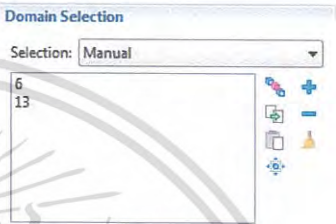
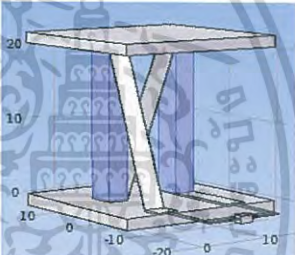
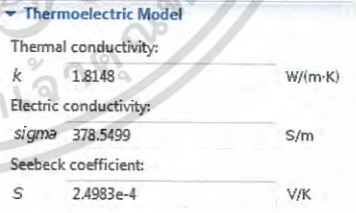
เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการจำลองปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นกับ โมดูลที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ

3.4.1 การใส่ค่าคุณสมบัติวัสดุ

แบบจำลองที่สร้างขึ้นเราจะต้องทำการใส่คุณสมบัติ สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity), สภาพนำไฟฟ้า (Electric conductivity) และ สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ให้กับส่วนต่างๆ ของโมดูล ได้แก่ ชี้นสาร แผ่นทองแดง แผ่นอะลูมินา และ ตัวต้านทาน โดยจะมีขั้นตอนดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 แสดงขั้นตอนการใส่ค่าคุณสมบัติวัสดุ

ขั้นตอนการจำลอง	ภาพตัวอย่าง
1) คลิกขวาที่ Thermolectric effect เลือก Thermolectric model จะปรากฏแถบ Thermolectric model 2 และหน้าต่าง Thermolectric model ขึ้น	

ขั้นตอนการจำลอง	ภาพตัวอย่าง																					
<p>2) ในหน้าต่าง Thermoelectric model ใน ส่วนของ Domain Selection เลือกส่วนของแบบจำลองที่เราต้องการจะกำหนดค่าให้แก่วัสดุนั้น โดยจากรูปเราจะเลือกใส่ค่าคุณสมบัติให้กับส่วนชิ้นสารก่อน คลิกที่แบบจำลองในส่วนชิ้นสาร เมื่อคลิกแล้วจะปรากฏเป็นสีแดง แล้วคลิก  จะปรากฏชิ้นส่วนวัสดุที่เลือกในแถบ Domain Selection เสร็จแล้วให้เลือกส่วนชิ้นสารที่เหลือให้ครบ เมื่อเลือกเสร็จแล้วบริเวณที่ถูกเลือกจะปรากฏเป็นแถบสีม่วง</p>	  																					
<p>3) ใส่ค่าคุณสมบัติของวัสดุ โดยจากรูปเป็นส่วนหนึ่งของชิ้นสาร</p> <p>ในส่วนของแบบจำลองที่เหลือให้ทำตามขั้นตอนที่ 1-3 ต้องใส่ให้ครบทุกส่วนของแบบจำลอง</p>	 <table border="1" data-bbox="801 1310 1158 1523"> <thead> <tr> <th colspan="3">Thermoelectric Model</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Thermal conductivity:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>1.8148</td> <td>W/(m·K)</td> </tr> <tr> <td>Electric conductivity:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>378.5499</td> <td>S/m</td> </tr> <tr> <td>Seebeck coefficient:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>2.4983e-4</td> <td>V/K</td> </tr> </tbody> </table>	Thermoelectric Model			Thermal conductivity:			k	1.8148	W/(m·K)	Electric conductivity:			σ	378.5499	S/m	Seebeck coefficient:			S	2.4983e-4	V/K
Thermoelectric Model																						
Thermal conductivity:																						
k	1.8148	W/(m·K)																				
Electric conductivity:																						
σ	378.5499	S/m																				
Seebeck coefficient:																						
S	2.4983e-4	V/K																				

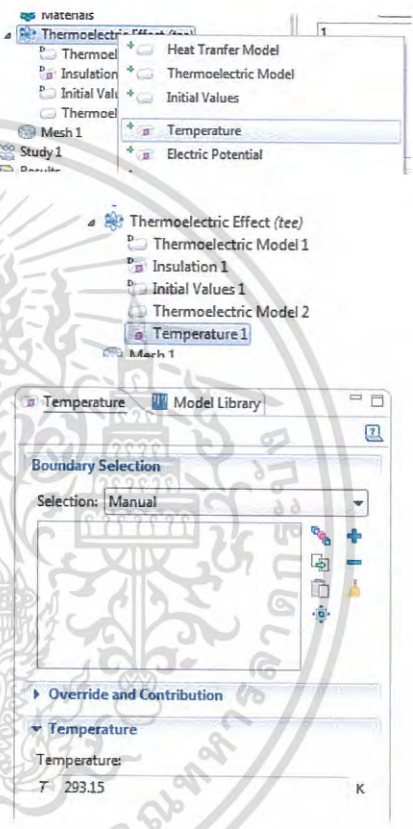

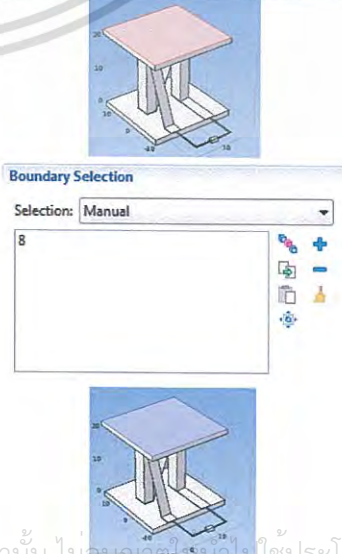
หมายเหตุ

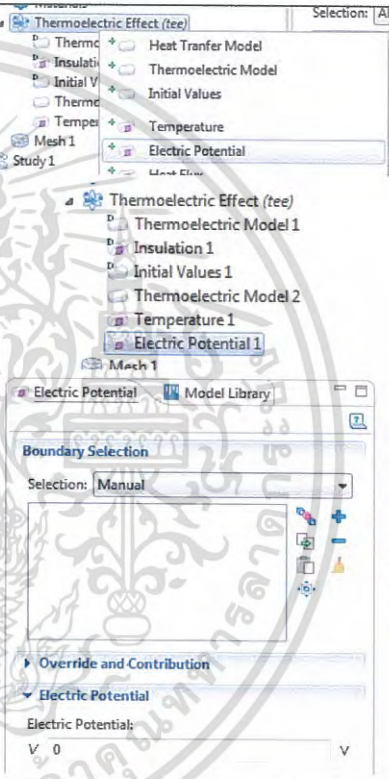
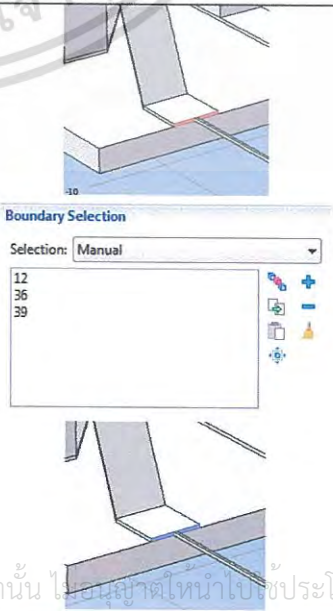
- ค่าคุณสมบัติของแผ่นทองแดง แผ่นอะลูมินา และตัวต้านทานให้เป็นไปตามตารางที่ 3.15
- ค่าคุณสมบัติของชิ้นสารจะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างอุณหภูมิ ดังนั้นในการจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิจำต้องทำการเปลี่ยนค่าคุณสมบัติของสารใหม่


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น หากท่านใดนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ดังนั้นผลต่างอุณหภูมิระหว่าง 2 ด้านของโมดูล จะเป็นตัวกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า มีขั้นตอนดังตารางที่ 3.17 ตารางที่ 3.17 แสดงการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต

ขั้นตอนการจำลอง	ภาพตัวอย่าง
<p>1) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิ</p> <p>คลิกขวาที่ Thermoelectric effect เลือก Temperature จะปรากฏแถบ Temperature 1 และหน้าต่าง Temperature ขึ้นมา</p>	
<p>2) ในหน้าต่าง Temperature ในส่วนของ Boundary Selection คลิกที่ส่วนบนสุดของแบบจำลอง เพื่อจะใส่อุณหภูมิ เมื่อคลิกแล้วจะปรากฏเป็นสีแดง คลิก  จะปรากฏขึ้นส่วนวัสดุที่เลือกในแถบ Domain Selection เมื่อเลือกเสร็จแล้วบริเวณที่ถูกเลือกจะปรากฏเป็นแถบสีม่วง</p>	

ขั้นตอนการจำลอง	ภาพตัวอย่าง
<p>3) ใส่ค่าอุณหภูมิ โดยจากรูปนี้จะเป็นการใส่ อุณหภูมิในด้านร้อน</p> <p>ในส่วนด้านล่างสุดของแบบจำลองจะ กำหนดให้เป็นด้านเย็น โดยค่าอุณหภูมิใน ด้านนี้จะคงค่าไว้ที่อุณหภูมิห้อง 303.15 K ทำตามขั้นตอนเช่นเดียวกับ 1-3</p>	
<p>4) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของความต่าง ศักย์ไฟฟ้า</p> <p>คลิกขวาที่ Thermolectric effect เลือก Electric Potential จะปรากฏแถบ Electric Potential 1 และหน้าต่าง Electric Potential ขึ้นมา</p>	
<p>5) ในหน้าต่าง Temperature ในส่วนของ Boundary Selection คลิกที่แถบดังรูปของ แบบจำลอง เพื่อจะใส่กราวด์ เมื่อคลิกแล้ว จะปรากฏเป็นสีแดง คลิก + จะปรากฏ ชิ้นส่วนวัสดุที่เลือกในแถบ Domain Selection เมื่อเลือกเสร็จแล้วบริเวณที่ถูก เลือกจะปรากฏเป็นแถบสีม่วง</p>	

ขั้นตอนการจำลอง	ภาพตัวอย่าง
6) ใส่ค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์	

3.4.3 การกำหนดค่าความต้านทาน

เราใช้ตัวต้านทาน 5 โอห์มเป็นโหลดให้แก่เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แต่ในแบบจำลองในการใส่ค่าคุณสมบัติของวัสดุจะไม่มีค่าความต้านทาน จะมีเพียงแต่การใส่สภาพนำไฟฟ้าเท่านั้น เราทราบแล้วตัวต้านทานเรามีพื้นที่หน้าตัด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ยาว 2 mm^2 และต้องการความต้านทาน 5 โอห์ม ซึ่งจะใช้ค่าสภาพนำไฟฟ้าคือ 400 S/m โดยมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 3.1

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{L}{\sigma A} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

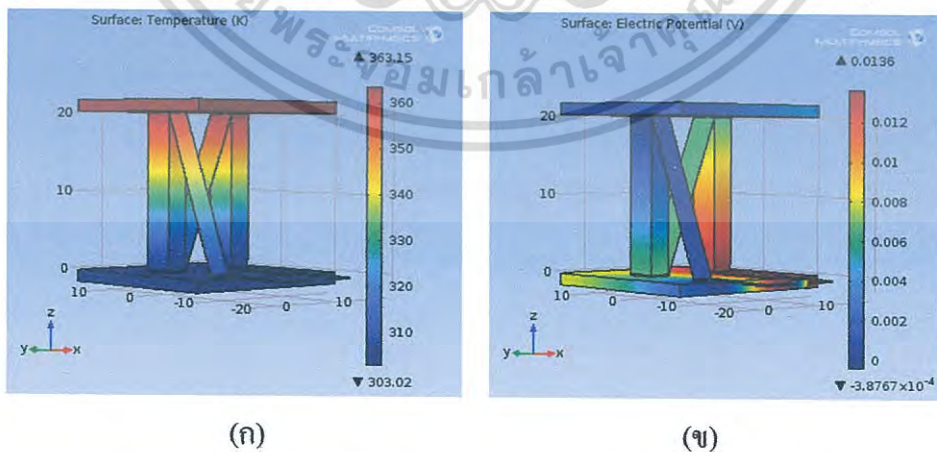
ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot \text{m}$)⁻¹

σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (S/m)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (mm^2)

L คือ ความยาว (m)

หลังจากที่เราทำการกำหนดค่าคุณสมบัติ เงื่อนไขขอบเขตและความต้านทานเป็นที่เรียบร้อยแล้วเราจะทำการคำนวณ โดยคลิกขวาที่ study 1 เลือก compute โปรแกรมจะทำการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิและความต่างศักย์ในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงผลจากการคำนวณของการกระจายตัวของ (ก) อุณหภูมิ

และ (ข) ความต่างศักย์ ในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ จากที่แสดงขั้นตอนทั้งหมดในหัวข้อที่ 3.4 เป็นการใช้กับเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล

จำนวน 2 ขาเป็นหลัก ส่วนใน 3 ขานั้นก็มีขั้นตอนการทำเช่นเดียวกัน

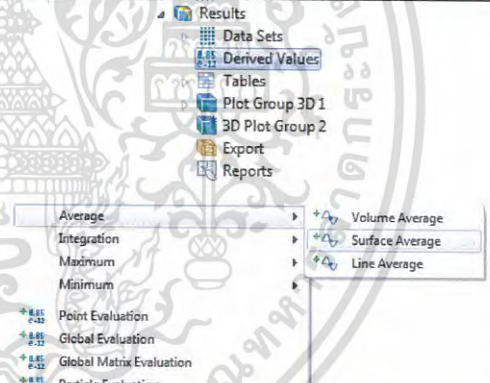

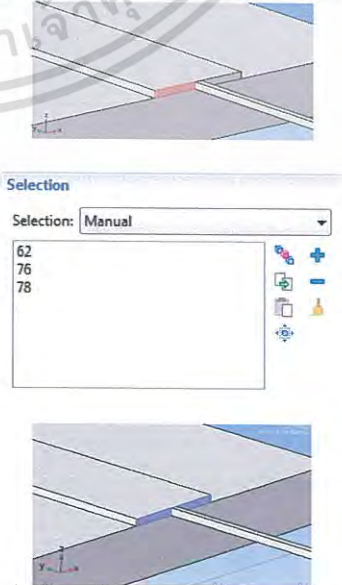
3.5 ขั้นตอนแสดงผลการคำนวณเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล


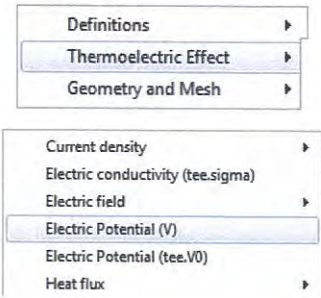
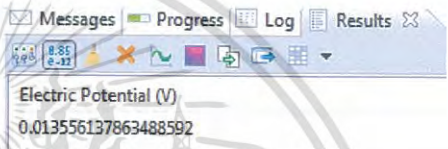
เมื่อดำเนินการในขั้นตอนที่ 3.4 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว การแสดงผลจะเป็นการเลือกโดเมนที่ต้องการเพื่อหาค่าเฉลี่ยภายในพื้นที่นั้น ค่าที่เราต้องการทราบก็คือความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก แล้วจึงนำค่าทั้งสองไปพิจารณาในการหาค่ากำลังทางไฟฟ้าของโมดูลต่อไป ซึ่งแสดงขั้นตอนการหาค่าดังต่อไปนี้

3.5.1 ขั้นตอนการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าที่เกิดจากผลต่างอุณหภูมิได้ขณะที่มีการต่อความต้านทาน 5 โอห์ม แสดงขั้นตอนการหาค่าตามตารางที่ 3.18

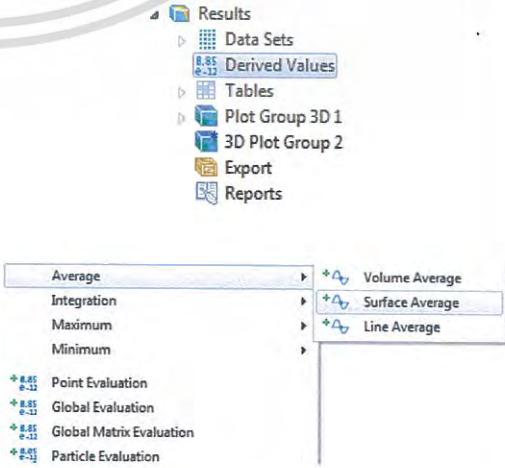
ตารางที่ 3.18 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า


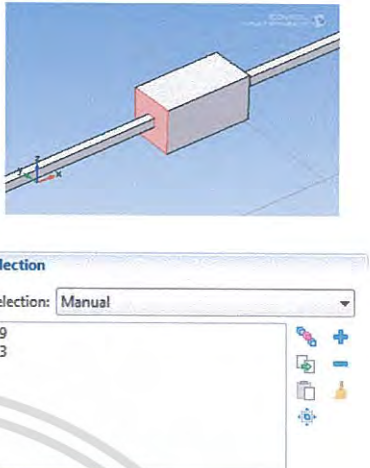
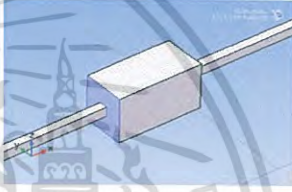


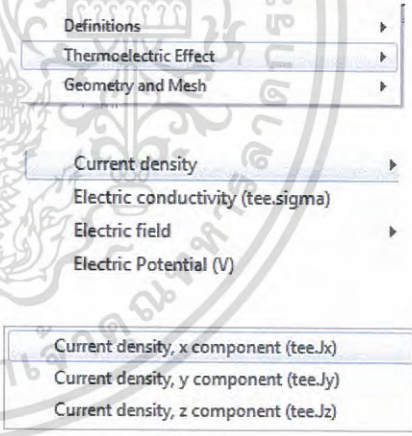
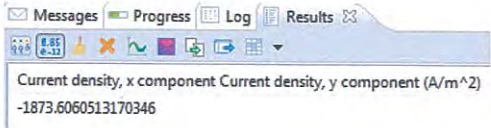
ขั้นตอนการหาค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>1) ในส่วน Model builder ไปที่ Results > Derived Values แล้วคลิกคลิกขวา ไปที่ Average แล้วเลือก Surface Average</p>	
<p>2) ในหน้าต่าง Surface Average ในส่วนของ Selection คลิกที่ส่วนปลายสุดของแผ่นทองแดงทั้งหมด (ฝั่งตรงข้ามกับด้านที่ให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์) เพื่อจะหาค่าความต่างศักย์ เมื่อคลิกแล้วจะปรากฏเป็นสีแดง คลิก  จะปรากฏขึ้นส่วนวัสดุที่เลือกในแถบ Selection เมื่อเลือกเสร็จแล้วบริเวณที่ถูกเลือกจะปรากฏเป็นแถบสีม่วง</p>	

ขั้นตอนการหาค่า	ภาพตัวอย่าง
3) ในหน้าต่าง Surface Average ในส่วน ของ Expression เลือก  แล้ว ไปที่ Thermolectric Effect แล้วเลือก Electric Pontential (V)	
4) ในหน้าต่าง Surface Average ทำการ Evaluate ค่า จะแสดงค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้าในส่วน Results คำนวณ ของหน้าต่าง Garphics	

3.5.2 ขั้นตอนการหาค่ากระแสไฟฟ้า

ในส่วนของโปรแกรมจะไม่มีส่วนที่เป็นการหาค่ากระแสไฟฟ้า แต่จะเป็นส่วนที่หาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างที่ได้เคยกล่าวไปแล้ว ซึ่งแสดงขั้นตอนการหาค่าดังตารางที่ 3.19 ตารางที่ 3.19 แสดงขั้นตอนการหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ขั้นตอนการหาค่า	ภาพตัวอย่าง
1) ในส่วน Model builder ไปที่ Results > Derived Values แล้วคลิกคลิกขวา ไปที่ Average แล้วเลือก Surface Average	

ขั้นตอนการหาค่า	ภาพตัวอย่าง
<p>2) ในหน้าต่าง Surface Average ในส่วนของ Selection คลิกที่พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของตัวต้านทาน เพื่อจะหาค่าความหนาแน่นกระแส เมื่อคลิกแล้วจะปรากฏเป็นสีแดงคลิก  จะปรากฏขึ้นส่วนวัสดุที่เลือกในแถบ Selection เมื่อเลือกเสร็จแล้วบริเวณที่ถูกเลือกจะปรากฏเป็นแถบสีม่วง</p>	 
<p>3) ในหน้าต่าง Surface Average ในส่วนของ Expression เลือก  แล้วไปที่ Thermoelectric Effect > Current density แล้วเลือก Current density, x component จากนั้นไปที่  ทำเช่นเดิมเพื่อเพิ่ม Current density, y component และ Current density, z component</p>	
<p>4) ในหน้าต่าง Surface Average ทำการ Evaluate ค่า จะแสดงค่าความหนาแน่นกระแสรวมทั้ง 3 แนวแกนในส่วน Results ด้านล่างของหน้าต่าง Graphics หมายเหตุ ในการคำนวณจะพิจารณาเฉพาะค่าความหนาแน่นกระแส (ไม่คิดเครื่องหมายลบ)</p>	

เมื่อได้ค่าความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดตัวต้านทานขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ เป็นที่เรียบร้อย เราสามารถที่จะหาค่ากระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 3.2

$$J = \frac{I}{A} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/m^2)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

หมายเหตุ จากที่แสดงขั้นตอนทั้งหมดในหัวข้อที่ 3.5 เป็นการใช้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

จำนวน 2 ขาเป็นหลัก ส่วนใน 3 ขานี้ก็มีขั้นตอนการทำเช่นเดียวกัน



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

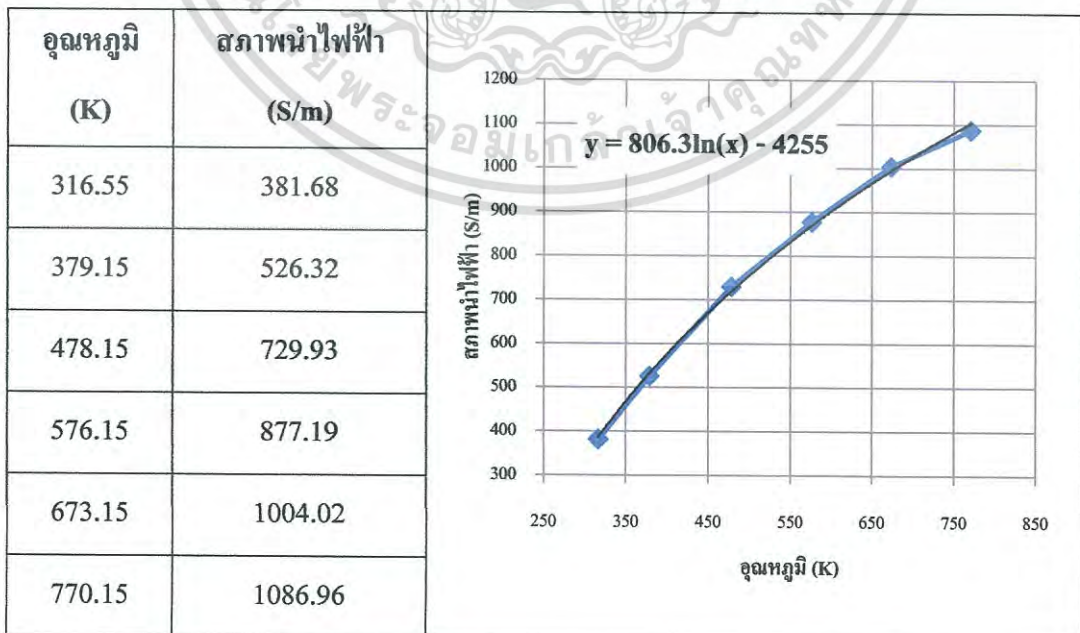
ในบทนี้จะเป็นการศึกษาการจำลองแบบเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลชนิดขาเดียวที่มีจำนวน 2 และ 3 ขา โดยใช้ Physics Interface ในการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นของกระแส (J) เป็นหลัก เพื่อนำไปพิจารณาหาค่ากระแส (I) และกำลังทางไฟฟ้า (W) ของโมดูล เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวัดจริง จากนั้นใช้โปรแกรมในการจำลองสถานการณ์อื่นๆ ทั้งนี้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ได้จำลองขึ้นจะใช้เช่นเดียวกับค่าที่ได้ทำการวัดจริง ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองในส่วนต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิด P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.1 ผลการวัดค่าคุณสมบัติของสาร

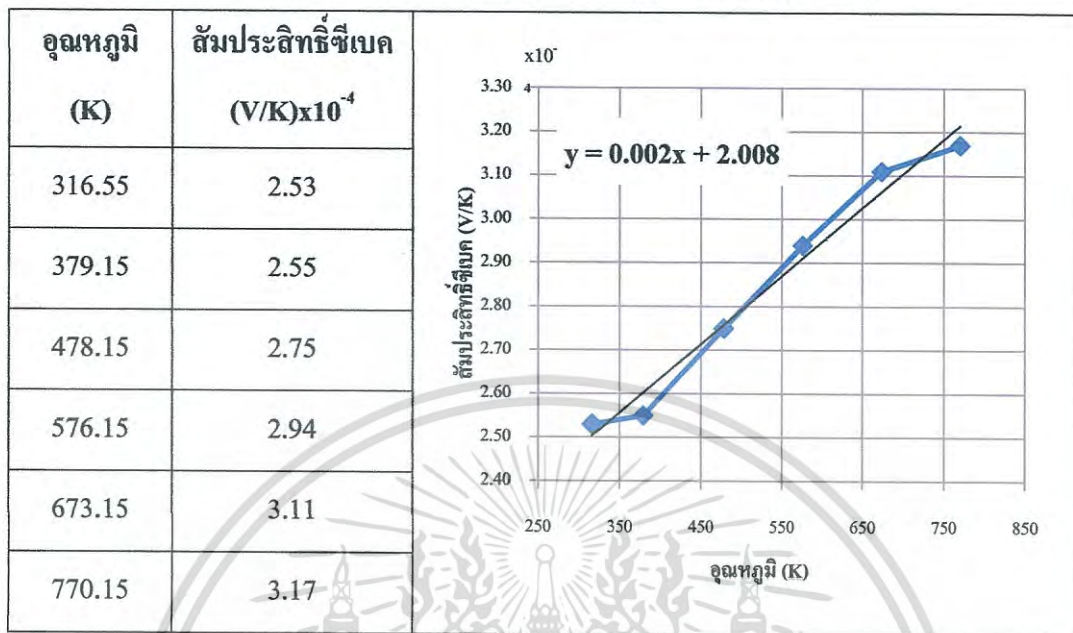
เนื่องจากว่าเมื่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนไป คุณสมบัติของสารที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณในแบบจำลอง ทำให้เราต้องส่งสารที่สังเคราะห์ขึ้นจริงไปตรวจสอบค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.1-4.3

ตารางที่ 4.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ P-type ณ อุณหภูมิต่างๆ

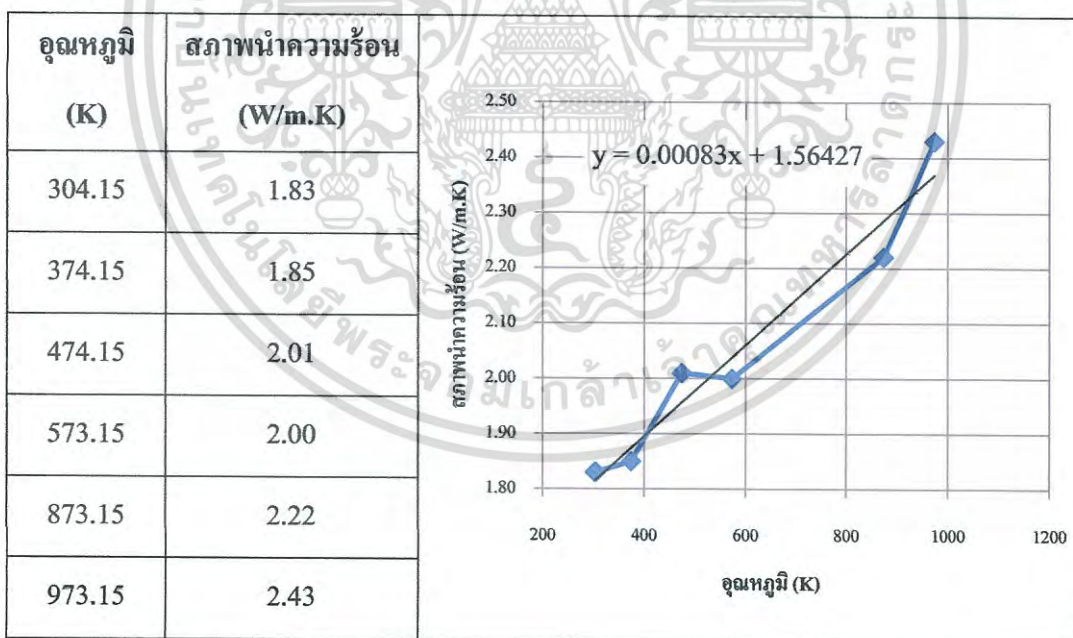


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำ P-type ณ อุณหภูมิต่าง ๆ



ตารางที่ 4.3 แสดงสภาพนำความร้อนของสารกึ่งตัวนำ P-type ณ อุณหภูมิต่าง ๆ



4.1.2 ผลการประมาณค่าคุณสมบัติของสาร

ในการคำนวณแบบจำลองจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น ถ้าเราพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิทุกๆค่า ซึ่งเป็นการศึกษาที่ลึก

ลงไปอีกระดับหนึ่งของการคำนวณปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ในระดับนี้เราจะใช้ค่าเอกสารเป็นเอกสารที่เสถียรและหาได้ง่ายๆในการคำนวณเพื่อที่จะหาคุณสมบัติที่เราต้องการค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิช่วงกลางระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น โดยอุณหภูมิ (อยู่ในช่วง 300-400 K) ที่แต่ละจุดจะประมาณจากตารางที่ 4.1 – 4.3 ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติวัสดุที่ได้ทำการวัดมาเรียบร้อยแล้ว ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นของโมดูล

อุณหภูมิด้านเย็น (K)	อุณหภูมิด้านร้อน (K)	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิด้านร้อน - เย็น (K)	สภาพนำความร้อน (W/m.K)	สภาพการนำไฟฟ้า (S/m)	สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค ($V/k \times 10^{-4}$)
303.15	323.15	313.15	1.8148	378.5500	2.4983
303.15	343.15	323.15	1.8228	403.8954	2.5139
303.15	363.15	333.15	1.8308	428.4684	2.5296
303.15	383.15	343.15	1.8388	452.3146	2.5453
303.15	403.15	353.15	1.8468	475.4757	2.5609
303.15	423.15	363.15	1.8548	497.9901	2.5766
303.15	443.15	373.15	1.8628	519.8929	2.5923
303.15	463.15	383.15	1.8708	541.2163	2.6080
303.15	483.15	393.15	1.8788	561.9903	2.6236
303.15	503.15	403.15	1.8868	582.2426	2.6393

4.2 ผลการศึกษาเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดขาเดียวจำนวน 2 ขา

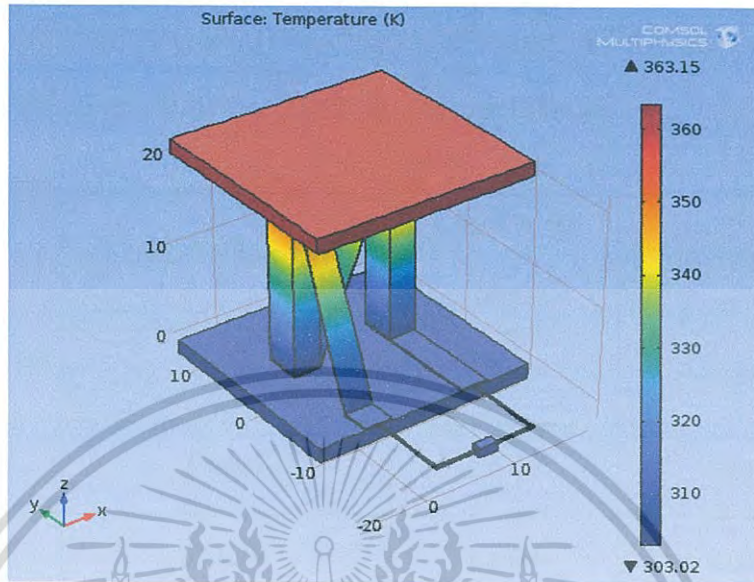
ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลที่ได้จากแบบจำลองโมดูลจำนวน 2 ขา เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดค่าจริง แล้วนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกันว่าเป็นอย่างไร ซึ่งผลที่ได้ในแต่ละส่วนแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลจากการจำลองโมดูลจำนวน 2 ขา

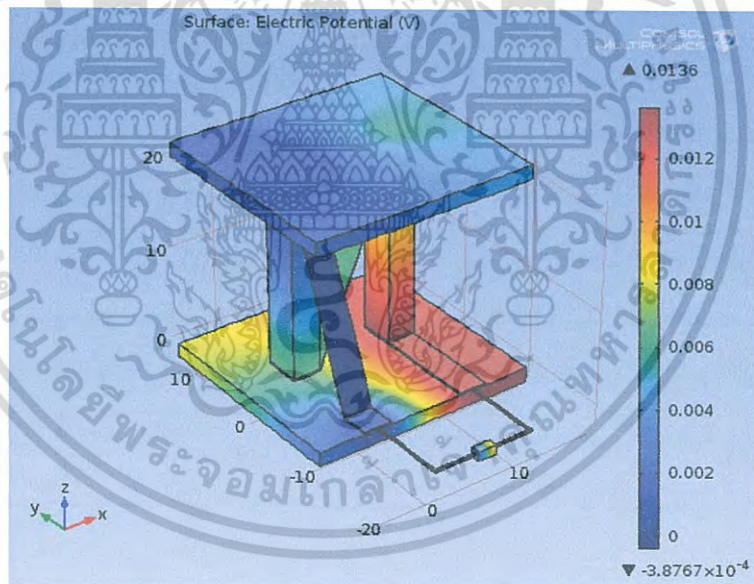
เมื่อดำเนินการตามหัวข้อที่ 3.4 เรียบร้อยแล้ว ในการศึกษาจะทำการทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิทำให้เกิดด้านร้อนกับด้านเย็นขึ้นที่โมดูล ทั้งนี้ให้ด้านเย็นอุณหภูมิจึงที่ประมาณ 303 K และด้านร้อนเปลี่ยนแปลงไปจนถึง 500 K โดยทำการต่อโหลด 5 โอห์มเพื่อทำการวัดค่าความต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์และกระแสที่ออกมา ณ ผลต่างอุณหภูมิต่างๆรวมทั้งคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา ทั้งนี้ แสดงผลตัวอย่างเมื่อมีผลต่างอุณหภูมิ 40 K ที่ได้ออกมาดังรูปที่ 4.1 - 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงผลการกระจายอุณหภูมิของ โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิ 40 K



รูปที่ 4.2 แสดงผลการกระจายความต่างศักย์ของ โมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิ 40 K

4.2.2 ผลการวัดค่าจากแบบจำลองของโมดูลจำนวน 2 ขา

จากหัวข้อ 3.5 ที่ได้แสดงวิธีการหาความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ในส่วนนี้ได้ กำหนดค่าผลต่างของอุณหภูมิในช่วงเดียวกับค่าที่ได้จากการวัด รวมถึงการจำลองค่าความต้านทานของโหลด 5 โอห์ม ที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 mm^2 และมีความยาว 2 mm ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.1 เพื่อนำค่าสภาพนำไฟฟ้าไปใส่ในแบบจำลองตัวต้านทาน โดยค่าคุณสมบัติของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ ใช้ตามตารางที่ 4.4 โดยผลที่ได้จากการจำลองแบบโมดูลจำนวน 2 ขา แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

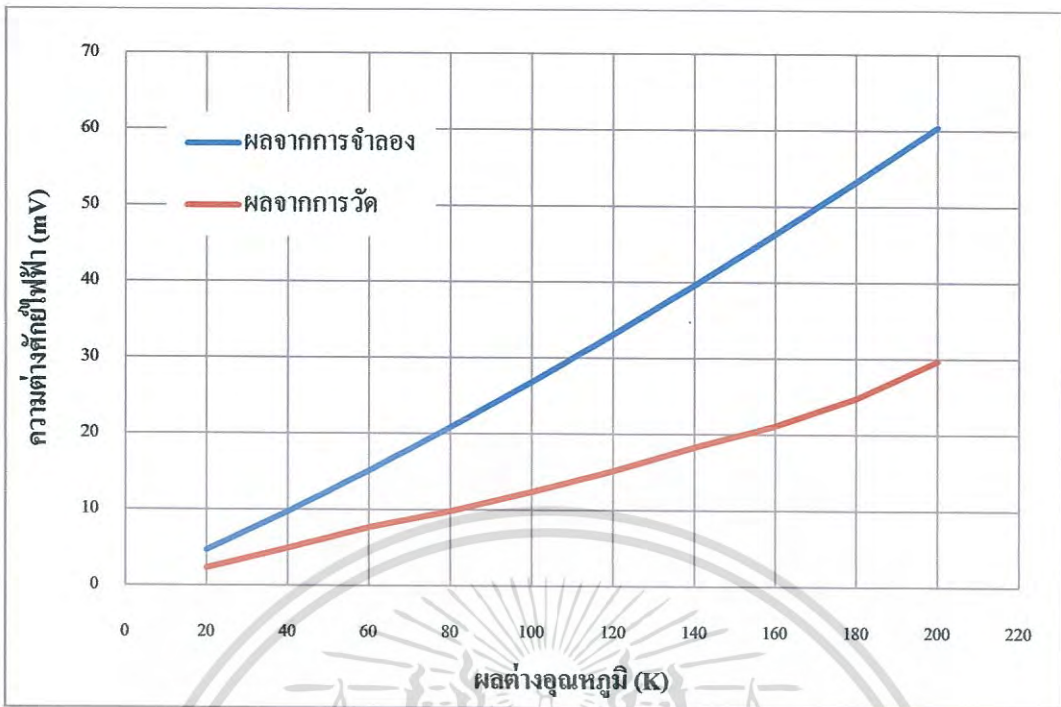
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจากการวัดค่าจากแบบจำลองของ โมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
20	4.6963	0.5027	0.0024
40	9.7647	1.0454	0.0102
60	15.1699	1.6243	0.0246
80	20.8820	2.2362	0.0467
100	26.8754	2.8783	0.0774
120	33.1313	3.5487	0.1176
140	39.6316	4.2453	0.1682
160	46.3614	4.9666	0.2303
180	53.3060	5.7110	0.3044
200	60.4584	6.4776	0.3916

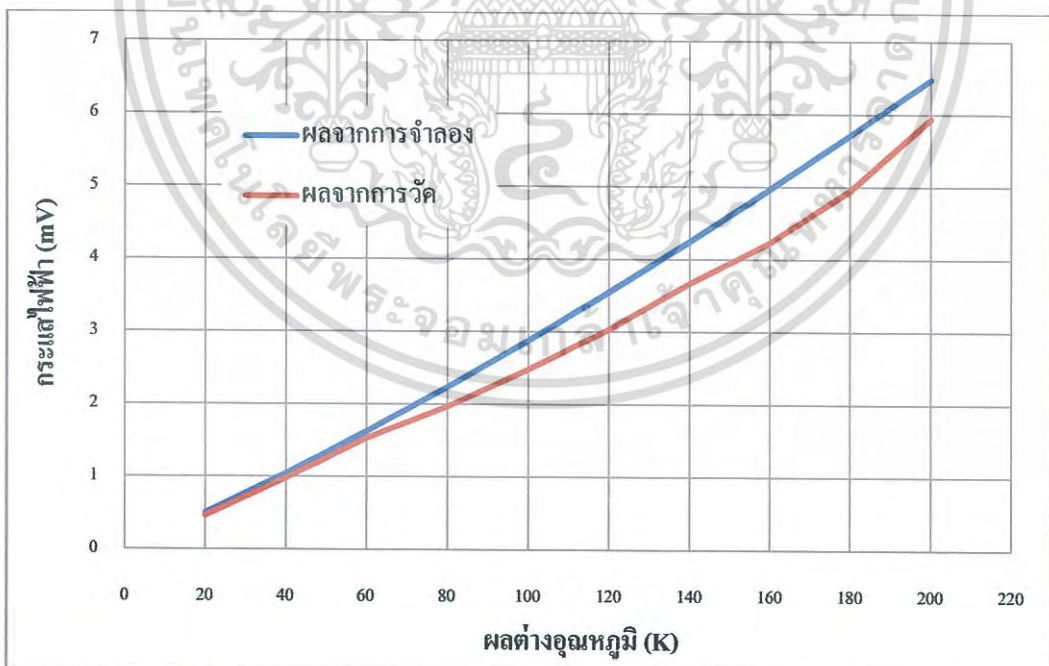
4.2.3 ผลเปรียบเทียบโมดูลจำนวน 2 ขา

เป็นการนำผลที่ได้จากการวัดจริงและผลการวัดค่าจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้ เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิตั้งแต่ 20 - 200 K แสดงผลทั้งสองส่วนได้ดังรูปที่ 4.3 – 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

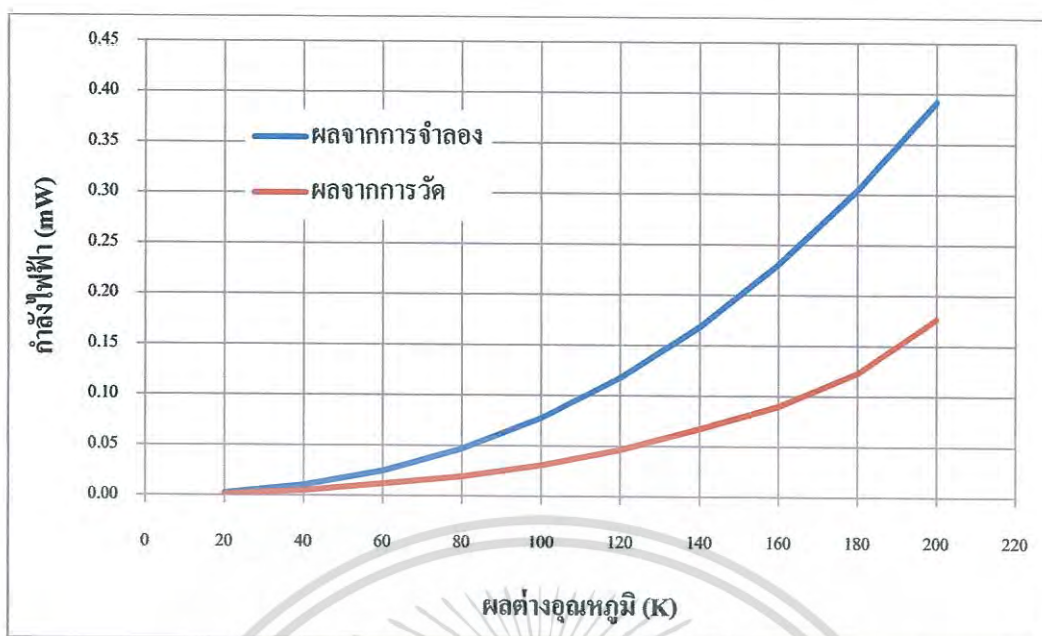


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2 ขา



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



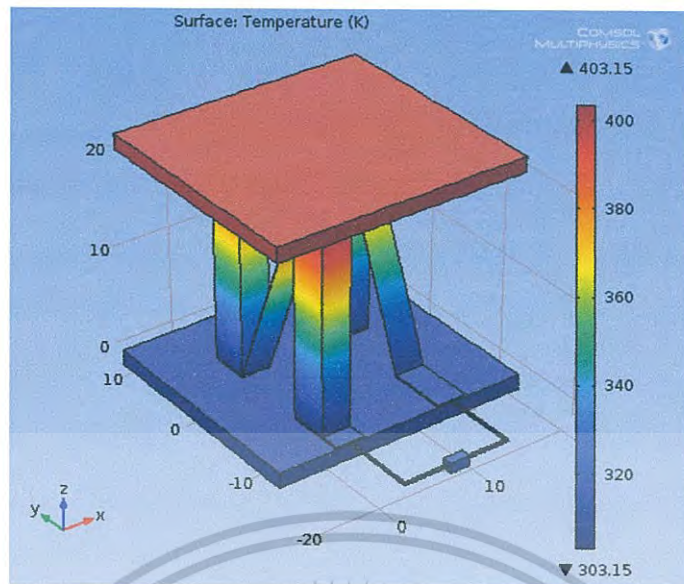
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการ
การจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2 ขา

4.3 ผลการจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดขาเดียวจำนวน 3 ขา

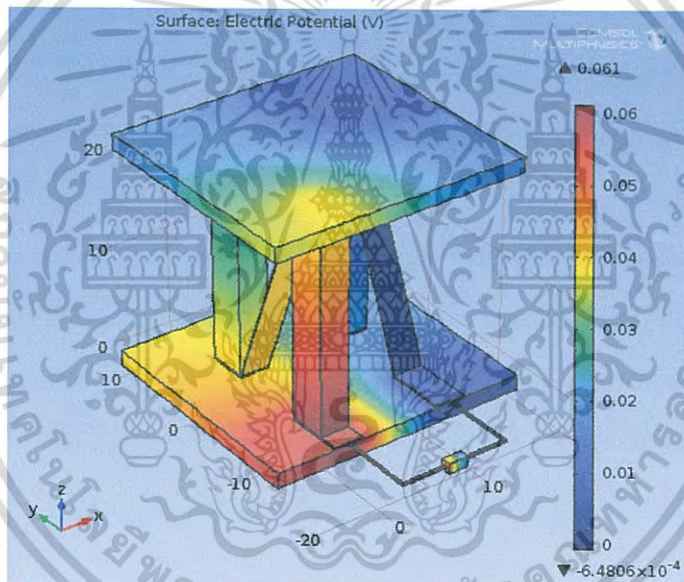
ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลที่ได้จากแบบจำลองโมดูลจำนวน 3 ขา เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดค่าจริง แล้วนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกันว่าเป็นอย่างไร ซึ่งผลที่ได้ในแต่ละส่วนแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลจากการจำลองโมดูลจำนวน 3 ขา

เมื่อดำเนินการตามหัวข้อที่ 3.4 เรียบร้อยแล้ว ในการศึกษาจะทำการทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิทำให้เกิดด้านร้อนกับด้านเย็นขึ้นที่โมดูล ทั้งนี้ให้ด้านเย็นอุณหภูมิคงที่ประมาณ 303 K และด้านร้อนเปลี่ยนแปลงไปจนถึง 440 K โดยทำการต่อโหลด 5 โอห์มเพื่อทำการวัดค่าความต่างศักย์และกระแสที่ออกมา ณ ผลต่างอุณหภูมิต่างๆรวมทั้งคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมา ทั้งนี้แสดงผลตัวอย่างเมื่อมีผลต่างอุณหภูมิ 100 K ที่ได้ออกมาดังรูปที่ 4.6 - 4.7



รูปที่ 4.6 แสดงผลการกระจายอุณหภูมิของ โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K



รูปที่ 4.7 แสดงผลการกระจายความต่างศักย์ของ โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K

4.3.2 ผลการวัดค่าจากแบบจำลองของโมดูลจำนวน 3 ขา

จากหัวข้อ 3.5 ที่ได้แสดงวิธีการหาความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ในส่วนนี้ได้กำหนดค่าผลต่างของอุณหภูมิในช่วงเดียวกับค่าที่ได้จากการวัด รวมถึงการจำลองค่าความต้านทานของโหลด 5 โอห์มที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 mm^2 และมีความยาว 2 mm ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.1 เพื่อนำค่าสภาพนำไฟฟ้าไปใส่ในแบบจำลองตัวต้านทาน โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ ใช้ตามตารางที่ 4.4 โดยผลที่ได้จากการจำลองแบบโมดูลจำนวน 3 ขา แสดงได้ดังตารางที่ 4.8

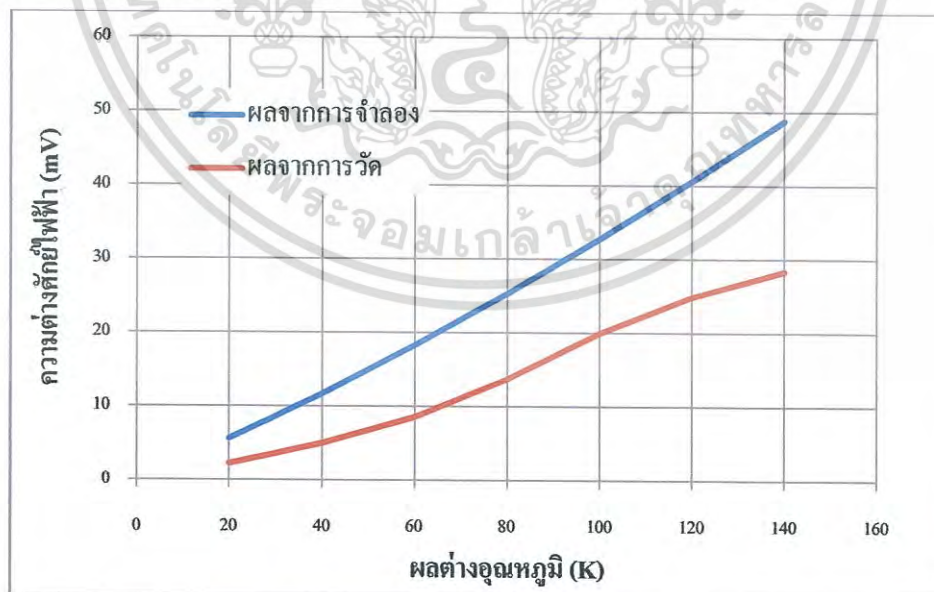
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจากการจำลองของโมดูล จำนวน 3 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
20	5.5919	0.6018	0.0034
40	11.7044	1.2597	0.0147
60	18.2941	1.9690	0.0360
80	25.3236	2.7256	0.0690
100	32.7602	3.5260	0.1155
120	40.5792	4.3675	0.1772
140	48.7565	5.2476	0.2559

4.3.3 ผลเปรียบเทียบโมดูลจำนวน 3 ขา

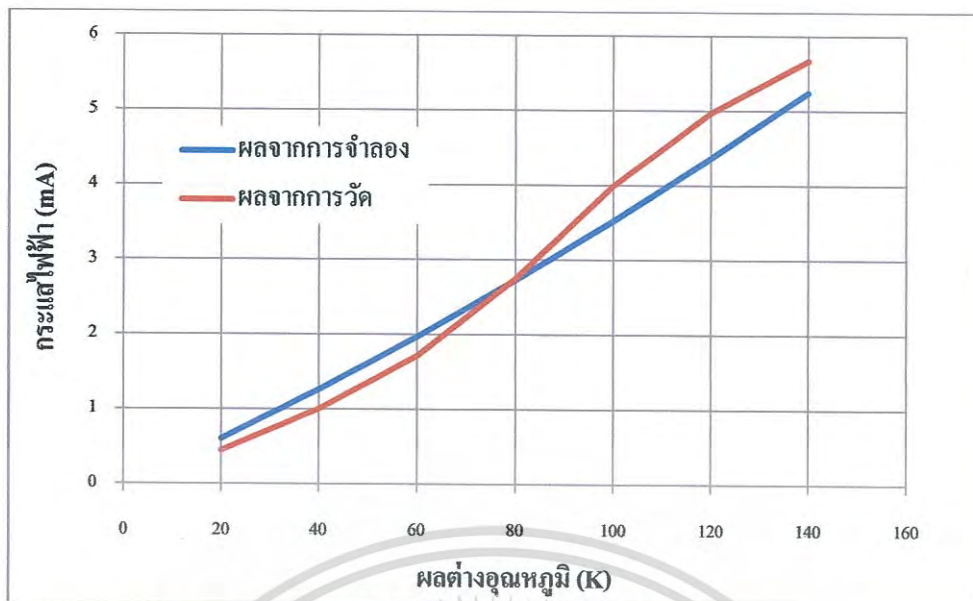
เป็นการนำผลที่ได้จากการวัดจริงและผลการวัดค่าจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้ เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิตั้งแต่ 20 - 140 K แสดงผลทั้งสองส่วนได้ดังรูปที่ 4.8 – 4.10



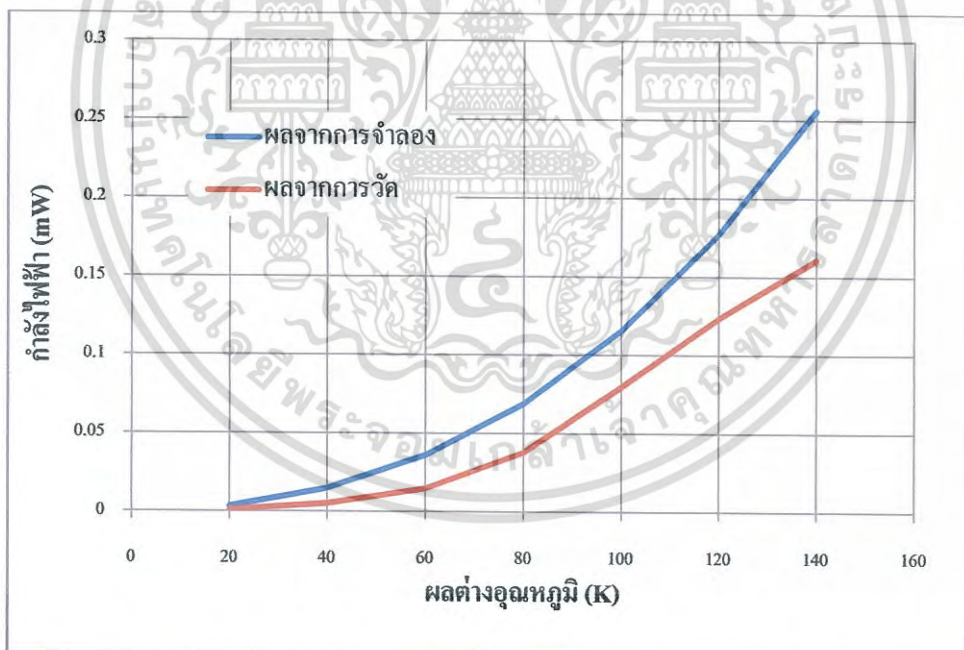
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจาก

การจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล 3 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 3 ขา



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลการวัดของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 3 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาความต้านทานภายในจากแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดขาเดียว

ในการศึกษาจะเป็นการเปลี่ยนค่าตัวต้านทานที่อยู่ภายนอกที่ค่าต่างๆ แล้วหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้คำนวณในการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ ความต้านทานภายนอกที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเท่ากับความต้านทานภายใน เราจะใช้ตัวต้านทานที่มีพื้นที่หน้าตัด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ยาว 2 mm การจำลองจะใช้ค่าผลต่างอุณหภูมิในช่วง $20\text{--}100 \text{ K}$ เพราะว่าจะมีผลที่ให้ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงดังที่แสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ค่าความต้านจะถูกกำหนดโดยการใส่ค่าสภาพนำไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.1 โดยแสดงผลของการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

4.4.1 ความต้านทานภายในของโมดูลจำนวน 2 ขา

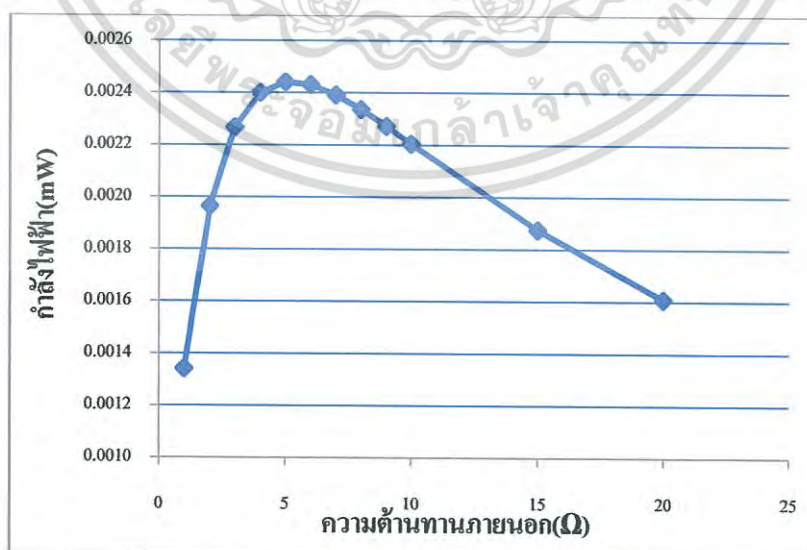
ในส่วนนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์กำลังไฟฟ้าที่ออกมาที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิ 20 K , 60 K และ 100 K โดยใช้ค่าคุณสมบัติของวัสดุตามตารางที่ 4.4 ซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่มีความต้านทานภายนอก $1\text{--}20 \Omega$ ต่อกับโมดูลจำนวน 2 ขาที่ค่าอุณหภูมิ 20 K , 60 K และ 100 K

ความต้านทานภายนอก (Ω)	$\Delta T = 20 \text{ K}$			$\Delta T = 60 \text{ K}$			$\Delta T = 100 \text{ K}$		
	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
1	1.57638	0.85088	0.00134	5.30011	2.86503	0.01518	9.73435	5.26097	0.05121
2	2.67706	0.73406	0.00197	8.87555	2.43556	0.02162	16.0876	4.41411	0.07101
3	3.51213	0.64548	0.00227	11.5192	2.11814	0.02440	20.6798	3.80225	0.07863
4	4.16741	0.57597	0.00240	13.5534	1.87393	0.02540	24.1541	3.33938	0.08066
5	4.69530	0.51998	0.00244	15.1670	1.68022	0.02548	26.8744	2.97699	0.08001

ความต้านทานภายนอก (Ω)	$\Delta T = 20 \text{ K}$			$\Delta T = 60 \text{ K}$			$\Delta T = 100 \text{ K}$		
	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
7	5.49335	0.43535	0.00239	17.5651	1.39235	0.02446	30.8599	2.44608	0.07549
8	5.80225	0.40259	0.00234	18.4802	1.28251	0.02370	32.3631	2.24585	0.07268
9	6.06795	0.37441	0.00227	19.2616	1.18871	0.02290	33.6390	2.0759	0.06983
10	6.29886	0.34992	0.00220	19.9364	1.10771	0.02208	34.7352	1.92988	0.06703
15	7.11208	0.26368	0.00188	22.2817	0.82618	0.01841	38.5053	1.42768	0.05497
20	7.60365	0.21154	0.00161	23.6764	0.65878	0.01560	40.7182	1.13291	0.04613

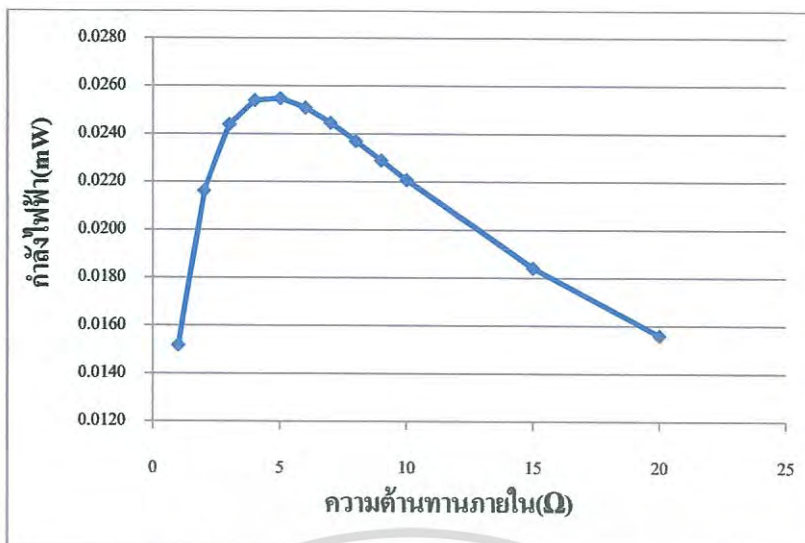
จากตารางที่ 4.7 จะพบว่าค่าความต้านทานภายนอกที่ให้กำลังไฟฟ้าออกมาสูงที่สุดที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K, 40 K และ 100 K คือ 5 Ω , 5 Ω และ 4 Ω ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K ที่ความต้านทาน 5 Ω และ 6 Ω จะมีค่ากำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกันมาก โดยสามารถแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆกับความต้านทานภายนอกดังรูปที่ 4.11 - 4.13



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K ของโมลด์

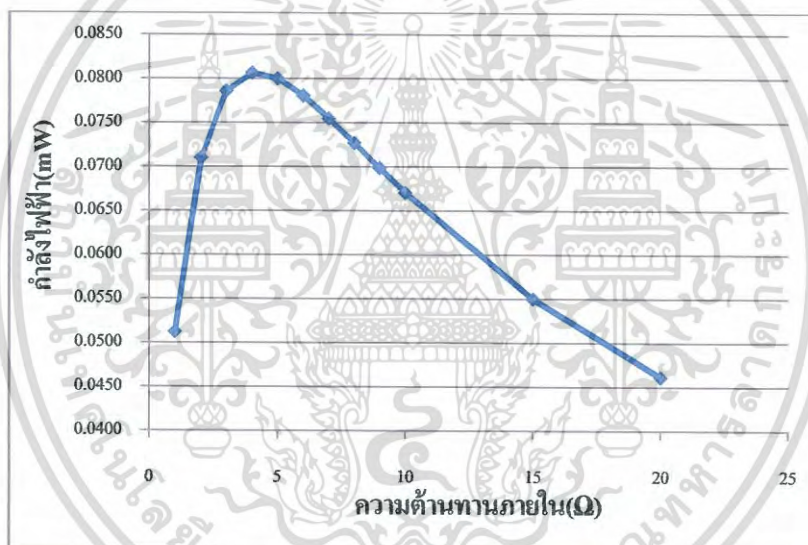
จำนวน 2 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K ของโมดูล

จำนวน 2 ขา



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K ของโมดูล

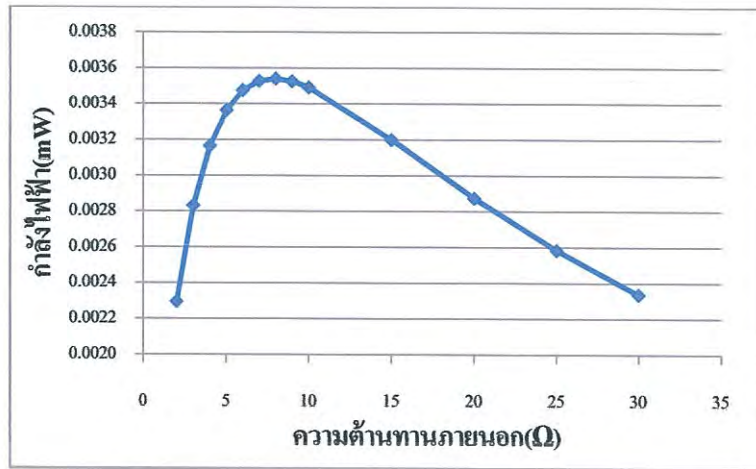
จำนวน 2 ขา

4.4.2 ความต้านทานภายในของโมดูลจำนวน 3 ขา

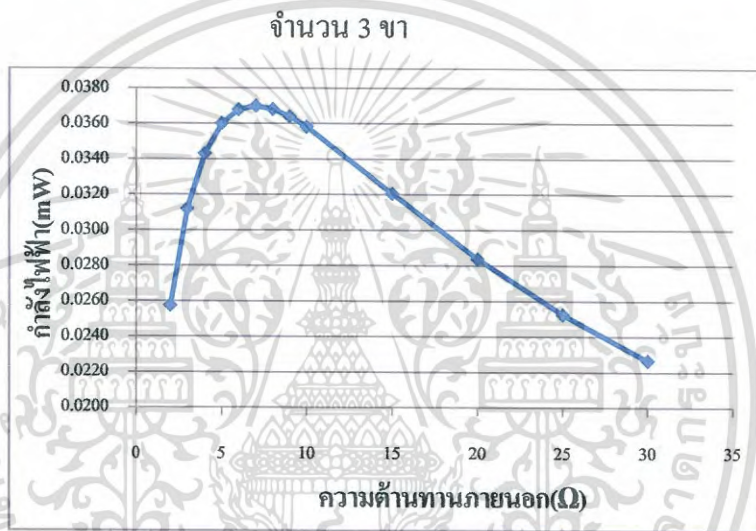
ในส่วนนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์กำลังไฟฟ้าที่ออกมาที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิและค่าคุณสมบัติวัสดุเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 ซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 4.8 ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่มีความต้านทานภายนอก 2-30 Ω ต่อกับโมดูลจำนวน 3 ขาที่ค่าอุณหภูมิ 20 K, 60 K และ 100 K

ความ ต้านทาน ภายนอก (Ω)	$\Delta T = 20$ K			$\Delta T = 60$ K			$\Delta T = 100$ K		
	ความต่าง ศักย์ ไฟฟ้า (mV)	กระแส ไฟฟ้า (mA)	กำลัง ไฟฟ้า (mW)	ความต่าง ศักย์ ไฟฟ้า (mV)	กระแส ไฟฟ้า (mA)	กำลัง ไฟฟ้า (mW)	ความต่าง ศักย์ ไฟฟ้า (mV)	กระแส ไฟฟ้า (mA)	กำลัง ไฟฟ้า (mW)
2	2.9293	0.78395	0.00230	9.8110	2.6256	0.02576	17.9340	4.7995	0.08607
3	3.9790	0.71215	0.00283	13.2032	2.3630	0.03120	23.9359	4.2839	0.10254
4	4.8527	0.65240	0.00317	15.9786	2.1482	0.03433	28.7737	3.8684	0.11131
5	5.5911	0.60191	0.00337	18.2915	1.9692	0.03602	32.7558	3.5263	0.11551
6	6.2234	0.55866	0.00348	20.2487	1.8177	0.03681	36.0912	3.2398	0.11693
7	6.7710	0.52122	0.00353	21.9262	1.6878	0.03701	38.9253	2.9964	0.11664
8	7.2497	0.48848	0.00354	23.3798	1.5753	0.03683	41.3630	2.7870	0.11528
9	7.6719	0.45961	0.00353	24.6520	1.4769	0.03641	43.4826	2.6050	0.11327
10	8.0469	0.43396	0.00349	25.7743	1.3900	0.03583	45.3420	2.4453	0.11087
15	9.4314	0.33929	0.00320	29.8561	1.0741	0.03207	52.0223	1.8715	0.09736
20	10.3198	0.27853	0.00287	32.4258	0.8752	0.02838	56.1630	1.5159	0.08513
25	10.9385	0.23623	0.00258	34.1925	0.73843	0.02525	58.9813	1.27378	0.07513
30	11.3938	0.20509	0.00234	35.4814	0.63866	0.02266	61.0230	1.09842	0.06703

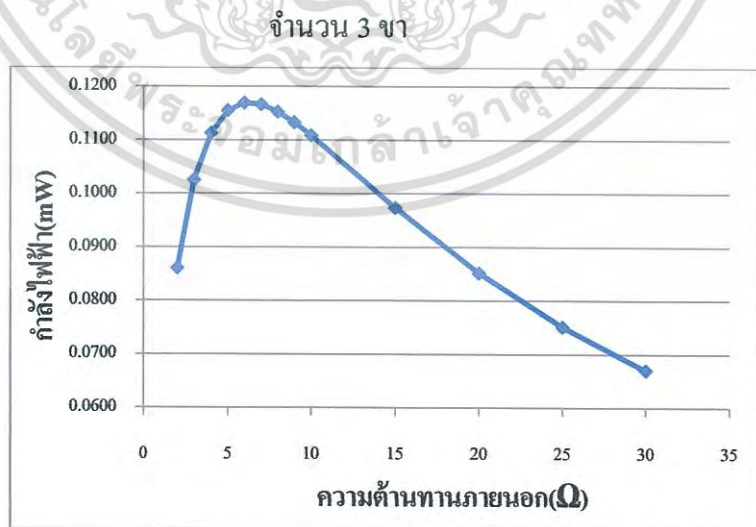
จากตารางที่ 4.8 จะพบว่าค่าความต้านทานภายนอกที่ให้กำลังไฟฟ้าออกมาสูงที่สุดที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K, 40 K และ 100 K คือ 8 Ω , 7 Ω และ 6 Ω ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K ที่ความต้านทาน 7 Ω , 8 Ω และ 9 Ω จะมีค่ากำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกันมาก โดยสามารถแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆกับความต้านทานภายนอกดังรูปที่ 4.14 - 4.16



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 20 K ของ โมดูล



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K ของ โมดูล



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความต้านทานภายนอกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิ 100 K ของ โมดูลจำนวน 3 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดขาเดียว

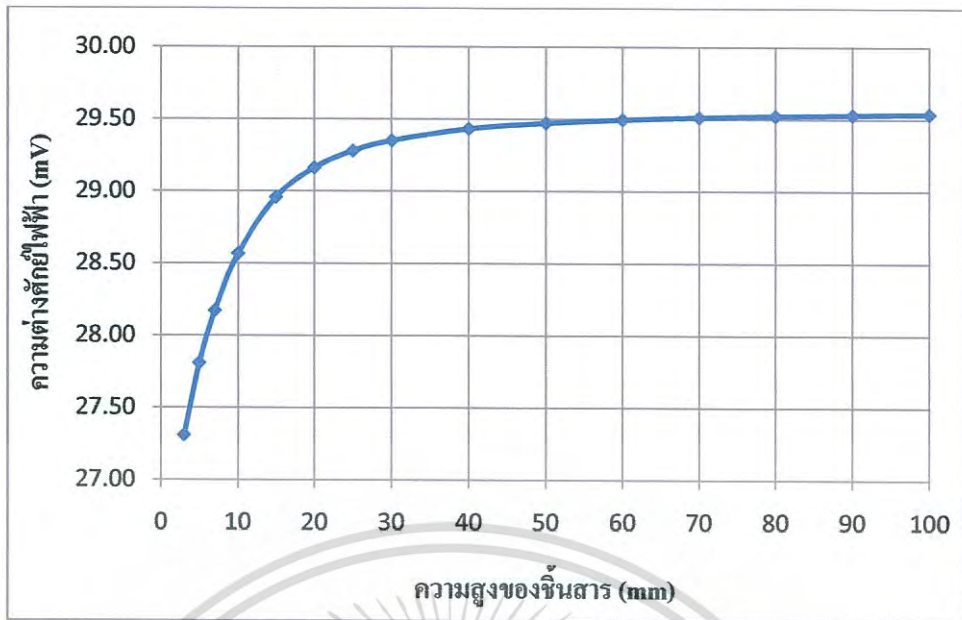
ในส่วนนี้จะทำการจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ค่าความสูงต่างๆของชั้นสาร เพื่อศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาในแต่ละความสูงในกรณีที่ไม่มีตัวต้านทาน ความต่างศักย์ที่ออกมาเรียกว่า “ความต่างศักย์ซีเบค” โดยทำการจำลองกับโมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความสูงของชั้นสารต่างๆ ของโมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K

ความสูงของชั้นสาร (mm)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)
3	27.31
5	27.81
7	28.17
10	28.57
15	28.96
20	29.16
25	29.28
30	29.35
40	29.43
50	29.47
60	29.50
70	29.51
80	29.52
90	29.53
100	29.54

จากการศึกษาการจำลองจะพบว่าที่ความสูง 3-30 mm ค่าความต่างศักย์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามความสูง แต่เมื่อเพิ่มความสูงที่มากกว่า 30 mm ไปจนถึง 100 mm แล้วจะมีค่าความต่างศักย์ออกมาคงที่ ดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความสูงของขั้วไฟฟ้า 3 – 100 mm ของโมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นการสรุปผลของแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาเดี่ยว(P-type) จำนวน 2 และ 3 ขาเปรียบเทียบกับแบบจริง อีกทั้งผลการจำลองค่าความต้านทานภายในและค่าความต่างศักย์ที่ออกมาเมื่อค่าความสูงของแบบจำลองเปลี่ยนไป ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงานประโยชน์ที่ได้รับ ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงการคำนวณเพื่อความถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) ผลการวัดค่าคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำชนิด P-type ($\text{CuCr}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{O}_2$) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพนำไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพนำความร้อนจากตารางที่ 4.1 - 4.3 มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองจากตารางที่ 4.4 มีค่าเพิ่มขึ้นตามเช่นกัน
- 2) จากผลในหัวข้อที่ 4.2.3 และ 4.3.3 ผลเปรียบเทียบที่ได้จากการวัดและการจำลองแสดงให้เห็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการจำลองในช่วงผลต่างอุณหภูมิที่ต่ำมีค่าใกล้เคียงกับการวัด แต่เมื่อผลต่างอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีค่าที่แตกต่างกันมากเพราะว่าการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคในแบบจำลองที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4.3 และ 4.8
- 3) จากผลในหัวข้อที่ 4.2.3 และ 4.3.3 ผลเปรียบเทียบที่ได้จากการวัดและการจำลองแสดงให้เห็นค่ากระแสไฟฟ้าจากการจำลองในแต่ละช่วงผลต่างอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกับการวัด ดังรูปที่ 4.4 และ 4.9
- 4) จากผลในหัวข้อที่ 4.2.3 และ 4.3.3 ผลเปรียบเทียบที่ได้จากการวัดและการจำลองแสดงให้เห็นค่ากำลังไฟฟ้าจากการจำลองในช่วงผลต่างอุณหภูมิ 20 – 100 K มีค่าใกล้เคียงกับการวัด แต่เมื่อผลต่างอุณหภูมิมากกว่า 100 K ค่าทั้งสองจะแตกต่างกันมากเพราะว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.5 และ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) จากผลในหัวข้อที่ 4.4 ผลจากแบบจำลองของค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาเดี่ยว(P-type) จำนวน 2 และ 3 ขาที่อุณหภูมิ 20 K, 60 K และ 100 K มีค่าลดลงเมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพราะว่าผลสรุปในข้อที่ 1) คือสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังรูปที่ 4.11 – 4.13 และ 4.14 – 4.16 เรายังพบว่าค่าความต้านทานภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนขาของโมดูลเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สร้างขึ้นต่อกันทางเซลล์ไฟฟ้าในลักษณะอนุกรม
- 6) จากผลในหัวข้อที่ 4.4 ผลค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความสูงของชั้นสารค่าต่างๆของแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 2 ขาที่ผลต่างอุณหภูมิ 60 K จะมีค่าคงที่ประมาณ 29.5 V เมื่อชั้นสารมีค่าความสูงที่มากกว่า 30 mm ดังรูปที่ 4.17

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหา

- 1) การกำหนดขนาด Mesh ที่ใช้ในการคำนวณค่าที่ค่าละเอียดมากๆ คอมพิวเตอร์ไม่สามารถรองรับการประมวลของโปรแกรมได้ จึงต้องทำการกำหนดขนาด Mesh ที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดการประมวลผลได้
- 2) เนื่องจากว่าโปรแกรมไม่มีการใส่ค่าความต้านทานแต่มีการใส่สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ จึงต้องใช้สมการที่ 3.1 ช่วยในการแก้ปัญหาแล้วทำการกำหนดขนาดของวัสดุ
- 3) เนื่องจากการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสในระบบที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากันของตัวต้านทานในแต่ละด้านมีค่าไม่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าในวงจรไม่เท่ากัน ซึ่งกระแสไฟฟ้าภายในวงจรทุกจุดต้องเท่ากัน เป็นผลมากจากการกำหนด Mesh ที่ใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการประมาณที่คาดเคลื่อนไปบ้างเล็กน้อย ดังนั้นเราจึงแก้ไขโดยเลือกใช้ด้านใดด้านหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดตัวต้านทาน

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) สามารถนำระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้วิเคราะห์ปัญหาอื่นๆได้
- 2) สามารถออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในรูปแบบต่างๆแล้วจำลองผลที่ได้ออกมา ก่อนที่จะลงมือสร้างขึ้นจริง ส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและดำเนินการได้อย่างรวดเร็วในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การดำเนินการวิจัยในอนาคต

- 1) สร้างแบบจำลองโมดูลโดยคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป
- 2) ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับรอยต่อของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในกรณีที่ค่าความต้านทานที่รอยต่อมีค่าไม่เท่ากับศูนย์
- 3) ศึกษาและสร้างแบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประเภทขาเดียว(P-type)ที่ต่อกันในลักษณะขนานว่าให้ผลเหมือนหรือแตกต่างกับการต่อในลักษณะอนุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

สมศรี จรุงเรือง. 2542. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ :
โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปราโมทย์ เศษอำไพ. 2542. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรง
พิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เฉลิมพล น้ำค้าง. 2553. คลื่นและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : พิมพ์ดี

J. Martin , Fraunhofer-IPM, Heidenhofstr. Multiphysics Simulation of Thermoelectric

Systems - Modeling of Peltier-Cooling and Thermoelectric Generation Freiburg,
Germany

[Online] Available : www.comsol.com

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
10.9932	1.2900	0.2580	0.0003
11.0443	1.2932	0.2586	0.0003
11.0771	1.2951	0.2590	0.0003
11.0915	1.2981	0.2596	0.0003
11.1207	1.3003	0.2601	0.0003
11.1352	1.3028	0.2606	0.0003
11.1571	1.3045	0.2609	0.0003
11.1863	1.3065	0.2613	0.0003
11.2045	1.3088	0.2618	0.0003
11.2228	1.3115	0.2623	0.0003
11.2409	1.3152	0.2630	0.0003
11.2921	1.3205	0.2641	0.0003
11.3613	1.3260	0.2652	0.0004
11.4196	1.3327	0.2665	0.0004
11.5143	1.3422	0.2684	0.0004
11.6201	1.3521	0.2704	0.0004
11.7253	1.3633	0.2727	0.0004
11.8449	1.3772	0.2754	0.0004
11.9863	1.3930	0.2786	0.0004
12.1349	1.4106	0.2821	0.0004
12.3197	1.4312	0.2862	0.0004
12.5191	1.4520	0.2904	0.0004
12.7109	1.4745	0.2949	0.0004
12.8992	1.4981	0.2996	0.0004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
13.1240	1.5235	0.3047	0.0005
13.3742	1.5513	0.3103	0.0005
13.6570	1.5807	0.3161	0.0005
13.9470	1.6122	0.3224	0.0005
14.2551	1.6465	0.3293	0.0005
14.5958	1.6813	0.3363	0.0006
14.9328	1.7171	0.3434	0.0006
15.2772	1.7550	0.3510	0.0006
15.6287	1.7921	0.3584	0.0006
15.9951	1.8325	0.3665	0.0007
16.3792	1.8750	0.3750	0.0007
16.7851	1.9178	0.3836	0.0007
17.1985	1.9636	0.3927	0.0008
17.6118	2.0086	0.4017	0.0008
18.0393	2.0553	0.4111	0.0008
18.4850	2.1043	0.4209	0.0009
18.9197	2.1524	0.4305	0.0009
19.3801	2.2037	0.4407	0.0010
19.8656	2.2549	0.4510	0.0010
20.3331	2.3102	0.4620	0.0011
20.8078	2.3662	0.4732	0.0011
21.2681	2.4188	0.4838	0.0012
21.7159	2.4736	0.4947	0.0012
22.1740	2.5280	0.5056	0.0013
22.6465	2.5847	0.5169	0.0013
23.1261	2.6439	0.5288	0.0014
23.6061	2.7012	0.5402	0.0015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
24.0966	2.7602	0.5520	0.0015
24.6053	2.8209	0.5642	0.0016
25.1246	2.8829	0.5766	0.0017
25.6183	2.9467	0.5893	0.0017
26.1485	3.0121	0.6024	0.0018
26.7110	3.0776	0.6155	0.0019
27.2846	3.1422	0.6284	0.0020
27.9160	3.2088	0.6418	0.0021
28.4859	3.2768	0.6554	0.0021
29.0450	3.3428	0.6686	0.0022
29.5858	3.4111	0.6822	0.0023
30.1050	3.4808	0.6962	0.0024
30.6023	3.5490	0.7098	0.0025
31.1140	3.6192	0.7238	0.0026
31.6344	3.6905	0.7381	0.0027
32.1759	3.7614	0.7523	0.0028
32.7103	3.8339	0.7668	0.0029
33.2449	3.9059	0.7812	0.0031
33.7867	3.9770	0.7954	0.0032
34.3176	4.0491	0.8098	0.0033
34.8305	4.1223	0.8245	0.0034
35.3293	4.1944	0.8389	0.0035
35.8202	4.2672	0.8534	0.0036
36.3440	4.3402	0.8680	0.0038
36.8856	4.4128	0.8826	0.0039
37.4237	4.4876	0.8975	0.0040
37.9473	4.5582	0.9116	0.0042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
38.4711	4.6302	0.9260	0.0043
38.9983	4.7045	0.9409	0.0044
39.4933	4.7759	0.9552	0.0046
39.9738	4.8491	0.9698	0.0047
40.4761	4.9208	0.9842	0.0048
40.9529	4.9927	0.9985	0.0050
41.3712	5.0674	1.0135	0.0051
41.8293	5.1372	1.0274	0.0053
42.3161	5.2080	1.0416	0.0054
42.8277	5.2802	1.0560	0.0056
43.3683	5.3536	1.0707	0.0057
43.8978	5.4244	1.0849	0.0059
44.4420	5.4955	1.0991	0.0060
44.8604	5.5668	1.1134	0.0062
45.2935	5.6372	1.1274	0.0064
45.8194	5.7070	1.1414	0.0065
46.3241	5.7809	1.1562	0.0067
46.8212	5.8553	1.1711	0.0069
47.3651	5.9321	1.1864	0.0070
47.9374	6.0083	1.2017	0.0072
48.5100	6.0871	1.2174	0.0074
49.0640	6.1693	1.2339	0.0076
49.6901	6.2558	1.2512	0.0078
50.4278	6.3428	1.2686	0.0080
51.2135	6.4379	1.2876	0.0083
52.0600	6.5392	1.3078	0.0086
52.8848	6.6443	1.3289	0.0088

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
53.7602	6.7533	1.3507	0.0091
54.7000	6.8684	1.3737	0.0094
55.6291	6.9892	1.3978	0.0098
56.5330	7.1179	1.4236	0.0101
57.5086	7.2439	1.4488	0.0105
58.5274	7.3770	1.4754	0.0109
59.5498	7.5125	1.5025	0.0113
60.6460	7.6532	1.5306	0.0117
61.8154	7.7993	1.5599	0.0122
63.0242	7.9502	1.5900	0.0126
64.1824	8.1044	1.6209	0.0131
65.3300	8.2666	1.6533	0.0137
66.4956	8.4253	1.6851	0.0142
67.7545	8.5916	1.7183	0.0148
69.1107	8.7588	1.7518	0.0153
70.7147	8.9315	1.7863	0.0160
72.5362	9.1058	1.8212	0.0166
74.3432	9.2802	1.8560	0.0172
76.1178	9.4616	1.8923	0.0179
77.7948	9.6471	1.9294	0.0186
79.4770	9.8282	1.9656	0.0193
81.1046	10.0155	2.0031	0.0201
82.7286	10.2041	2.0408	0.0208
84.2982	10.3974	2.0795	0.0216
85.8860	10.5903	2.1181	0.0224
87.5099	10.7852	2.1570	0.0233
89.1030	10.9826	2.1965	0.0241

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
90.6334	11.1827	2.2365	0.0250
92.2295	11.3748	2.2750	0.0259
93.8841	11.5780	2.3156	0.0268
95.5351	11.7811	2.3562	0.0278
97.0728	11.9860	2.3972	0.0287
98.5522	12.1894	2.4379	0.0297
100.0427	12.3921	2.4784	0.0307
101.5625	12.5984	2.5197	0.0317
103.0238	12.8064	2.5613	0.0328
104.4520	13.0054	2.6011	0.0338
105.8399	13.2086	2.6417	0.0349
107.2461	13.4109	2.6822	0.0360
108.6846	13.6107	2.7221	0.0371
110.1348	13.8105	2.7621	0.0381
111.5890	14.0076	2.8015	0.0392
113.0174	14.2034	2.8407	0.0403
114.4126	14.4035	2.8807	0.0415
115.7597	14.6018	2.9204	0.0426
117.0995	14.8026	2.9605	0.0438
118.3711	14.9931	2.9986	0.0450
119.7137	15.1801	3.0360	0.0461
121.1122	15.3738	3.0748	0.0473
122.4882	15.5635	3.1127	0.0484
123.8281	15.7554	3.1511	0.0496
125.0344	15.9414	3.1883	0.0508
126.2924	16.1294	3.2259	0.0520
127.5297	16.3480	3.2696	0.0535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
128.7761	16.5540	3.3108	0.0548
130.0035	16.7537	3.3507	0.0561
131.3094	16.9550	3.3910	0.0575
132.5222	17.1565	3.4313	0.0589
133.7763	17.3621	3.4724	0.0603
134.9897	17.5613	3.5123	0.0617
136.2587	17.7500	3.5500	0.0630
137.4517	17.9378	3.5876	0.0644
138.7570	18.1325	3.6265	0.0658
140.0668	18.3324	3.6665	0.0672
141.3683	18.5303	3.7061	0.0687
142.6812	18.7260	3.7452	0.0701
143.9711	18.9247	3.7849	0.0716
145.2428	19.1331	3.8266	0.0732
146.3419	19.3336	3.8667	0.0748
147.4891	19.5261	3.9052	0.0763
148.5994	19.7034	3.9407	0.0776
149.8286	19.8883	3.9777	0.0791
151.1748	20.0736	4.0147	0.0806
153.1821	20.2596	4.0519	0.0821
153.6851	20.4414	4.0883	0.0836
155.2565	20.6227	4.1245	0.0851
157.0103	20.8048	4.1610	0.0866
158.4847	21.0068	4.2014	0.0883
159.8283	21.1677	4.2335	0.0896
161.1123	21.3328	4.2666	0.0910
162.4370	21.5076	4.3015	0.0925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
163.9073	21.6795	4.3359	0.0940
165.3067	21.8580	4.3716	0.0956
166.6280	22.0305	4.4061	0.0971
167.8934	22.1908	4.4382	0.0985
168.9728	22.3534	4.4707	0.0999
169.7925	22.5415	4.5083	0.1016
171.0690	22.7417	4.5483	0.1034
172.0632	22.9416	4.5883	0.1053
173.1576	23.1320	4.6264	0.1070
174.1591	23.3201	4.6640	0.1088
174.9895	23.5133	4.7027	0.1106
175.9944	23.6955	4.7391	0.1123
176.6914	23.9161	4.7832	0.1144
177.6779	24.1337	4.8267	0.1165
178.6460	24.3382	4.8676	0.1185
179.6918	24.5618	4.9124	0.1207
180.7121	24.7594	4.9519	0.1226
181.7583	24.9544	4.9909	0.1245
182.8563	25.1559	5.0312	0.1266
183.6608	25.3535	5.0707	0.1286
184.3869	25.5469	5.1094	0.1305
185.3608	25.7399	5.1480	0.1325
186.0167	25.9319	5.1864	0.1345
186.7351	26.1202	5.2240	0.1365
187.6905	26.3032	5.2606	0.1384
188.4016	26.4826	5.2965	0.1403
189.3901	26.6760	5.3352	0.1423

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
190.0385	26.8644	5.3729	0.1443
190.5942	27.0517	5.4103	0.1464
191.0240	27.2342	5.4468	0.1483
191.4172	27.4166	5.4833	0.1503
192.2233	27.5920	5.5184	0.1523
192.7368	27.7662	5.5532	0.1542
193.3906	27.9343	5.5869	0.1561
194.0150	28.1060	5.6212	0.1580
194.6875	28.2710	5.6542	0.1598
195.3375	28.4376	5.6875	0.1617
196.0211	28.5992	5.7198	0.1636
196.5865	28.7642	5.7528	0.1655
197.0817	28.9296	5.7859	0.1674
197.6544	29.0908	5.8182	0.1693
198.2272	29.2472	5.8494	0.1711
198.9587	29.4033	5.8807	0.1729
199.7159	29.5526	5.9105	0.1747
200.3660	29.7038	5.9408	0.1765
201.0732	29.8536	5.9707	0.1782
201.6573	30.0070	6.0014	0.1801
202.1901	30.1714	6.0343	0.1821
202.6827	30.3155	6.0631	0.1838
203.0578	30.4494	6.0899	0.1854
203.4880	30.5868	6.1174	0.1871
203.8374	30.7173	6.1435	0.1887
204.1610	30.8538	6.1708	0.1904
204.4735	30.9837	6.1967	0.1920

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ โมดูลจำนวน 2 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 200 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
205.0028	31.1051	6.2210	0.1935
205.5724	31.2246	6.2449	0.1950
206.0578	31.3451	6.2690	0.1965
206.4991	31.4607	6.2921	0.1980
206.9588	31.5759	6.3152	0.1994
207.3267	31.6851	6.3370	0.2008
207.5774	31.7942	6.3588	0.2022
207.7841	31.9038	6.3808	0.2036
207.8217	32.0046	6.4009	0.2049
207.9990	32.1085	6.4217	0.2062
208.1577	32.2119	6.4424	0.2075
208.3092	32.3169	6.4634	0.2089
208.4276	32.4152	6.4830	0.2101
208.5497	32.5135	6.5027	0.2114
208.6680	32.6065	6.5213	0.2126
208.7238	32.6950	6.5390	0.2138
208.9804	32.7840	6.5568	0.2150
209.2403	32.8738	6.5748	0.2161
209.4235	33.0082	6.6016	0.2179
209.2997	33.1902	6.6380	0.2203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 140 K

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
8.2513	1.1393	0.2279	0.0003
8.3717	1.1460	0.2292	0.0003
8.4991	1.1562	0.2312	0.0003
8.6521	1.1645	0.2329	0.0003
8.8380	1.1771	0.2354	0.0003
9.0347	1.1891	0.2378	0.0003
9.2570	1.2042	0.2408	0.0003
9.4828	1.2212	0.2442	0.0003
9.7452	1.2398	0.2480	0.0003
10.0000	1.2601	0.2520	0.0003
10.2914	1.2831	0.2566	0.0003
10.6266	1.3063	0.2613	0.0003
10.9725	1.3338	0.2668	0.0004
11.3587	1.3621	0.2724	0.0004
11.7668	1.3928	0.2786	0.0004
12.1982	1.4270	0.2854	0.0004
12.6221	1.4627	0.2925	0.0004
13.0898	1.5026	0.3005	0.0005
13.5353	1.5456	0.3091	0.0005
14.0320	1.5880	0.3176	0.0005
14.5466	1.6349	0.3270	0.0005
15.0868	1.6813	0.3363	0.0006
15.6197	1.7320	0.3464	0.0006
16.1705	1.7845	0.3569	0.0006
16.7504	1.8412	0.3682	0.0007
17.3230	1.8993	0.3799	0.0007
17.9173	1.9604	0.3921	0.0008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 140 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
18.4719	2.0214	0.4043	0.0008
19.0445	2.0879	0.4176	0.0009
19.6533	2.1559	0.4312	0.0009
20.2656	2.2268	0.4454	0.0010
20.8673	2.2969	0.4594	0.0011
21.5159	2.3715	0.4743	0.0011
22.1324	2.4473	0.4895	0.0012
22.7522	2.5271	0.5054	0.0013
23.3976	2.6044	0.5209	0.0014
23.9994	2.6863	0.5373	0.0014
24.6267	2.7704	0.5541	0.0015
25.2687	2.8538	0.5708	0.0016
25.9174	2.9390	0.5878	0.0017
26.5772	3.0275	0.6055	0.0018
27.2225	3.1190	0.6238	0.0019
27.8825	3.2135	0.6427	0.0021
28.5528	3.3060	0.6612	0.0022
29.2484	3.4035	0.6807	0.0023
29.9260	3.5017	0.7003	0.0025
30.6108	3.6009	0.7202	0.0026
31.3229	3.7009	0.7402	0.0027
32.0259	3.8047	0.7609	0.0029
32.7285	3.9120	0.7824	0.0031
33.4709	4.0210	0.8042	0.0032
34.2309	4.1338	0.8268	0.0034
35.0199	4.2486	0.8497	0.0036
35.8627	4.3669	0.8734	0.0038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 140 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
36.7377	4.4880	0.8976	0.0040
37.6307	4.6139	0.9228	0.0043
38.5523	4.7423	0.9485	0.0045
39.5316	4.8749	0.9750	0.0048
40.4242	5.0086	1.0017	0.0050
41.3656	5.1464	1.0293	0.0053
42.2562	5.2902	1.0580	0.0056
43.1430	5.4366	1.0873	0.0059
44.1014	5.5880	1.1176	0.0062
45.0630	5.7433	1.1487	0.0066
46.0107	5.9023	1.1805	0.0070
46.9620	6.0665	1.2133	0.0074
47.9347	6.2327	1.2465	0.0078
48.9397	6.3974	1.2795	0.0082
49.9054	6.5679	1.3136	0.0086
50.9997	6.7442	1.3488	0.0091
52.0545	6.9248	1.3850	0.0096
53.0122	7.1108	1.4222	0.0101
53.9412	7.3033	1.4607	0.0107
54.9635	7.5020	1.5004	0.0113
56.0541	7.7063	1.5413	0.0119
57.1553	7.9088	1.5818	0.0125
58.2457	8.1210	1.6242	0.0132
59.3291	8.3398	1.6680	0.0139
60.4152	8.5657	1.7131	0.0147
61.4219	8.7983	1.7597	0.0155
62.4395	9.0378	1.8076	0.0163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 140 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
63.5077	9.2848	1.8570	0.0172
64.5614	9.5412	1.9082	0.0182
65.6006	9.7896	1.9579	0.0192
66.6903	10.0501	2.0100	0.0202
67.7763	10.3141	2.0628	0.0213
68.8663	10.5809	2.1162	0.0224
70.0599	10.8476	2.1695	0.0235
71.2857	11.1218	2.2244	0.0247
72.4069	11.4033	2.2807	0.0260
73.3909	11.6933	2.3387	0.0273
74.3390	11.9715	2.3943	0.0287
75.3557	12.2606	2.4521	0.0301
76.3288	12.5532	2.5106	0.0315
77.3671	12.8460	2.5692	0.0330
78.4625	13.1437	2.6287	0.0346
79.5969	13.4421	2.6884	0.0361
80.7095	13.7426	2.7485	0.0378
81.7497	14.0543	2.8109	0.0395
82.7099	14.3486	2.8697	0.0412
83.7065	14.6499	2.9300	0.0429
84.8189	14.9519	2.9904	0.0447
85.7972	15.2555	3.0511	0.0465
86.6306	15.5584	3.1117	0.0484
87.5080	15.8595	3.1719	0.0503
88.5017	16.1609	3.2322	0.0522
89.7146	16.4707	3.2941	0.0543
90.7557	16.7624	3.3525	0.0562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 140 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
91.6326	17.0605	3.4121	0.0582
92.5495	17.3582	3.4716	0.0603
93.5140	17.6513	3.5303	0.0623
94.6099	17.9458	3.5892	0.0644
95.5671	18.2373	3.6475	0.0665
96.3793	18.5252	3.7050	0.0686
97.1012	18.8213	3.7643	0.0708
97.9035	19.0997	3.8199	0.0730
98.7205	19.3845	3.8769	0.0752
99.5340	19.6663	3.9333	0.0774
100.3986	19.9483	3.9897	0.0796
101.2193	20.2274	4.0455	0.0818
102.0840	20.5024	4.1005	0.0841
102.9925	20.7795	4.1559	0.0864
103.9890	21.0549	4.2110	0.0887
104.9105	21.3171	4.2634	0.0909
105.8883	21.5873	4.3175	0.0932
106.8438	21.8522	4.3704	0.0955
107.7810	22.1157	4.4231	0.0978
108.8180	22.3808	4.4762	0.1002
109.7959	22.6410	4.5282	0.1025
110.7145	22.8973	4.5795	0.1049
111.5927	23.1559	4.6312	0.1072
112.6371	23.4003	4.6801	0.1095
113.7078	23.6476	4.7295	0.1118
115.0367	23.8954	4.7791	0.1142
116.6398	24.1412	4.8282	0.1166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 140 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
118.3024	24.3855	4.8771	0.1189
119.6095	24.6245	4.9249	0.1213
120.9313	24.8612	4.9722	0.1236
122.2458	25.0951	5.0190	0.1260
123.6399	25.3152	5.0630	0.1282
125.1691	25.5373	5.1075	0.1304
126.2716	25.7557	5.1511	0.1327
127.3103	25.9680	5.1936	0.1349
128.2788	26.1736	5.2347	0.1370
129.2324	26.3786	5.2757	0.1392
129.9447	26.5794	5.3159	0.1413
130.7309	26.7935	5.3587	0.1436
131.6505	26.9950	5.3990	0.1457
132.4614	27.1855	5.4371	0.1478
133.2784	27.4279	5.4856	0.1505
134.3716	27.6756	5.5351	0.1532
135.4542	27.9139	5.5828	0.1558
136.5292	28.1470	5.6294	0.1585
137.3425	28.3529	5.6706	0.1608
118.3024	24.3855	4.8771	0.1189
119.6095	24.6245	4.9249	0.1213
120.9313	24.8612	4.9722	0.1236
122.2458	25.0951	5.0190	0.1260
123.6399	25.3152	5.0630	0.1282
125.1691	25.5373	5.1075	0.1304
126.2716	25.7557	5.1511	0.1327
127.3103	25.9680	5.1936	0.1349

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าจริงของ
โมดูลจำนวน 3 ขา ที่ผลต่างอุณหภูมิประมาณ 10 – 140 K (ต่อ)

ผลต่างอุณหภูมิ (K)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
128.2788	26.1736	5.2347	0.1370
129.2324	26.3786	5.2757	0.1392
129.9447	26.5794	5.3159	0.1413
130.7309	26.7935	5.3587	0.1436
131.6505	26.9950	5.3990	0.1457
132.4614	27.1855	5.4371	0.1478
133.2784	27.4279	5.4856	0.1505
134.3716	27.6756	5.5351	0.1532
135.4542	27.9139	5.5828	0.1558
136.5292	28.1470	5.6294	0.1585
137.3425	28.3529	5.6706	0.1608
128.2788	26.1736	5.2347	0.1370
129.2324	26.3786	5.2757	0.1392
129.9447	26.5794	5.3159	0.1413
130.7309	26.7935	5.3587	0.1436
131.6505	26.9950	5.3990	0.1457
132.4614	27.1855	5.4371	0.1478
133.2784	27.4279	5.4856	0.1505
134.3716	27.6756	5.5351	0.1532
135.4542	27.9139	5.5828	0.1558
136.5292	28.1470	5.6294	0.1585
137.3425	28.3529	5.6706	0.1608

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้