

การพัฒนาต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน  
DEVELOPMENT PROTOTYPE OF THERMOELECTRIC  
GENERATOR FROM HOT SPRING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การพัฒนาต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน  
DEVELOPMENT PROTOTYPE OF THERMOELECTRIC  
GENERATOR FROM HOT SPRING



b.00265967  
i.....

TB00247

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2558

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DEVELOPMENT PROTOTYPE OF THERMOELECTRIC GENERATOR FROM HOT SPRING



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การพัฒนาต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน  
Development Prototype of Thermoelectric Generator  
from Hot Spring

ชื่อนักศึกษา

นายชาคริต ปัตตาเวีย รหัสนักศึกษา 55051482

นายวโรดม อรชุนะกะ รหัสนักศึกษา 55051606

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แฉ่งตั้ง กรรมการ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิราวัฒน์ กรรมการ	
ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน
ชื่อนักศึกษา	นายชาคริต บัตตาเวีย รหัสนักศึกษา 55051482 นายวโรดม อรชุนะกะ รหัสนักศึกษา 55051606
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกของมนุษยชาติในการสรรหาพลังงานไฟฟ้าสำหรับบริโภคในยามที่เข้าสู่ต้นยุควิกฤตขาดแคลนพลังงาน โดยการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าในรูปแบบใหม่ที่ยึดเอาหลักการเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้นั้นคือ ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน เริ่มตั้งแต่การสังเคราะห์สารเทอร์โมอิเล็กทริกและสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจากสารประกอบ  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$  จำนวน 10 ตัวแล้วนำมาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มกำลังทางไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันทำการออกแบบต้นแบบและระบบการส่งถ่ายความร้อนจากน้ำพุร้อน เมื่อการออกแบบเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์และคัดสรรวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างต้นแบบ เมื่อสร้างต้นแบบเสร็จสมบูรณ์ หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของต้นแบบ ปรากฏว่าต้นแบบนี้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 26.2570 นาโนวัตต์ (nW) ณ ผลต่างอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียสและความต้านทานภายในของต้นแบบมีค่า 26.6500 กิโลโอห์ม (k $\Omega$ )

ด้วยเหตุดังกล่าวต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนด้วยสารประกอบ  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$  มีความน่าสนใจมากเนื่องจากน้ำพุร้อนในประเทศไทยมีอยู่หลายแห่ง และสารประกอบ  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$  มีราคาไม่สูงนัก

**คำสำคัญ :** ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน เทอร์โมอิเล็กทริก

<b>Title</b>	Development Prototype of Thermoelectric Generator from Hot Spring	
<b>Students</b>	Mr.Chakrit Pattawia	Student ID 55051482
	Mr.Warodom Orachunaka	Student ID 55051606
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)	
<b>Department</b>	Physics	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL)	
<b>Academic Year</b>	2015	
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Chesta Rattanapun	

### Abstract

This special project is an alternative energy's choice for everybody in the earth. In the present, age of lacked energy and energy's crisis. Method for this problem of this special is thermoelectric generator. Thermoelectric's principle is applied to generate electric energy from hot spring. The prototype of thermoelectric generator from hot spring is special project's product that we very proud to present it. The first step is synthesis  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$  compound and making 10 thermoelectric modules from it that every module is connected by series circuit. The second step is design thermoelectric generator from hot spring's prototype and system of heat transfer by hot spring. The next step, analyze and selection the best materials for this prototype. When the prototype is complete after that we need to know about electrical characteristic of the prototype so we have the experiments. The results of experiments tell us that this prototype can generate electrical power 26.2570 nanoWatts (nW) at different of temperature is 62 Celsius degree and it has internal resistance equal 26.6500 kiloOhm ( $k\Omega$ ).

Finally, the prototype of thermoelectric generator from hot spring is very interesting because Thailand has many hot springs and cost of  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$  compound isn't expensive.

**Keywords :** alternative energy , thermoelectric , thermoelectric generator

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีเนื่องจากการช่วยเหลือจากอัลลอฮ์พระผู้เป็นพระเจ้าแห่งสากลโลกซึ่งไม่มีผู้ใดเสมอเหมือน ผู้ทรงกรุณาปราณีผู้ทรงเมตตาเสมอ เนื่องด้วยพระประสงค์ของพระองค์ที่ทำให้ข้าพเจ้าพบกับ ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ผู้ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณต่อความเมตตาจากอัลลอฮ์อย่างสุดซึ่งสำหรับการทำงานนี้ที่สำเร็จไปได้ด้วยดีทำให้เกิดความสะดวกรวดง่ายในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการทำงานนี้จะถูกตอบรับจากพระองค์ และขออภัยโทษต่อความผิดบาปและความบกพร่องทั้งหลายสำหรับการทำงานต่างๆ

ขอขอบคุณ ศาสนทูตมุฮัมมัด (ขอความสันติจงมีแด่ท่าน) ศาสนทูตตัวอย่างที่ได้ให้คำสอนและบทเรียนไว้แก่ประชาชาติของท่าน ยามที่ท้อแท้หรืออ่อนไหวคำสอนและบทเรียนของท่านทำให้กลับมามีกำลังใจและความสุขในการทำงานครั้งแล้วครั้งเล่า

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ที่เปิดโอกาสได้ใช้ความคิดอย่างอิสระในการทำงานและเป็นผู้ชี้แนะให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ครอบครัวที่ให้การศึกษาคความอบอุ่น ความรัก ความเข้าใจ และคอยให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องที่อยู่ร่วมกันในการทำงานทำให้เกิดความสร้างสรรค์และมิตรภาพแน่นแฟ้น

ชาคริต ปัตตาเวีย  
วโรดม อรชุนะกะ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก	3
2.2 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมอิเล็กทริก	3
2.2.1 ปракฏการณ์ซีเบค	3
2.2.2 ปракฏการณ์เพลเทียร์	5
2.3 การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยปฏิกิริยาของแข็ง	6
2.4 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก	6
2.5 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมอิเล็กทริก	6
2.5.1 สภาพนำความร้อน	6
2.5.2 สภาพนำไฟฟ้า	7
2.6 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	7
2.7 น้ำพุร้อน	8
2.7.1 ต้นกำเนิดของน้ำพุร้อน	8
2.7.2 การใช้ประโยชน์จากน้ำพุร้อนในการผลิตไฟฟ้า	8
2.8 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า	9
2.9 กฎการนำของฟูริเยร์	10
2.10 กฎการเย็นตัวของนิวตัน	11
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.11.1 ผลงานของSasaki	11
2.11.2 ผลงานของLiu	12
2.11.3 ผลงานของBonin	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1 อุปกรณ์การดำเนินงานวิจัย	13
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$	18
3.2.1 การตวงสาร	19
3.2.2 การผสมสารด้วยเครื่องBall mill	19
3.2.3 การเผาสาร	19
3.2.4 การอัดสารเทอร์โมอิเล็กทริก	20
3.2.5 การเผาแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก	20
3.3 การออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	20
3.3.1 การออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	20
3.3.2 การออกแบบต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	21
3.4 ขั้นตอนการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกดูล	23
3.4.1 นำแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริกพันด้วยเทปพอยล์	23
3.4.2 ประกอบเข้ากับขั้วโลหะเพื่อทำเป็นโมดูล	24
3.4.3 นำโมดูลไปเผาเชื่อมขั้วที่อุณหภูมิ1,010องศาเซลเซียส	24
3.4.4 นำโมดูลไปขัดผิวหน้าของขั้ว	24
3.5 ขั้นตอนการสร้างต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	26
3.5.1 ขั้นตอนการต่ออนุกรมของโมดูล	27
3.5.2 ขั้นตอนการประกอบโมดูลกับรางน้ำ	27
3.6 วิธีการทดลอง	28
3.6.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน และผลต่างอุณหภูมิ	28
3.6.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของต้นแบบและค่าความต้านทานโหลด ณ ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ	29
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>32</b>
4.1 ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	32
4.2 การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน และผลต่างอุณหภูมิ	33
4.3 การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของต้นแบบและค่าความต้านทานโหลด ณ ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ	34
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>37</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	37
5.1.1 ผลการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้า	37
5.1.2 กำลังไฟฟ้า	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37

## สารบัญ(ต่อ)

เอกสารอ้างอิง  
ภาคผนวก

หน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	2
2.1 แหล่งน้ำพุร้อนภายในประเทศไทย (บางส่วน)	8
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง $R_{in}$ กับ $\Delta T$	33
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง $R_L$ กับ $P_{out1}$ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (น้ำร้อน 60 องศาเซลเซียส และ น้ำอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส)	34
4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง $R_L$ กับ $P_{out2}$ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (น้ำร้อน 70 องศาเซลเซียส และ น้ำอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส)	35
4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง $R_L$ กับ $P_{out3}$ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส (น้ำร้อน 80 องศาเซลเซียส และ น้ำอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส)	35
4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง $R_L$ กับ $P_{out4}$ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส (น้ำร้อน 90 องศาเซลเซียส และ น้ำอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส)	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Thomas Seebeck	4
2.2 Seebeck effect	4
2.3 Jean Charles Athanase Peltier	5
2.4 Peltier effect	5
2.5 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	7
2.6 การเกิดน้ำพุร้อน	8
2.7 โรงไฟฟ้าสาธิต 300kW น้ำพุร้อนฝาง จ.เชียงใหม่	9
2.8 แบบจำลองอัตราการถ่ายโอนความร้อนของการนำ	10
3.1 อุปกรณ์การดำเนินงานวิจัย	17
3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$	18
3.3 แห่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก	20
3.4 แบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	21
3.5 แบบจำลองต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	21
3.6 แบบจำลองต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	22
3.7 แบบจำลองต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	22
3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	23
3.9 (ก) เทอร์โมอิเล็กทริก	23
(ข) กรรไกรและเทปพอยล์	23
(ค) เทอร์โมอิเล็กทริกที่พื้นเทปพอยล์แล้ว	23
3.10 โมดูล	24
3.11 (ก) ขณะขัดที่ผิวขั้ว	24
(ข) โมดูลที่ขัดผิวแล้วพร้อมใช้งาน	25
3.12 แผนผังการการสร้างต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน	26
3.13 (ก) ภาพเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่ออนุกรมกัน 10 ตัว	27
(ข) แผนภาพวงจรเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่ออนุกรมกัน 10 ตัว	27
3.14 (ก) กาวฉนวน Epoputty	28
(ข) รางน้ำอลูมิเนียม	28
(ค) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่ออนุกรม 10 ตัว	28
(ง) รางน้ำประกอบกับโมดูลเสร็จสมบูรณ์	28
3.15 (ก) วงจรสำหรับวัดค่ากระแสปิดวงจร	29
(ข) วงจรสำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร	29
3.16 (ก) แผนภาพระบบของการทดลอง	30
(ข) วงจรสำหรับทดลองตอนที่ 2	30
3.17 (ก) ชุดอุปกรณ์การทดลอง	31
(ข) ระบบจำลองการไหลเวียนของน้ำ	31

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 (ค) กล้องสวิตช์ปรับเปลี่ยนค่าการวัด	31
(ง) ชุดอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าตอนที่ 1	31
(จ) ชุดอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าตอนที่ 2	31
4.1 (ก) แบบจำลองต้นแบบ	32
(ข) ต้นแบบที่สร้าง	32
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านภายในกับผลต่างของอุณหภูมิ	33
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโหลดค่าต่างๆกับกำลังไฟฟ้าของต้นแบบที่ผลต่างของอุณหภูมิ 32, 42, 52 และ 90 องศาเซลเซียส	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$I_o$	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
$I_{sc}$	กระแสไฟฟ้าวงจรถัด
$P_o$	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต
$R_{in}$	ความต้านทานภายใน
$R_L$	ความต้านทานโหลด
TEG	Thermoelectric Generator
$V_o$	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
$V_{oc}$	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในโลกยุคปัจจุบันนี้ นับว่าเป็นยุคที่มีกำลังการบริโภคและความต้องการด้านพลังงานสูง อันเนื่องมาจากผู้คนมีวิถีชีวิตที่ต้องพึ่งพาอาศัยพลังงานเป็นอย่างมากอาทิเช่น การสื่อสาร, การเดินทาง, การทำกิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวัน และการทำอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นพลังงานจึงกลายเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิต เมื่อความต้องการด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น แต่พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านพลังงานมากมายเช่น ราคาปรับตัวสูงขึ้น และความไม่เพียงพอทางด้านพลังงาน ฯลฯ ด้วยเหตุนี้การค้นหาวិธีการแก้ไขปัญหาด้านพลังงานจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และมีประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตของผู้คนและประเทศชาติอีกด้วย โดยวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวนั้นควรคำนึงถึง ต้นทุน ทรัพยากร เสถียรภาพและความยั่งยืน ซึ่งทรัพยากรในธรรมชาติที่มีปริมาณมากแต่ถูกมองข้ามนั้นคือแหล่งความร้อนจากธรรมชาติอาทิเช่น ความร้อนใต้พิภพ, น้ำพุร้อน และความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น ดังนั้นพลังงานความร้อนจากธรรมชาติจึงตอบโจทย์ดังกล่าวได้อย่างดีเยี่ยม แม้ว่าพลังงานความร้อนนั้นนำไปใช้งานได้ยากลำบาก แต่พลังงานความร้อนสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงด้วย “แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG)” TEGมีบทบาทมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าทั้งจากความร้อนใต้พิภพและความร้อนเหลือใช้ดังเช่น การใช้TEGผลิตไฟฟ้าจากผลต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำพุร้อนที่อุณหภูมิ95องศาเซลเซียส และน้ำจากภูเขาที่อุณหภูมิ15องศาเซลเซียสซึ่งผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง1kWดังผลงานของSasaki, การใช้TEGผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพ ณ ผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ80องศาเซลเซียสมีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ150WดังผลงานของLiu และการใช้TEGเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเซนเซอร์ศึกษาสภาพแวดล้อมด้วยการตรวจรู้ระยะไกลดังผลงานของBonin เป็นต้น

สำหรับแหล่งพลังงานความร้อนตามธรรมชาติในประเทศไทยมักอยู่ในรูปของน้ำพุร้อนซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง34ถึง99องศาเซลเซียส โดยปกติน้ำพุร้อนจะถูกระบายลงสู่แม่น้ำลำธารสายต่างๆ เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเกิดแนวคิดในการประยุกต์ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) สำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการไหลของน้ำพุร้อนโดยเริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสำหรับผลิตไฟฟ้า เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลตามท้องตลาดนั้นไม่ตอบโจทย์ ทั้งในเรื่องของขนาด, ความทนทานต่ออุณหภูมิ, ความทนทานต่อการรั่วซึม และราคา เป็นต้น โครงการพิเศษนี้จึงเป็นโครงการที่ผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่มีความพิเศษและเฉพาะเจาะจงสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยน้ำพุร้อน อีกทั้งยังพัฒนาต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนเพื่อแก้ไขปัญหาทางด้านพลังงานอีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดสารกึ่งตัวนำเดี่ยวจากสารประกอบ $CuFe_{0.9}Al_{0.1}O_2$
- 2) เพื่อพัฒนาและสร้างต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

โมดูลจากข้อ 1)

เอกสารนี้ (3) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของต้นแบบเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดสารกึ่งตัวนำเดี่ยวจากสารประกอบ  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$
- 2) พัฒนาและสร้างต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจากข้อ 1)
- 3) ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับผลต่างอุณหภูมิ และค่าความต้านทานโหลด

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) ออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน
- 3) สร้างต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน
- 4) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบและผลต่างอุณหภูมิ
- 5) วิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบและผลต่างอุณหภูมิ
- 6) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของต้นแบบและค่าความต้านทานโหลด
- 7) วิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของต้นแบบและค่าความต้านทานโหลด
- 8) สรุปผลงานวิจัยและเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาสืบต่อไป

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

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

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) องค์ความรู้ด้านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) รูปแบบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดสารกึ่งตัวนำเดี่ยวสำหรับผลิตไฟฟ้า
- 3) ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถใช้พลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติคือพลังงานความร้อน ผันเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ดังเช่นผลงานของ ผศ.ดร.เชษฐา รัตนพันธ์และคณะ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ได้คิดค้นทางเลือกใหม่ในการผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนโดยหลักใช้หลักการเทอร์โมอิเล็กทริกคือคอนกรีตบล็อกทนความร้อนสูงผลิตไฟฟ้า เนื่องด้วยพลังงานความร้อนมีอยู่แพร่หลายในธรรมชาติ จึงเป็นแรงจูงใจในการต่อยอดประยุกต์สร้างจั่นแบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนขึ้นมา

### 2.1 ความหมายของเทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความต่างของอุณหภูมิและไฟฟ้ากล่าวคือปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผันแปลงความผลต่างอุณหภูมิให้เป็นกระแสไฟฟ้า และในทางตรงข้ามสามารถผันแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นผลต่างอุณหภูมิได้เช่นเดียวกัน โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric material)

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก คือ วัสดุที่สามารถผันแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้ความต่างระหว่างอุณหภูมิของด้านสองด้านของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเป็นได้ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำ สำหรับโลหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า

### 2.2 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมอิเล็กทริก (Basic principle of Thermoelectric)

ปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) ซึ่งทั้งสองปรากฏการณ์เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถผันกลับกันได้

#### 2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

โทมัส ซีเบค (Thomas Seebeck) นักฟิสิกส์ค้นพบว่า เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของตัวนำสองชนิด จะเกิดศักย์ไฟฟ้าบริเวณปลายทั้งสองเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ได้รับความร้อนจะมีพลังงานมากกว่าส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า

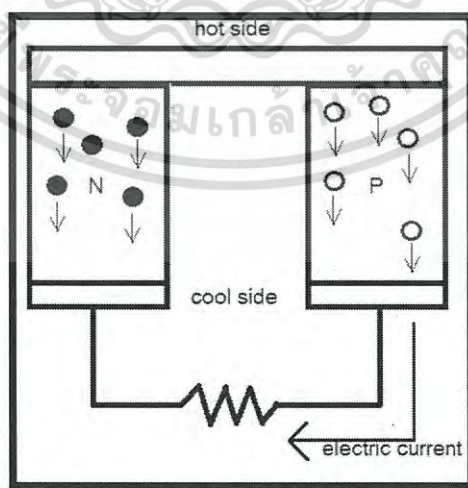


รูปที่ 2.1 Thomas Seebeck

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Johann\\_Seebeck](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Johann_Seebeck)

ปรากฏการณ์ซีเบค คือ ปรากฏการณ์การผันแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิทั้งสองด้านแตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ด้านที่อุณหภูมิสูงจะมีพลังงานจลน์จะมากกว่าด้านที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเนื่องจากความต่างศักย์ของทั้งสองด้าน ความต่างศักย์วงจรเปิด เรียกว่าความต่างศักย์ซีเบค (Seebeck voltage) ซึ่งแสดงในรูปของความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และความต่างระหว่างอุณหภูมิของทั้งสองด้านของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\alpha$  = สัมประสิทธิ์ซีเบค $V$  = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) $T$  = อุณหภูมิ (K)

รูปที่ 2.2 Seebeck effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์ โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น N-type จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นลบ แต่ P-type จะมีสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นบวก

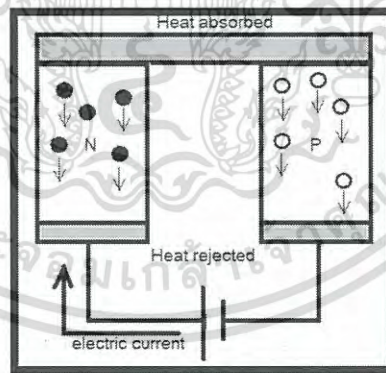
## 2.2.2 ปปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect)



รูปที่ 2.3 Jean Charles Athanase Peltier

ที่มา: <http://energiein.e-monsite.com/pages/p1-et-moi.html>

เพลเทียร์ (Jean Charles Athanase Peltier) ค้นพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 Peltier effect

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกจะพบว่าที่ด้านหนึ่งของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะมีอุณหภูมิต่ำและอีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ความร้อนของพาหะขณะเคลื่อนที่เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงทำให้ด้านทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ดูดซึมทางด้านเย็นกับกระแสไฟฟ้าดังนี้

$$Q_{\text{absorb}} = (\Pi_1 - \Pi_2)I \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ (W) หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- II คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์หรือพลังงานความร้อนที่ประจุไฟฟ้า 1 ประจุสามารถพาไปได้ (V)
- I คือ กระแสที่ไหลอยู่ภายในตัวนำ (A)

## 2.3 การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็งมีวิธีผสมสารตัวอย่าง 2 แบบ คือ แบบเปียกและแบบแห้ง ซึ่งเป็นการบดผสมแบบ ball milling หรือ แบบบดในครกบดสารหลังจากนั้นนำสารอัดเป็นแท่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งทำได้หลายวิธีได้แก่วิธีการเผาผลึก การผสมโลหะเชิงกล การอัดร้อน การกดร้อนและการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว

## 2.4 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ZT หรือ Dimensionless figure of merit ที่มีคุณภาพ จะต้องมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูง
2. ต้องมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง
3. ต้องมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ

ค่า Dimensionless figure of merit, ZT หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{K} \quad (2.3)$$

หรือ Figure of merit

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{K} \quad (2.4)$$

โดย	ZT	คือ dimensionless figure of merit	
	$\alpha$	คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค	(V/K)
	$\sigma$	คือ สภาพนำไฟฟ้า	( $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ )
	K	คือ สภาพนำความร้อน	(W/m K)
	T	คือ อุณหภูมิ	(K)

## 2.5 สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถที่จะผลิตไฟฟ้าได้เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริก

### 2.5.1 สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity)

เป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (Thermal Conductivity) เป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตัวกลางเดียวกันหรือระหว่างตัวกลางต่างชนิดที่อยู่ติดกันโดยอาศัยผลของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนในของแข็งเกิดจากการสั่นของโมเลกุลและถ่ายโอนพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ

ผลรวมของสภาพนำความร้อน ( $K$ ) จะประกอบไปด้วยสองส่วนคือ เทอมแรกจะเป็นของอิเล็กตรอนอิสระและแลตทิซ ดังนี้

$$K = K_e + K_l \quad (2.5)$$

เมื่อ  $K_e$  คือ สภาพนำความร้อนเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระ

$K_l$  คือ สภาพนำความร้อนเนื่องจากการสั่นของแลตทิซ

โดยที่ในเทอมของอิเล็กตรอนอิสระจะถูกอธิบายโดยกฎของไวด์แมนซ์ (Wiedemann-Franz law)

$$K_e = L_0 \sigma T \quad (2.6)$$

เมื่อ  $L_0$  คือ ค่าคงที่ลอเรนซ์  $2.44 \times 10^{-8}$  ( $w - \Omega / K^2$ )

$\sigma$  คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า ( $S/m$ )

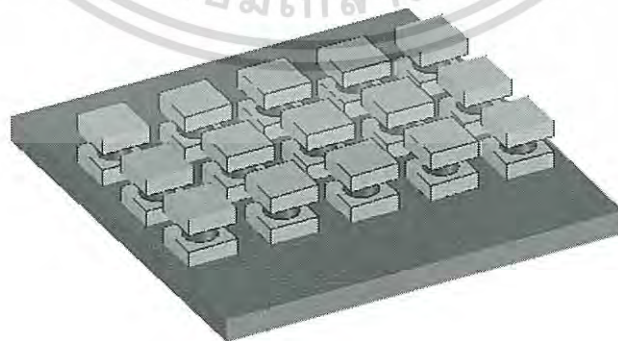
$T$  คือ อุณหภูมิสัมพัทธ์ ( $K$ )

### 2.5.2 สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ (Carrier concentration) และสภาพคล่องของพาหะอิสระ (Mobility) กล่าวคือ ความหนาแน่นของพาหะอิสระจะถูกกำหนดด้วยช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ สภาพคล่องของพาหะอิสระขึ้นอยู่กับกระเจิง (Scattering) ภายในสารกึ่งตัวนำ

## 2.6 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module)

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจัดเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น (thermoelectric cooler) หรือถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า (thermoelectric generator) วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ตามหลักควรจะเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมาก ซึ่งคือวัสดุประเภทโลหะกึ่งตัวนำเนื่องจากมีประจุไฟฟ้าอิสระมากมีความต้านทานไฟฟ้าจะต่ำ



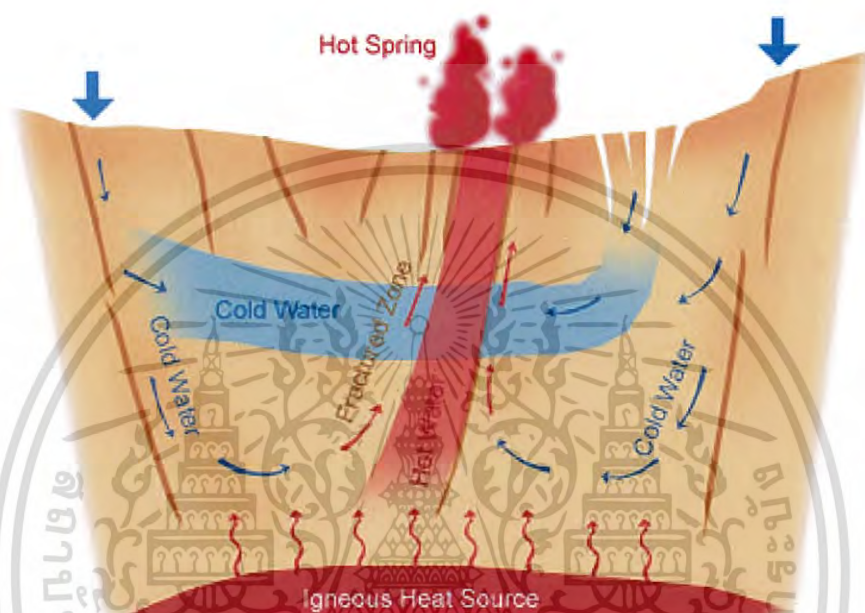
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 น้ำพุร้อน

### 2.7.1 ต้นกำเนิดของน้ำพุร้อน

โดยทั่วไปต้นกำเนิดของน้ำร้อนที่พบในแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพแต่ละแห่งในโลก มักมีต้นกำเนิดจากน้ำเย็นบนผิวดินหรือน้ำฝนที่ไหลซึมผ่านรอยแตกของหินลึกลงไปใต้ดินและได้รับความร้อนจากหินร้อนทำให้มีอุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้น หลังจากนั้นไหลกลับสู่เบื้องบนและมาสะสมตัวในแหล่งกักเก็บที่เหมาะสม



รูปที่ 2.6 การเกิดน้ำพุร้อน

ที่มา: <http://teenet.cmu.ac.th/sci/survey01.php>

ตารางที่ 2.1 แหล่งน้ำพุร้อนภายในประเทศไทย (บางส่วน)

แหล่งน้ำพุร้อน	บ้าน	อำเภอ	จังหวัด	อุณหภูมิ	pH
ฝาง	โป่งน้ำร้อน	ฝาง	เชียงใหม่	99	9
โป่งน้ำร้อน	ผาเสริฐู	เมือง	เชียงราย	80	8.3
โป่งปะ	ตาลเจ็ดต้น	ปาย	แม่ฮ่องสอน	88	8.5
โป่งน้ำร้อน	โป่งน้ำร้อน	เสริมงาม	ลำปาง	76.5	7.4

(ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี)

### 2.7.2 การใช้ประโยชน์จากน้ำพุร้อนในการผลิตไฟฟ้า

น้ำพุร้อนเป็นแหล่งพลังงานทางธรรมชาติที่สะอาด และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมดังนั้นด้วยเหตุนี้เองจึงมีการนำความร้อนจากน้ำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากมายหลายระบบ เช่น ระบบเทอร์โมอิเล็กทริก และระบบหมุนกังหันแบบ2วงจร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งน้ำพุร้อน อำเภอดงขี้เหล็กมีอุณหภูมิของน้ำพุร้อนสูงกว่า 90 °C และอัตราการไหลตามธรรมชาติของน้ำพุร้อนเท่ากับ 22.4 ลิตร/วินาที ในปี พ.ศ. 2532 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ทำการติดตั้งโรงไฟฟ้าสาธิตที่ใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพเป็นแห่งแรกในประเทศ และเป็นแห่งแรกในเอเชียอาคเนย์ด้วยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ปีละประมาณ 1,200,000 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง



รูปที่ 2.7 โรงไฟฟ้าสาธิต 300kW น้ำพุร้อนฝาง จ.เชียงใหม่

ที่มา: [http://www.dmr.go.th/ewtadmin/ewt/dmr\\_web/main.php?filename=electric1](http://www.dmr.go.th/ewtadmin/ewt/dmr_web/main.php?filename=electric1)

สำหรับต่างประเทศแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก(TEG) มีบทบาทมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าทั้งจากความร้อนใต้พิภพในรูปแบบของน้ำพุร้อนดังเช่น การใช้TEGผลิตไฟฟ้าจากผลต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำพุร้อนที่อุณหภูมิ95องศาเซลเซียสและน้ำจากภูเขาที่อุณหภูมิ15องศาเซลเซียสซึ่งผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง1kWผลงานของSasaki และการใช้TEGผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพ ผลิตต่างอุณหภูมิเท่ากับ 80องศาเซลเซียสมีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ150WผลงานของLiu เป็นต้น

## 2.8 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความต้านทานภายใน ( $R_{in}$ ) ที่สมมูลกับโหลด ( $R_L$ ) หรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อโดยความต้านทานภายในหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_{in} = V_{oc} / I_{sc} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$R_{in}$	คือความต้านทานภายในแหล่งจ่าย
	$V_{oc}$	คือแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแหล่งจ่าย
	$I_{sc}$	คือกระแสไฟฟ้าปิดวงจรของแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ( $P$ ) มีค่าเท่ากับผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) กับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $I_o$ ) ดังสมการ(2.8)

$$P = V_o I_o \quad (2.8)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุตได้ดังนี้

$$I_o = (V_{oc} - V_o) / R_{in} \quad (2.9)$$

นำ (2.9) แทนลงใน (2.8) จะได้

$$P = V_o (V_{oc} - V_o) / R_{in} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $R_L = R_{in}$  จึงได้ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{pmax}$ ) ดังนี้

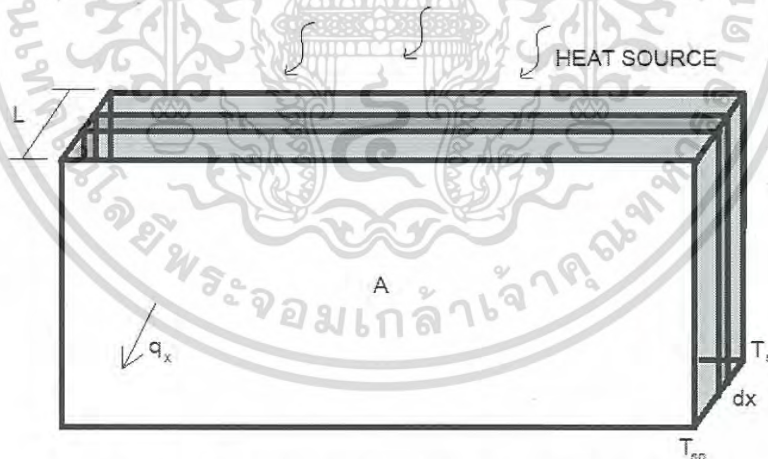
$$V_{pmax} = V_{oc} / 2 \quad (2.11)$$

ดังนั้นสามารถเขียนกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$P_{max} = V_{oc}^2 / 4R_{in} \quad (2.12)$$

## 2.9 กฎการนำความร้อนของฟูริเยร์

แท่งโลหะแท่งหนึ่งเมื่อปลายแท่งด้านหนึ่งร้อนจะทำให้ปลายด้านอื่นมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย การถ่ายเทพลังงานเช่นนี้เป็นผลมาจากการสั่นและการชนกันของโมเลกุลนั่นเองโดยทิศทางการชนและการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเป็นไปอย่างสุ่มซึ่งพลังงานจะถ่ายเทจากอุณหภูมิที่สูงกว่าไปยังอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งเรียกว่าการนำ



รูปที่ 2.8 แบบจำลองอัตราการถ่ายโอนความร้อนของการนำ

อัตราการถ่ายโอนความร้อนของการนำสามารถพิจารณาได้ง่ายดังรูป 2.8 จากรูป 2.8 เป็นรูปของกำแพงที่มีความหนา  $L$  บริเวณผิวด้านหน้าและด้านหลังไม่มีฉนวนความร้อนโดยที่ผิวด้าน  $x=0$  มีอุณหภูมิ  $T_{si}$  ส่วนผิวด้านหน้า  $x=L$  มีอุณหภูมิเท่ากับ  $T_{so}$  โดยด้านขอบของกำแพงถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อน ดังนั้นความร้อนจึงถ่ายเทไปในทิศทางแกน  $x$  เท่านั้น สมมติว่าระบบนี้อยู่ในสภาวะคงตัว กำหนดให้  $q_x$  เป็นอัตราการนำความร้อนในแนวแกน  $x$  โดย  $q_x$  ขึ้นกับปริมาณของพื้นที่หน้าตัด  $A$ ,  $T_{si} - T_{so}$  และความหนา  $L$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x \propto \frac{A(T_{si} - T_{so})}{L} \quad (2.13)$$

$$q_x = k \frac{A(T_{si} - T_{so})}{L} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $k$  คือสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกับสภาวะคงตัว,  $k$  คงที่เสมอ และนำความร้อนทิศทางเดียวเท่านั้น เมื่อจัดรูปสมการใหม่จาก  $T_{si}$  เป็น  $T(x)$  และ  $T_{so}$  เป็น  $T(x+dx)$  โดย  $L$  กลายเป็น  $dx$  เราจะได้

$$q_x = kA \frac{T(x) - T(x+dx)}{dx} = -kA \frac{T(x+dx) - T(x)}{dx} \quad (2.15)$$

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

กำหนดให้  $q_x''$  เป็นฟลักซ์ความร้อนคือ  $q_x'' = q_x / A$

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

เครื่องหมายลบนั้นแสดงถึงฟลักซ์ความร้อนถ่ายโอนจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิก

## 2.10 กฎการเย็นตัวของนิวตัน

การถ่ายเทความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งคือการพาซึ่งเกิดจากการที่ผิวของวัสดุและของไหลรอบๆ ผิววนั้นเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงาน ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวจะขึ้นอยู่กับปริมาณของผลต่างอุณหภูมิบริเวณผิวกับอุณหภูมิของของไหล

$$q_s'' \propto (T_s - T_\infty) \quad (2.18)$$

เมื่อ  $q_s''$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว

$T_s$  คืออุณหภูมิบริเวณผิว

$T_\infty$  คืออุณหภูมิของของไหลที่ไกลจากผิว

สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q_s'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.19)$$

สมการนี้รู้จักกันในนามของกฎการเย็นตัวของนิวตัน โดย  $h$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนซึ่งขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิต, คุณสมบัติของของไหล, การเคลื่อนที่ของของไหล และบางกรณีอาจเกิดขึ้นกับผลต่างอุณหภูมิที่ผิวกับของไหล ( $T_s - T_\infty$ ) ซึ่ง  $h$  ไม่ใช่คุณสมบัติของวัสดุ

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.11.1 ผลงานของ Sasaki

การใช้ TEG ผลิตไฟฟ้าจากผลต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำพุร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสและน้ำจากภูเขาที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสซึ่งผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง 1 kW ต่อกำลังงานของ Sasaki

ที่มา <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-014-3189-z>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11.2 ผลงานของLiu

การใช้TEGผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพ ณ ผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ80องศาเซลเซียสมีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ150WดังผลงานของLiu

ที่มา <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.163>.

### 2.11.3 ผลงานของBonin

การใช้TEGเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเซนเซอร์ศึกษาสภาพแวดล้อมด้วยการตรวจรู้ระยะไกลดังผลงานของBonin เป็นต้น

ที่มา <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.016>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 3 นี้เป็นการนำเสนอการดำเนินการวิจัยโดยจะอธิบายเกี่ยวกับ 6 ส่วนดังนี้ อุปกรณ์การดำเนินงานวิจัย, ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$ , การออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน, ขั้นตอนการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล, ขั้นตอนการสร้างต้นแบบต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน และวิธีการทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์การดำเนินงานวิจัย

3.1.1 เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )



3.1.2 อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



3.1.3 แอลกอฮอล์



3.1.4 คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ปีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร



3.1.6 ฟิล์ม



3.1.7 ปลี้อัดสาร



3.1.8 ขวดพลาสติก



3.1.9 กรวยกรองสาร



3.1.10 ครกตำ/บด สาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 กระดาษฟอยล์



3.1.12 ช้อนตักสาร



3.1.13 ถุงมือและหน้ากากอนามัย



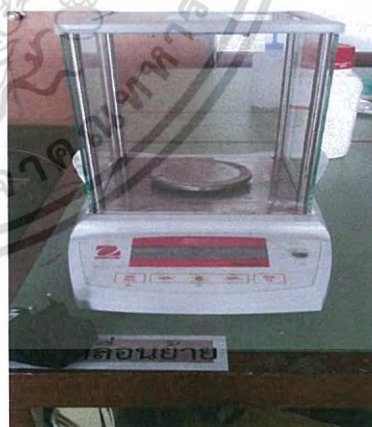
3.1.14 ถ้วยคูลี่เบิ้ล



3.1.15 ตะแกรงกรองสาร



3.1.16 เครื่องชั่งสารความละเอียด 0.0001 กรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

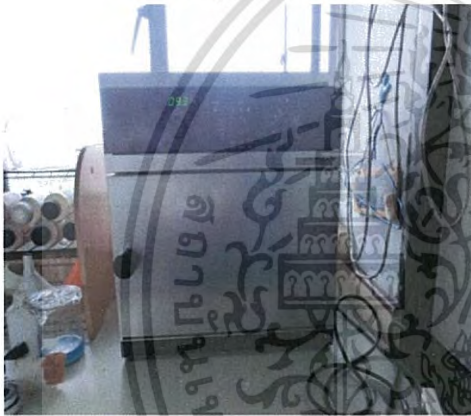
3.1.17 เตาเผาไฟฟ้า



3.1.18 เครื่องอัดไฮดรอลิก



3.1.19 ตู้อบสาร



3.1.20 เครื่องBall mill



3.1.21 กรรไกรกับเทปฟอย



3.1.22 กาวฉนวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.1.23 เครื่องขัดผิวโลหะ

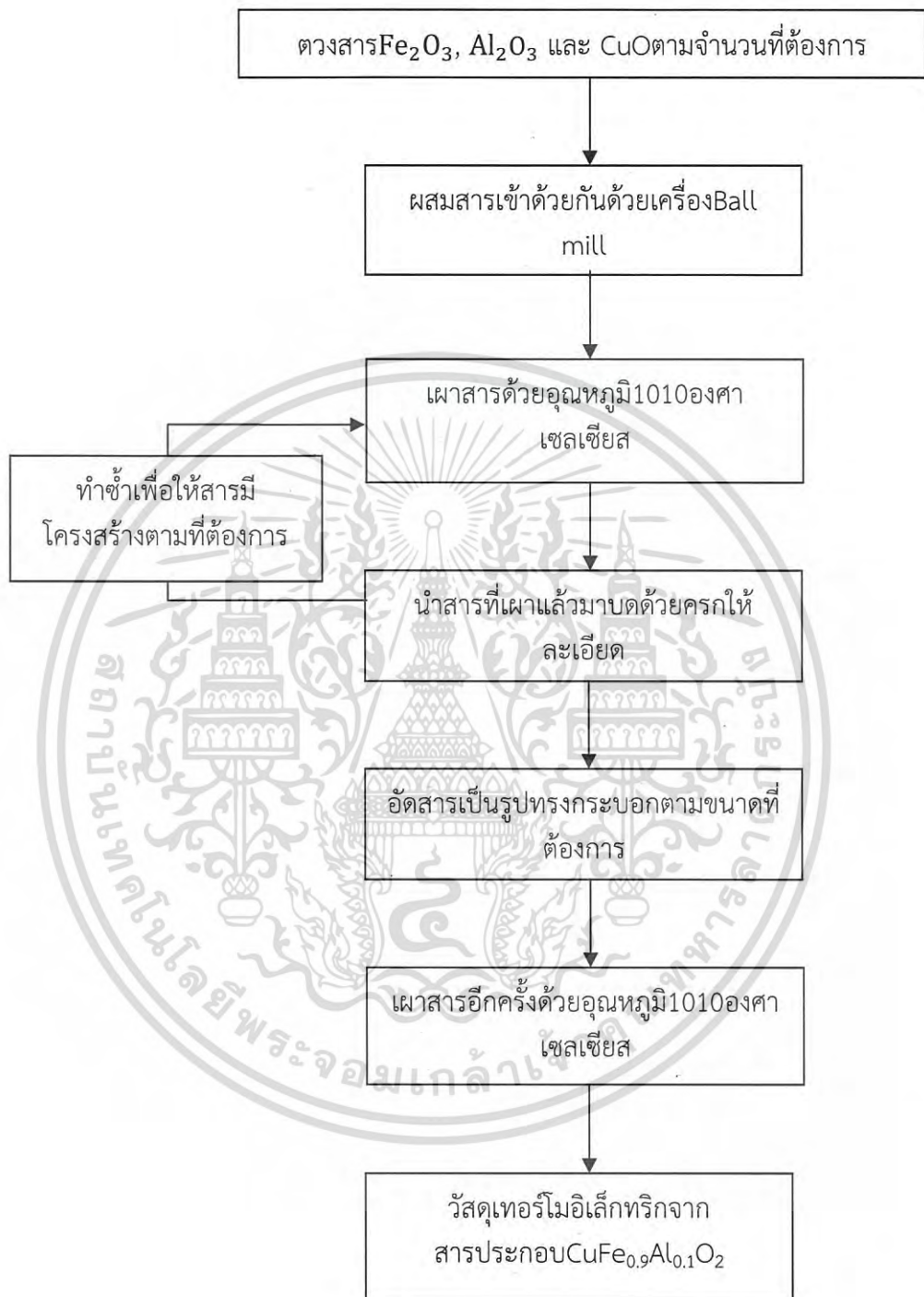


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การดำเนินงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$

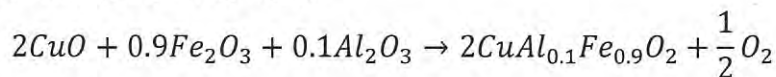


รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารประกอบ  $\text{CuFe}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การตวงสาร

การตวงสารนั้นจำเป็นต้องทราบถึงน้ำหนักของสารตั้งต้น โดยสามารถคำนวณด้วยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ได้จากสมการเคมีดังนี้



หากกำหนดว่าต้องการ  $CuFe_{0.9}Al_{0.1}O_2$  หนัก 50 กรัม ซึ่งวิธีการหาน้ำหนักของสารตั้งต้นมีดังนี้

1) ทำการหาค่ามวลโมเลกุลของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์

- $2CuO = 159.0908$  กรัม
- $0.9Fe_2O_3 = 143.7206$  กรัม
- $0.1Al_2O_3 = 10.1962$  กรัม
- $2CuAl_{0.1}Fe_{0.9}O_2 = 297.0082$  กรัม

2) ทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์

กำหนดให้ต้องการสารผลิตภัณฑ์หนัก 50 กรัม

- $2CuO$  ที่ต้องใช้เท่ากับ 26.7822 กรัม
- $0.9Fe_2O_3$  ที่ต้องใช้เท่ากับ 24.1947 กรัม
- $0.1Al_2O_3$  ที่ต้องใช้เท่ากับ 1.7165 กรัม

3) ทำการชั่งสารตามปริมาณดังกล่าว

### 3.2.2 การผสมสารเข้าด้วยเครื่อง Ball mill

สารตั้งต้นแต่ละชนิดหลังจากถูกตวงแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำสารตั้งต้นแต่ละชนิดมาทำการผสมเข้าด้วยกันซึ่งมีประโยชน์ในการทำให้สารมีความเป็นเนื้อเดียวกันก่อนจะทำการเผา

การผสมสารนั้นถูกผสมอยู่ในบรรยากาศของแอลกอฮอล์ ด้วยเหตุนี้เองหลังจากการผสมสารจึงต้องนำสารที่ได้ไปอบโดยมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสเพื่อให้แอลกอฮอล์ระเหยออกจากตัวสารที่ผสมแล้วนั่นเอง

### 3.2.3 การเผาสาร

การเผาสารเป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมของสารเกิดการจัดเรียงตัว หรือจัดโครงสร้างใหม่ซึ่งการที่จะทำให้สารมีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสม

นับว่าอุณหภูมิมีบทบาทสำคัญในการจัดโครงสร้างของสาร จากการทำวิจัยรุ่นก่อนพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมคือช่วงที่อุณหภูมิที่ทำให้สารเริ่มอ่อนตัวสำหรับสารนี้คือ 1,000-1,050 องศาเซลเซียส และยังมีอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญในการจัดโครงสร้างของสารคือระยะเวลาในการเผา หากใช้ระยะเวลาในการเผานานสารจะสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นการเผาสารเพียงครั้งเดียวอาจไม่เพียงพอจึงมีเทคนิคการนำสารที่เผาแล้วมาทำการบดและนำไปเผาใหม่ซ้ำๆ อาจกล่าวสรุปได้ว่าวิธีดังกล่าวเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 การอัดสารเทอร์โมอิเล็กทริก

หลังจากเผาสารจนได้โครงสร้างตามที่ต้องการแล้วนั้น นำสารที่ได้มาบดให้ละเอียดเพื่อเตรียมสู่ขั้นตอนการอัดหรือขึ้นรูป สำหรับความดันที่ใช้อัดคือ  $15000 \text{ kg/cm}^3$  เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งการอัดแต่ละครั้งใช้สารหนัก 7 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก

### 3.2.5 การเผาแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริก

นำสารที่อัดขึ้นรูปเป็นแท่งเข้าสู่กระบวนการเผาที่อุณหภูมิ  $1,010$  องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาทำให้สารยึดเกาะกันมากขึ้น แข็งแรงมากขึ้นและทำให้ได้โครงสร้างที่ดีขึ้น เมื่อเผาเสร็จสิ้นแล้ว เราจะได้แท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำโมดูลในขั้นตอนต่อไป

## 3.3 การออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

### 3.3.1 การออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้นสูง  $0.8$  นิ้ว โดยแท่งสารมีความสูง  $0.4$  นิ้ว, รัศมีเท่ากับ  $0.2$  นิ้ว และขั้วโลหะหนา  $0.2$  นิ้ว

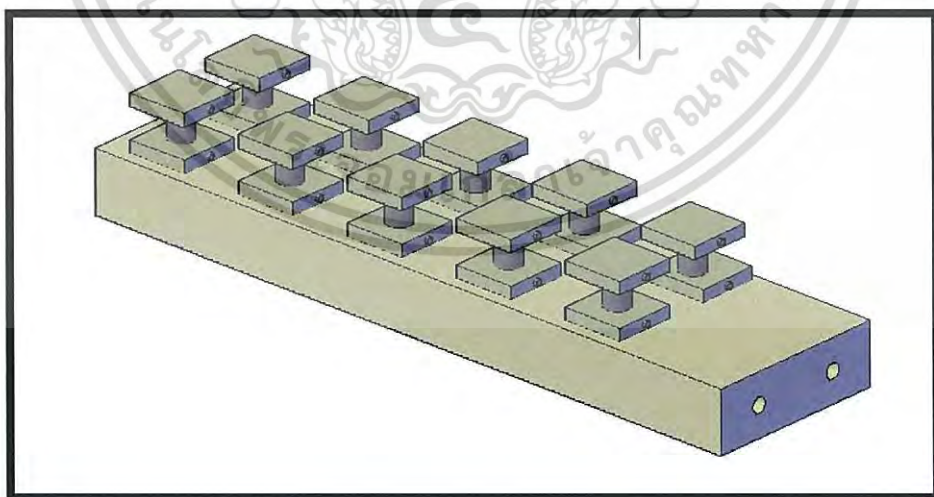


รูปที่ 3.4 แบบจำลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

### 3.3.2 การออกแบบต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

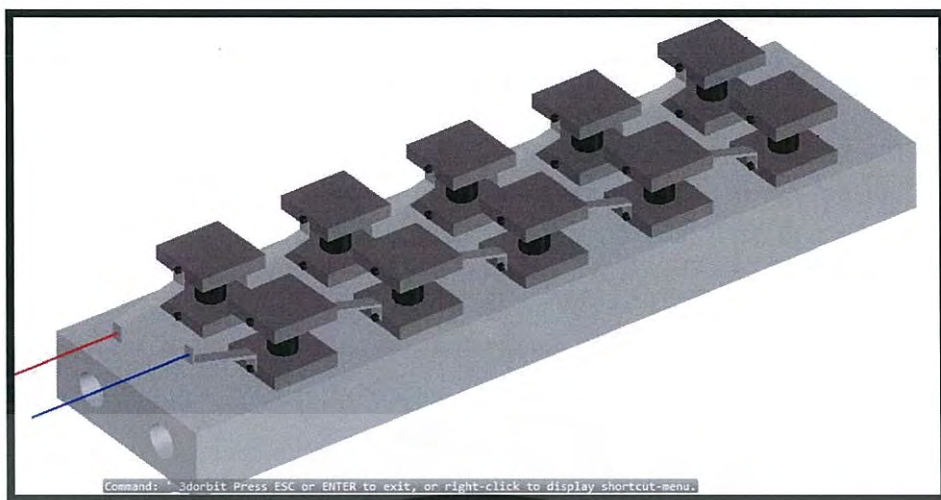
การออกแบบต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนคำนึงถึงการกันความร้อนของด้านท่อน้ำร้อนและน้ำอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังใช้หลักการนำความร้อนและการพาความร้อนมาเป็นส่วนช่วยพิจารณาในการออกแบบ

ความยาวของรางน้ำเท่ากับ11.5นิ้ว, ความกว้างของรางน้ำเท่ากับ3นิ้ว และความหนาของรางน้ำเท่ากับ1นิ้วซึ่งขนาดดังกล่าวเป็นขนาดมาตรฐานทำให้จัดหาได้ง่ายอีกด้วย ส่วนทางด้านของโมดูลนั้นสูง0.8นิ้วโดยแท่งสารสูง0.4นิ้วและขั้วโลหะ0.2นิ้ว บริเวณรูซึ่งเป็นที่ผ่านของน้ำมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ0.5นิ้ว

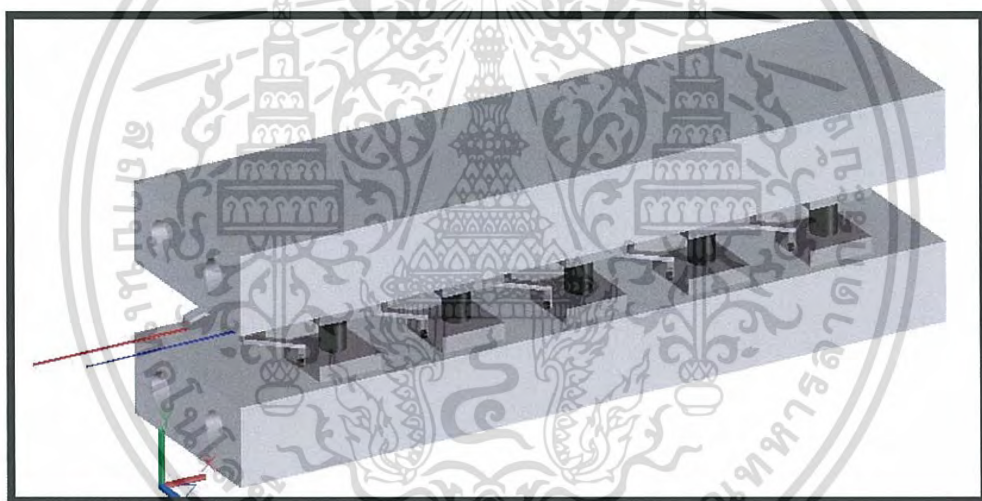


รูปที่ 3.5 แบบจำลองต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แบบจำลองต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

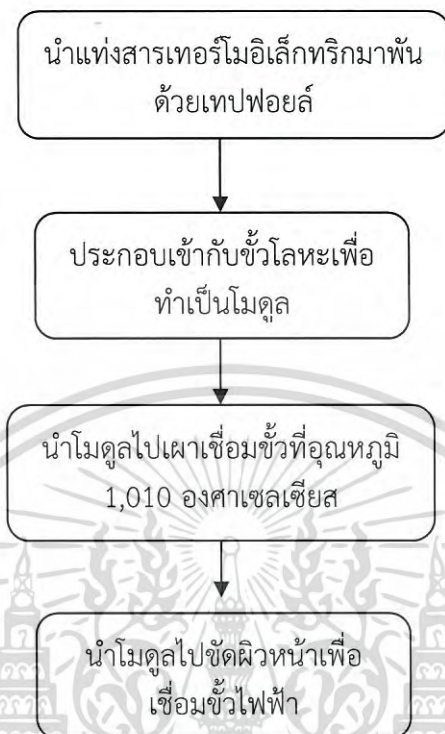


รูปที่ 3.7 แบบจำลองต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

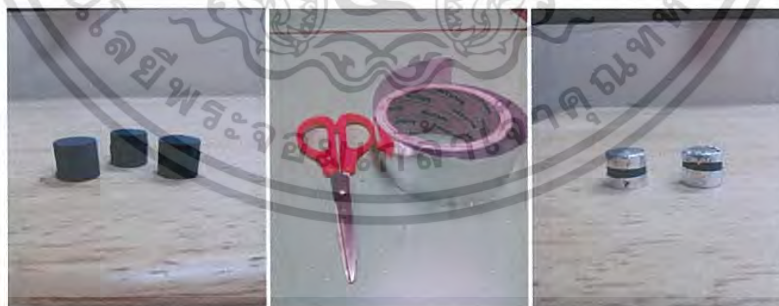
ในการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีขั้นตอนหลายขั้นตอนด้วยกัน ดังแผนภาพดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

#### 3.4.1 นำแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริกพันด้วยเทปพอยล์

นำแท่งสารเทอร์โมอิเล็กทริกมาพันด้วยเทปพอยล์เพื่อทำหน้าที่ในการเชื่อมสารกับขั้วไฟฟ้า



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.9 (ก) เทอร์โมอิเล็กทริก

(ข) กรรไกรและเทปพอยล์

(ค) เทอร์โมอิเล็กทริกที่พันเทปพอยล์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 ประกอบเข้ากับขั้วโลหะเพื่อทำเป็นโมดูล

นำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่พันด้วยเทปพอยล์แล้วมาประกอบเข้ากับขั้วโลหะเพื่อทำเป็น

โมดูล



รูปที่ 3.10 โมดูล

### 3.4.3 นำโมดูลไปเผาเชื่อมขั้วที่อุณหภูมิ 1,010 องศาเซลเซียส

นำโมดูลไปเผาด้วยเตาเผาสารที่อุณหภูมิสูง 1,010 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงครึ่ง หลังจากนั้นนำสารออกมาจากเตาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา knock lattice เพื่อให้สารได้โครงสร้างที่เหมาะสมและเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะกับขั้วโลหะทิ้งไว้จนอุณหภูมิลดลง

### 3.4.4 นำโมดูลไปขัดผิวหน้าของขั้ว

นำโมดูลไปขัดที่ผิวขั้วกำจัดออกไซด์ที่เกาะขั้วโลหะออกเพื่อใช้เป็นขั้วเพื่อวัดไฟฟ้าด้วยเครื่องขัดดังรูปที่ 3.6



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) ขณะขีดที่ผิวขี้

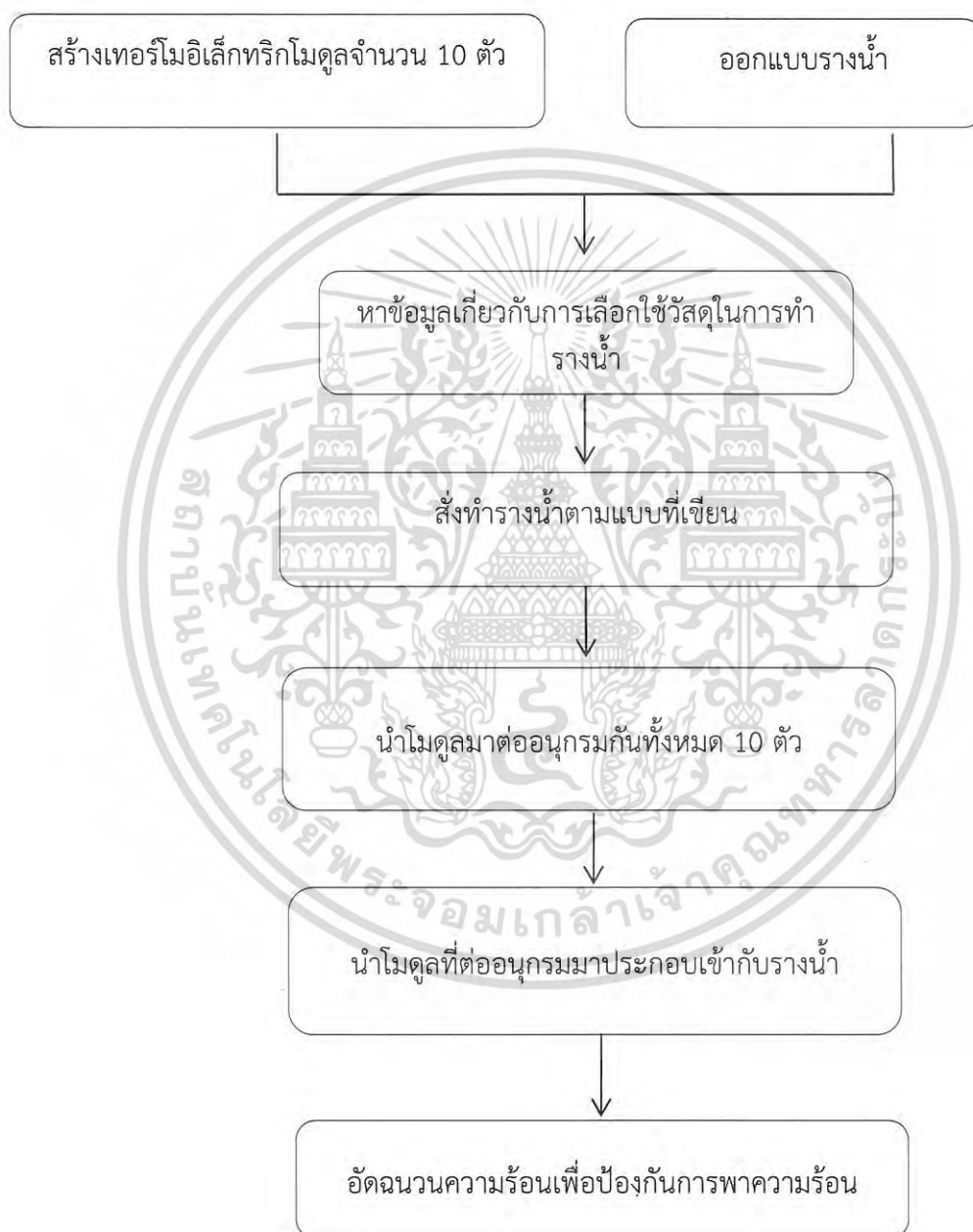
(ข) โมดูลที่ขีดขี้แล้วพร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนการสร้างต้นแบบต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนนั้นประกอบขึ้นจากเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลและรางน้ำทั้งสอง (สำหรับน้ำร้อนและน้ำอุณหภูมิห้อง) โดยการสร้างต้นแบบจำเป็นต้องคัดสรร วัสดุที่นำมาทำรางน้ำ, วัสดุที่ใช้สำหรับสมานโมดูลเข้ากับรางน้ำ และฉนวนความร้อน เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นการเลือกใช้วัสดุต่าง ๆ นั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของการใช้งาน และราคาที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญ

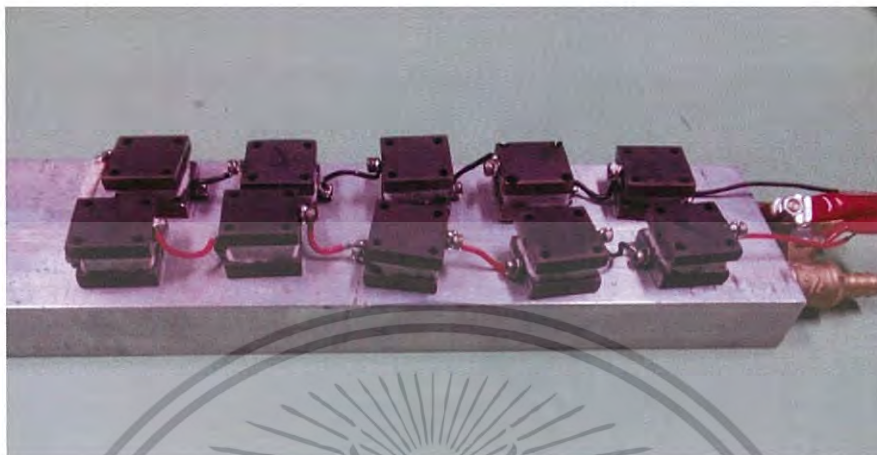


รูปที่ 3.12 แผนผังการการสร้างต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

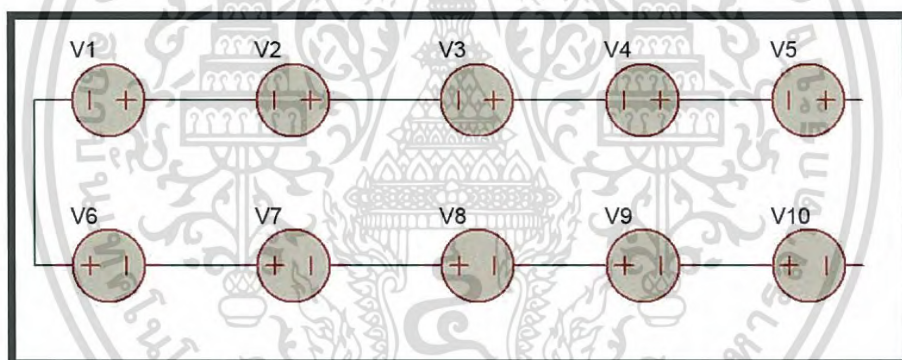
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1 ขั้นตอนการต่ออนุกรมของโมดูล

นำโมดูลต่ออนุกรมกัน 10 ตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า) ของ  
โมดูล



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.13 (ก) ภาพเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่ออนุกรมกัน 10 ตัว

(ข) แผนภาพวงจรเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่ออนุกรมกัน 10 ตัว

### 3.5.2 ขั้นตอนการประกอบโมดูลกับรางน้ำ

ประกอบรางน้ำกับโมดูลด้วยกาวฉนวนเพื่อป้องกันไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างโมดูล(เนื่องจากผิวรางน้ำเป็นวัสดุนำไฟฟ้าได้) ทำการประกอบทีละด้านแล้วตรวจเช็ควงจร หลังจากนั้นประกอบอีกด้านหนึ่งด้วยกาวฉนวนดั้งเดิม แล้วใส่ฉนวนใยแก้วไว้ที่ช่องว่างระหว่างโมดูลกับรางน้ำที่ประกอบกันแล้ว เพื่อป้องกันการพาความร้อนของอากาศระหว่างรางน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปภาพที่ 3.14 (ก) การฉนวน EpoPutty

(ข) รางน้ำอลูมิเนียม

(ค) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่ออนุกรม 10 ตัว

(ง) รางน้ำประกอบกับโมดูลเสรีจสมบูรณ์

### 3.6 วิธีการทดลอง

การทดลองสำหรับงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนกับตัวแปรต่างๆเช่น ผลต่างอุณหภูมิ และค่าความต้านทานโหลดเป็นต้น และเพื่อบ่งบอกถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของต้นแบบอีกด้วย ซึ่งประกอบไปด้วย 2 การทดลองดังนี้

#### 3.6.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน และผลต่างอุณหภูมิ

1) จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.10

2) ทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิแก่ต้นแบบด้วยการไหลของน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่าง 40 องศาเซลเซียส และนำอุณหภูมิห้องผ่านทางท่ออลูมิเนียมของต้นแบบดังรูปที่ 3.12(ก)

3) บันทึกค่าของอุณหภูมิที่น้ำร้อน, อุณหภูมิที่น้ำอุณหภูมิห้อง, แรงดันไฟฟ้าเปิด

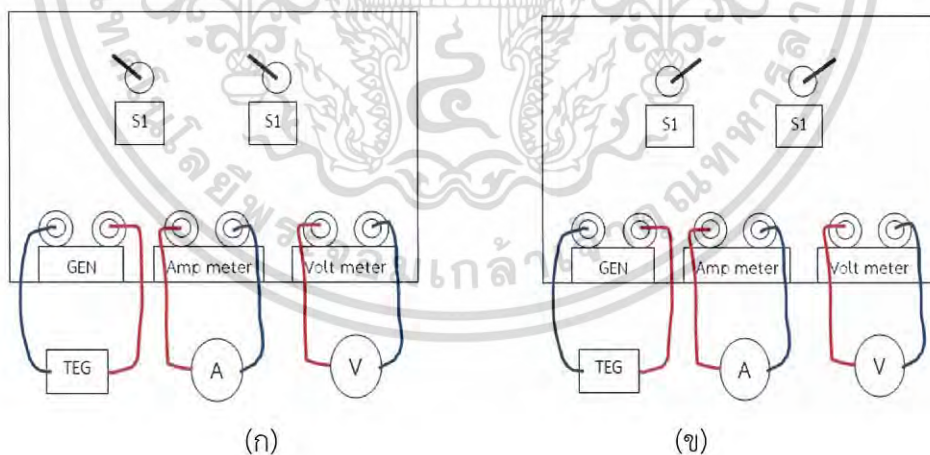
วงจรและกระแสไฟฟ้าปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) คำนวณค่าของผลต่างอุณหภูมิ และค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบ
- 5) ทำการทดลองข้อ2ถึงข้อ4ซ้ำ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำร้อนเป็น 50, 60, 70, 80 และ90องศาเซลเซียส
- 6) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบ และผลต่างอุณหภูมิ
- 7) วิเคราะห์กราฟและผลการทดลอง

### 3.6.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของต้นแบบ และค่าความต้านทานโหลด ณ ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ

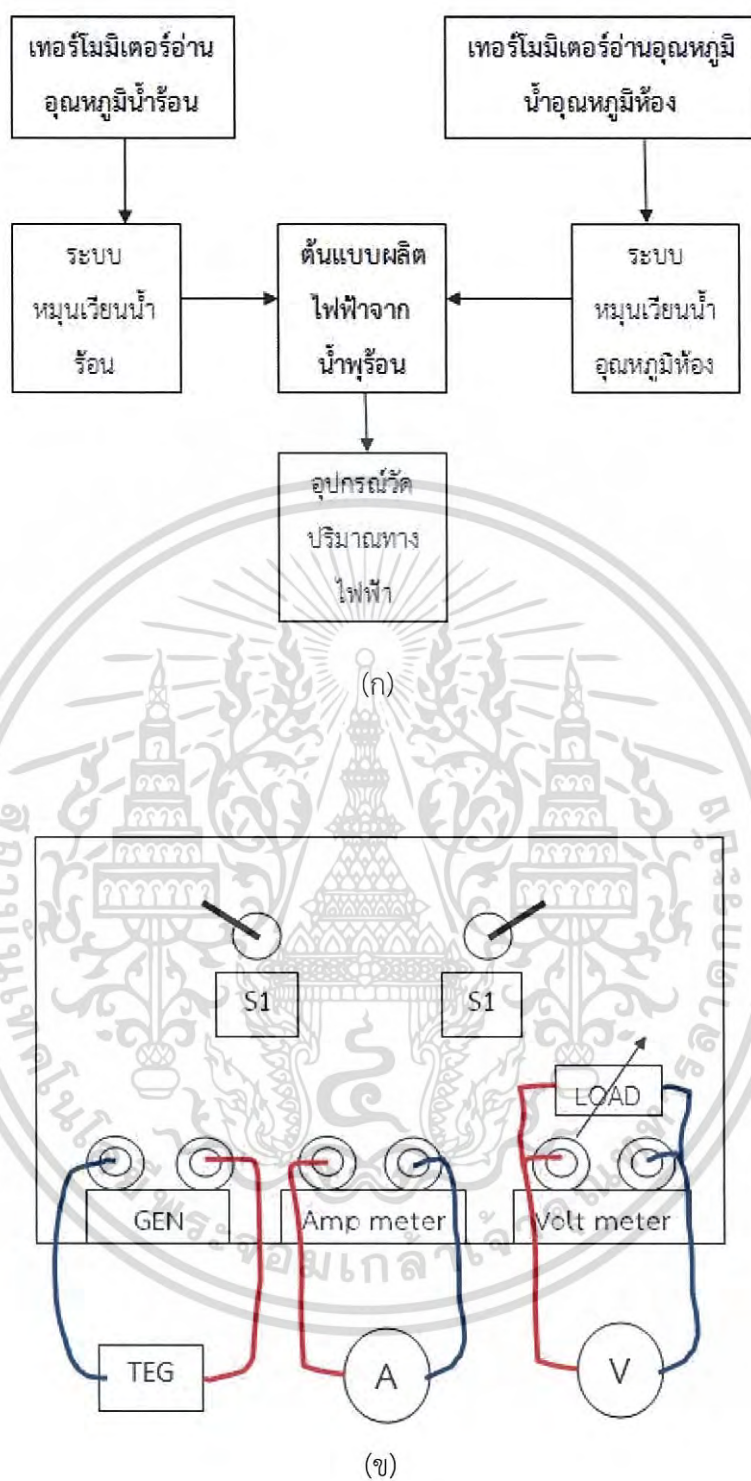
- 1) จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.11(ข)
- 2) ทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิแก่ต้นแบบด้วยกระแสไหลของน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่าง40องศาเซลเซียส และนำอุณหภูมิห้องผ่านทางท่อลูมิเนียมของต้นแบบดังรูปที่ 3.12(ก)
- 3) ทำการปรับค่าความต้านทานของโหลดเท่ากับ0โอห์ม
- 4) บันทึกค่าของอุณหภูมิที่อน้ำร้อน, อุณหภูมิที่อน้ำอุณหภูมิห้อง, แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
- 5) ทำการทดลองข้อ3ถึงข้อ4ซ้ำ โดยทำการปรับค่าความต้านทานโหลดเป็น300, 600, 900,1200, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700 และ3000 โอห์ม
- 6) ทำการทดลองข้อ2, ข้อ4 และข้อ5ซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิของน้ำร้อนเป็น 50, 60,70, 80 และ90องศาเซลเซียส
- 7) ทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าของต้นแบบและผลต่างอุณหภูมิ



รูปที่ 3.15 (ก) วงจรสำหรับวัดค่ากระแสปิดวงจร

(ข) วงจรสำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

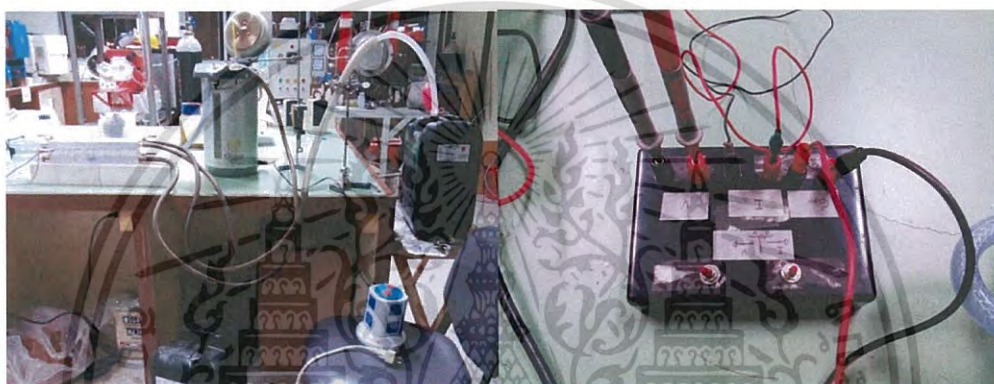


รูปที่ 3.16 (ก) แผนภาพระบบของการทดลอง  
(ข) วงจรสำหรับทดลองตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

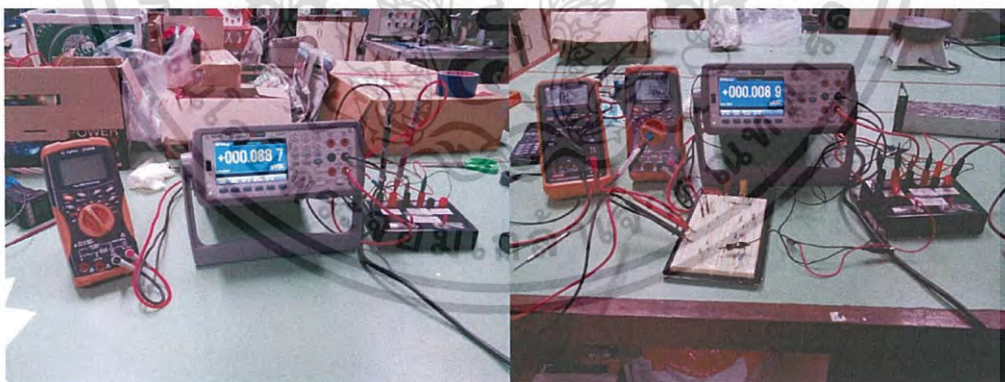


(ก)



(ข)

(ค)



(ง)

(จ)

- รูปที่ 3.17 ชุดอุปกรณ์การทดลอง (ก) ชุดอุปกรณ์การทดลอง  
 (ข) ระบบจำลองการไหลเวียนของน้ำ  
 (ค) กล่องสวิตช์ปรับเปลี่ยนค่าการวัด  
 (ง) ชุดอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าตอนที่ 1  
 (จ) ชุดอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

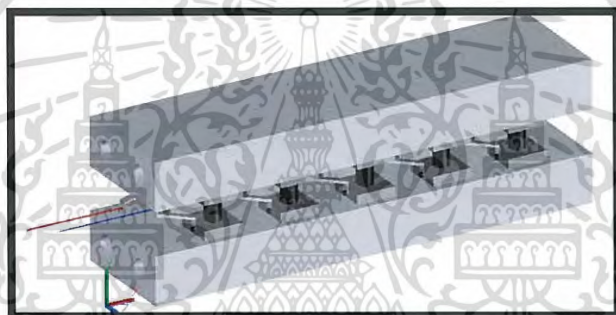
### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทที่ 4 นี้เป็นการเสนอผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลองของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

#### 4.1 ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน

ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนได้สร้างตามการออกแบบ โดยการสร้างต้นแบบนั้นได้คัดเลือกวัสดุของรางน้ำทั้งสองเป็นอลูมิเนียม ด้วยเหตุที่ว่าอลูมิเนียมมีสภาพนำความร้อนค่อนข้างดี, น้ำหนักเบา และราคาถูก

สำหรับรางน้ำจำเป็นต้องมีวาล์วในการควบคุมการไหลของน้ำเพื่อประโยชน์อย่างมากสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำ ต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 4.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) แบบจำลองต้นแบบ  
(ข) ต้นแบบที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดลองที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนและผลต่างอุณหภูมิ

การทดลองที่ 1 นี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะตัวต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนในด้านผลกระทบของผลต่างอุณหภูมิต่อความต้านทานภายในของต้นแบบ

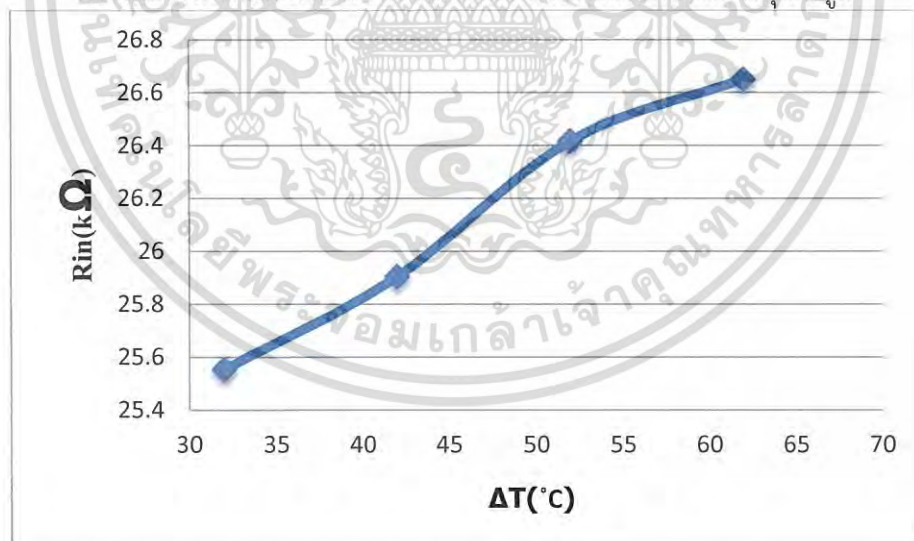
ความต้านทานภายในหาได้ผลหารระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกับกระแสไฟฟ้าปิดวงจร ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้กับโพลิตเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับผลต่างอุณหภูมิในแต่ละค่า ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง  $R_{in}$  กับ  $\Delta T$

$T_h(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$I_{sc}(uA)$	$V_{oc}(mV)$	$\Delta T(^{\circ}C)$	$R_{in}(k\Omega)$
60	28	1.4440	36.9	32	25.5540
70	28	1.6020	41.5	42	25.9051
80	28	1.8700	49.4	52	26.4171
90	28	2.0000	53.3	62	26.6500

จากผลการทดลองดังกล่าวได้ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายใน และผลต่างอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.2

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในกับผลต่างของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในกับผลต่างของอุณหภูมิ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในกับผลต่างของอุณหภูมิตั้งขึ้นให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าความต้านทานภายในของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามผลต่างอุณหภูมิ โดยลักษณะกราฟมีความเป็นสมการเส้นตรง แสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานภายในนั้นเปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้นด้วยผลกระทบจากผลต่างอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่าความต้านทานภายในเมื่อผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ 32, 42, 52 และ องศาเซลเซียส มีค่า 25.5540, 25.9051, 26.4171 และ 26.6500 กิโลโอห์มตามลำดับ และยังคงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจากพฤติกรรมดังกล่าวข้างต้นบ่งบอกได้ว่าสำหรับผลต่างอุณหภูมิค่าใดๆ จะมีค่าความต้านทานภายในเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างอุณหภูมินั้นๆ ตามหลักการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นเกิดเมื่อความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานโหลดเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เองต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนจึงต้องใช้ค่าโหลดที่เหมาะสมในการใช้งานหรือในการสะสมพลังงานไฟฟ้าก็ตาม

#### 4.3 การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของต้นแบบ และค่าความต้านทานโหลด ณ ผลต่างอุณหภูมิค่าต่างๆ

เนื่องจากต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นต้องอยู่บนเงื่อนไขของการส่งถ่ายกำลังสูงสุด การทดลองนี้เป็นการหาค่าโหลดที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับผลต่างอุณหภูมิตั้งแต่ 32, 42, 52 และ 62 องศาเซลเซียส

การหาค่ากำลังไฟฟ้านั้นหาได้จากผลคูณของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถอ่านได้จากแอมป์มิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ ด้วยเหตุนี้มีเตอร์และสายโพรบจึงมีผลต่อข้อมูลเป็นอย่างมาก ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 ถึง ตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง  $R_L$  กับ  $P_{out1}$  ที่ผลต่างอุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (น้ำร้อน 60 องศาเซลเซียสและน้ำอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส)

$R_L$ (k $\Omega$ )	$I_{out}$ (uA)	$V_{out}$ (mV)	$P_{out1}$ (nW)
0	1.1682	0.0	0.0000
10	0.8900	8.9	7.9210
20	0.7100	14.5	10.2950
30	0.5826	18.9	11.0111
40	0.4720	22.3	10.5256
50	0.4082	23.3	9.5111
60	0.3565	26.4	9.4116
70	0.3460	23.7	8.2002
80	0.3280	26.0	8.5280
90	0.2700	24.4	6.5880
100	0.2665	25.7	6.8491

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง $R_L$ กับ $P_{out2}$  ที่ผลต่างอุณหภูมิ42องศาเซลเซียส (น้ำร้อน70องศาเซลเซียสและน้ำอุณหภูมิห้อง28องศาเซลเซียส)

$R_L(k\Omega)$	$I_{out}(uA)$	$V_{out}(mV)$	$P_{out2}(nW)$
0	1.2080	0.0	0.0000
10	1.0016	10.0	10.0160
20	0.8012	16.0	12.8192
30	0.7179	21.5	15.4349
40	0.6425	25.8	16.5765
50	0.5546	29.4	16.3052
60	0.4928	31.2	15.3754
70	0.4698	32.7	15.3625
80	0.4244	35.1	14.8964
90	0.3839	36.8	14.1275
100	0.3778	37.0	13.9786

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง $R_L$ กับ $P_{out3}$  ที่ผลต่างอุณหภูมิ52องศาเซลเซียส (น้ำร้อน80องศาเซลเซียสและน้ำอุณหภูมิห้อง28องศาเซลเซียส)

$R_L(k\Omega)$	$I_{out}(uA)$	$V_{out}(mV)$	$P_{out3}(nW)$
0	1.5240	0.0	0.0000
10	1.1951	12.3	14.6997
20	0.9454	19.5	18.4353
30	0.8740	26.0	22.7240
40	0.7439	30.8	22.9121
50	0.6629	34.5	22.8701
60	0.5832	36.3	21.1702
70	0.5344	37.9	20.2538
80	0.4792	39.3	18.8326
90	0.4570	41.0	18.7370
100	0.4257	41.2	17.5389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

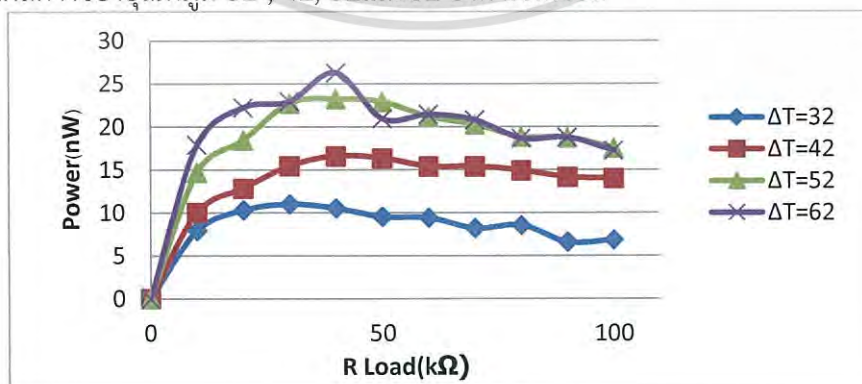
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นแบบระหว่าง  $R_L$  กับ  $P_{out4}$  ที่ผลต่างอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส (น้ำร้อน 90 องศาเซลเซียสและน้ำอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส)

$R_L$ (k $\Omega$ )	$I_{out}$ (uA)	$V_{out}$ (mV)	$P_{out4}$ (nW)
0	1.7430	0.0	0.0000
10	1.3450	13.3	17.8885
20	1.0480	21.2	22.2176
30	0.8560	26.8	22.9408
40	0.7700	34.1	26.2570
50	0.6420	32.6	20.9292
60	0.5950	36.0	21.4200
70	0.5410	38.4	20.7744
80	0.4843	38.5	18.6456
90	0.4570	41.0	18.7370
100	0.4180	41.2	17.2216

ผลการทดลองดังกล่าวสามารถบ่งบอกได้ว่าในแต่ละค่าผลต่างอุณหภูมิจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลดที่ค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าความต้านทานภายในของต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีเป็นอย่างมาก ค่าของความต้านทานโหลดที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดคือ 30, 40, 40 และ 40 กิโลโอห์ม ณ ผลต่างอุณหภูมิ 32, 42, 52 และ 62 องศาเซลเซียสตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าความต้านทานภายในไม่เท่ากันแต่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจาก 2 สาเหตุคือ 1) การที่ต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อนมีความร้อนสะสมอยู่ภายในมากขึ้น 2) ค่าของโหลดที่ปรับนั้นเป็นช่วงๆ อาจข้ามช่วงที่เท่ากับความต้านทานภายในนั่นเอง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานทางไฟฟ้าของต้นแบบ กับความต้านทานของโหลดค่าต่างๆ ที่ผลต่างของอุณหภูมิ 32, 42, 52 และ 62 องศาเซลเซียส



รูปภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโหลดค่าต่างๆกับกำลังงานทางไฟฟ้าของต้นแบบที่ผลต่างของอุณหภูมิ 32, 42, 52 และ 90 องศาเซลเซียส  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาไปขอปรึกษาเจ้าหน้าที่หน้าไปรษณีย์โครงการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ นั้น ยังทำได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเนื่องด้วยปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น ขั้นตอนการสังเคราะห์สารเทอร์โมอิเล็กทริก ที่ไม่ได้ทำการทดลองหลายเงื่อนไข วิธีการเชื่อมขั้วโลหะที่ยังใช้วิธีเผาที่อุณหภูมิสูงอยู่ทำให้เกิดออกไซด์เป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัด และอื่นๆ

##### 5.1.1 ผลการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้า

ผลการทดลองหาความเหมาะสมทางกายภาพของตัวต้นแบบพบว่า ค่าความต้านทานภายในเมื่อผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ 32, 42, 52 และ องศาเซลเซียสมีค่า 25.5540, 25.9051, 26.4171 และ 26.6500 กิโลโอห์มตามลำดับ

สภาพความเหมาะสมของการนำต้นแบบไปใช้งานที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ เป็นดังนี้ ค่าของความต้านทานโหลดที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดคือ 30, 40, 40 และ 40 กิโลวัตต์ ฝน ผลต่างอุณหภูมิ 32, 42, 52 และ 62 องศาเซลเซียสตามลำดับ

##### 5.1.2 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าสูงสุดของต้นแบบ ฝน ผลต่างของอุณหภูมิ 32, 42, 52 และ 62 องศาเซลเซียส คือ 11.01114, 16.5765, 22.9121 และ 26.257 วัตต์ตามลำดับ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

สารที่ใช้ในการสังเคราะห์ควรมีความบริสุทธิ์ เพื่อที่จะได้นำไปใช้ในขั้นตอนต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาทิเช่น ขั้นตอนการเผาสารจากงานวิจัยนี้ไม่สามารถเผาสารในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมตามคุณสมบัติของสารได้เนื่องจากสารเกิดการหลอมเหลวก่อนที่จะถึงระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม

ในขั้นตอนการสังเคราะห์สารเทอร์โมอิเล็กทริก รวมไปถึงการประกอบเป็นโมดูล คาดหวังว่าในอนาคตอยากให้มีความรู้วิธีการและเครื่องมือที่มีความเหมาะสมและประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลงานในการวิจัยมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

ทศวรรษ สีตะวัน. 2558. เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 1-39.

เฉลิมพล รุจรดาวงค์. 2557. ศึกษาสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของสารประกอบดีลาฟอสไฟต์  $\text{CuFe}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_2$  ( $x=0.00-0.05$ ). วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1-64.

Thailand Energy and Environment Network Chiang Mai University. ผลการสำรวจแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพทางภาคเหนือของประเทศไทย.[Online]. Available: <http://teenet.cmu.ac.th/sci/survey01.php>.

บริษัท เอสอี เพอร์เฟค วัน จำกัด. 2551. หลักการทำงานของ Ball mill. [Online]. Available: <http://secuttingtool.blogspot.com/2013/02/ball-mill.html>.

ข่าวสารคณะวิทยาศาสตร์ มทจร. 2552. วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.[Online]. Available: <http://webstaff.kmutt.ac.th/~ivorthip/TE/>

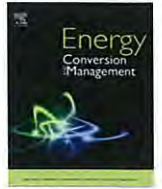
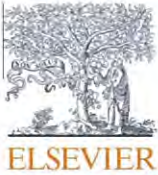
HayatiMamur, RasitAhiska. 2014. “Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators.” Energy Conversion and Management. 265-272.

Jiji, Latif M. 2009. Heat Conduction. Third Edition. New York USA. Springer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# Application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators



Hayati Mamur<sup>a,\*</sup>, Rasit Ahiska<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Cankiri Karatekin University, 18100 Cankiri, Turkey

<sup>b</sup> Department of Physics, Faculty of Science, Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 18 September 2014

Accepted 19 March 2015

Available online 2 April 2015

### Keywords:

DC–DC power converters

Energy conversion

Maximum power point trackers

Thermoelectric generator

Waste heat

## ABSTRACT

Thermoelectric generators (TEGs) directly generate electrical power from the geothermal/waste heat as well as contribute to efficient usage of the energy. TEGs cannot be operated at full capacity without additional electronic equipments, since the internal resistances of TEGs are not equal to the device resistances connected across TEGs. For this reason, in this paper, the application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking (MPPT) based on microcontroller embedded in perturb and observe (P&O) algorithm has been proposed to obtain maximum power from a newly designed portable TEG (pTEG) in a real TEG system. The matched condition load for the pTEG has been experimentally investigated. Firstly, the pTEG has been directly charged to the battery pack, secondly it has been charged through the improved converter with MPPT. In the first one, the pTEG operated with less efficiency than half of its full capacity, whereas, in the second, the pTEG operated efficiency near its full capacity.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Thermoelectric generators (TEGs) are renewable energy devices made of a semiconductor that directly convert the temperature difference between surfaces into electrical energy [1]. Advantages of TEGs are silent operation, long lasting, environmentally friendly, stable work, have no moving parts, and do not require maintenance. However, they have some disadvantages such as low efficiency (<10%) and high cost [2]. Their operating principle is based on the Seebeck effect [3]. The basic structure of TEGs is formed by p- and n-type semiconductor thermoelements (TEs) [4]. TEs are connected electrically in a serial manner to increase the output voltage of the TEG and connected thermally in parallel to decrease the thermal resistance of the TEG [5].

The structure and the equivalent circuit of a TEG have been given, in Fig. 1. A TEG consists of hot and cold ceramic surfaces, TEs, and metal interconnections [6]. In Fig. 1a, when a temperature difference ( $\Delta T$ ) between the hot and cold surfaces of a TEG occurs, a voltage across the TEG is generated. The voltage is called the open circuit voltage ( $V_{OC}$ ) of the TEG [7]. The voltage ( $V_{OC}$ ) gets the highest value, when there is not any load across the TEG and the highest temperature difference ( $\Delta T = T_H - T_C$ ) between the hot ( $T_H$ ) and cold ( $T_C$ ) surfaces of the TEG occurs. If the temperature difference

( $\Delta T$ ) is kept a constant value and then a load ( $R_L$ ) is connected across the TEG as shown in Fig. 1b, the value of the obtained power from the TEG ( $P_{TEG}$ ) depends on the value of the load [8]. As the load ( $R_L$ ) connected across the TEG increases, the output voltage ( $V_O$ ) of the TEG increases, and the output current ( $I_O$ ) decreases. The output current ( $I_O$ ) is maximum value, when the load resistance ( $R_L$ ) equals zero, and this is called a short circuit current ( $I_{SC}$ ) [9,10].

In Fig. 2, the voltage–current, the voltage–power and the maximum power point (MPP) characteristic curves have been given at a certain temperature differences ( $\Delta T$ ) depending on the variation of the load resistance ( $R_L$ ) of the TEG [6]. The internal resistance ( $R_{in}$ ) of the TEG also varies nonlinearly depending on the temperature difference ( $\Delta T$ ) between the surfaces [11]. When Fig. 2 is carefully examined, the generated maximum power ( $P_{TEG\_MAX}$ ) of the TEG achieves half value of the short circuit current ( $I_{SC}$ ) or the open circuit voltage ( $V_{OC}$ ). Depending on variation of the load resistance ( $R_L$ ), the current and the voltage changes of the TEG is linear [12]. For the various temperature differences ( $\Delta T$ ), the values obtained maximum powers from the TEG are shown by a dashed line, in Fig. 2. The junction points crossing the power curves with the MPPT curve are called the matched load [13]. In this instance, the internal resistance ( $R_{in}$ ) of the TEG equals the load resistance ( $R_L$ ) connected to across the TEG ( $R_{in} = R_L$ ) [9].

The output voltage ( $V_O$ ) of the TEG continually varies depending on the temperature difference ( $\Delta T$ ) between the surfaces of the

\* Corresponding author.

E-mail address: [hmamur@karatekin.edu.tr](mailto:hmamur@karatekin.edu.tr) (H. Mamur).

## Nomenclature

$C_h$	specific heat capacity of hot fluid at stable pressure
$I_{MPP}$	maximum power point current of TEG (A)
$I_{SC}$	short-circuit current of TEG (A)
$I_O$	output current of TEG (A)
$G_h$	hot fluid volume flow
$P_{input}$	input power of TEG (W)
$P_{lost}$	lost power of TEG (W)
$P_{output}$	output power of TEG (W)
$P_{TEG}$	power of the TEG (W)
$P_{TEG\_MAX}$	maximum power of TEG (W)
$R_{in}$	internal resistance of TEG ( $\Omega$ )
$R_L$	load resistance of TEG ( $\Omega$ )
$T_c$	cold-side temperature of TEG ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_h$	hot-side temperature of TEG ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V_{MPP}$	maximum power point voltage of TEG (V)
$V_{OC}$	open-circuit voltage of TEG (V)
$V_O$	output voltage of TEG (V)

### Greek symbols

$\alpha$	thermoelectric material Seebeck coefficient
$\Delta T$	temperature difference ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta t_h$	temperature decrease of hot fluid in the fluid passage
$\eta_{geo}$	geothermal energy conversion efficiency of TEG
$\eta_{ope}$	operating efficiency of TEG
$\rho_h$	hot fluid density

### Abbreviation

ADC	analog digital convertor
C	comparator
MPP	maximum power point
MPPT	maximum power point tracking
MSB	most significant bits
PIC	peripheral interface controller
P&O	perturb and observe
PV	photovoltaic
PWM	pulse width modulation
pTEG	portable thermoelectric generator
TE	thermoelement
TEG	thermoelectric generator
$\mu\text{C}$	microcontroller

TEG [14]. Yet, the devices connected to across the TEG have to operate at the same constant voltage. Furthermore, the internal resistance ( $R_{in}$ ) of the TEG and the load resistance ( $R_L$ ) of the device are not always the same [15]. In this case, the maximum power can also not be taken from the TEG. Therefore, a DC–DC convertor with MPPT is employed for the constant output voltage and the maximum power [16].

In the presented study, the application of a DC–DC boost convertor with MPPT based on perturb and observe (P&O) algorithm has been carried out for charging the battery pack at a maximum value by the generated power of the TEG. A portable TEG (pTEG) previously developed for low geothermal/waste temperature in Ref. [6] has been employed as the energy resource of the convertor. The open circuit voltage of the pTEG has been 51.5 V, and the short circuit current has been 3.1 A, when the temperature difference ( $\Delta T$ ) of the surfaces of the employed pTEG is 67  $^{\circ}\text{C}$ .

This paper has been organized as follows. 'Implemented MPPT principles and applications in TEGs' have been explained in Section 2. In Section 3, 'TEG power management equations' has been given. Then, the hardware and software of the setup have been described in Section 4. After that the obtained data and

results have been discussed in Section 5. Consequently, application outcomes of the DC–DC boost convertor with MPPT for pTEG have been given in Section 6.

## 2. Implemented MPPT principles and applications in TEGs

It is desired that the TEG should ensure both the constant voltage and the maximum power to the connected load ( $R_L$ ) [17]. However, owing to several reasons – such as the continually changing loads ( $R_L$ ) [18], the variations output voltage of the TEG depending on the temperature difference ( $\Delta T$ ) [19], which is expressed Eq. (3) – this situation cannot occur. Therefore, to solve this problem, different DC–DC converters with MPPT are employed between the load and the resource [20].

### 2.1. Principle of MPPT

In Fig. 3(a) a DC–DC boost convertor, and (b) the principle of MPPT are presented. As shown in Fig. 3a, the DC–DC boost convertor basically consists of an inductor ( $L$ ), a diode ( $D$ ), a switch

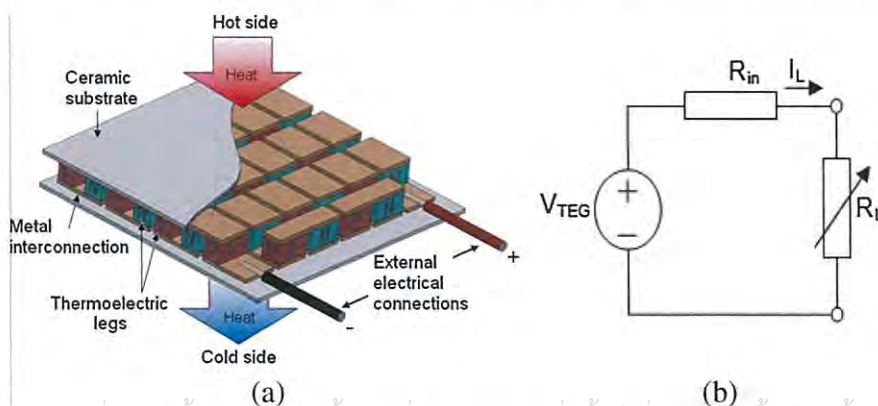


Fig. 1. (a) The structure, and (b) the equivalent circuit of a TEG.

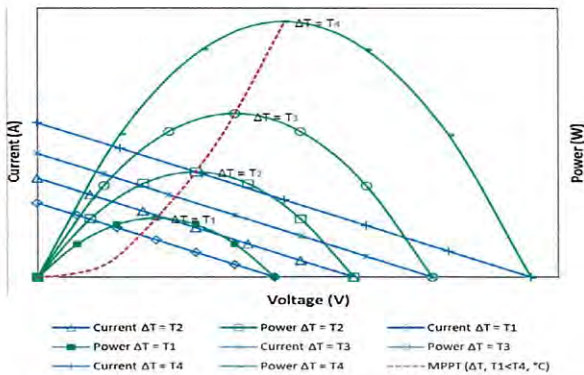


Fig. 2. The voltage–current, the voltage–power and the MPP characteristic curves at a certain temperature differences ( $\Delta T$ ).

(S). When the switch is closed, the inductor stores the current. When the switch is open, the inductor delivers the current to the load. When the inductor stores the current, the current comes from the TEG. Virtually, the inductor is the load of the TEG. The load becomes a programmable current by making programmable the current stored in the inductor. This is the principle of how the DC–DC boost converter with MPPT operates, and this principle has been given in Fig. 3b.

Some important features have to be given attention for operating the TEG at the MPP. (a) To know the output power of the TEG, both the output voltage and current have to be tracked. (b) For the output power control, the output current of the TEG has to be changed. (c) To know whether or not the current increases/decreases, a software algorithm has to be employed.

## 2.2. MPPT algorithms and TEG applications

By making a programmable load connecting to a TEG, various algorithms and converter circuits have been improved for tracking the MPP. Most of these have been optimized from algorithms and converter circuits of the photovoltaic (PV) panels executed to obtain MPP [21]. On the basis of these algorithms, it is that load resistance with internal resistance is equalized. In order to accomplish this, the coil current of the converter must be made programmable by these algorithms such as constant voltage or fractional open circuit voltage, fractional short circuit current, incremental conductance, fuzzy logic and neural networks, variation tolerant and P&O methods [12,17,22,23].

In the constant voltage or fractional open circuit voltage method, a standard voltage reference is used for the MPP of a TEG. The TEG is separated from the converter at regular intervals and the open circuit voltage is then measured. The MPP equals to half of the open circuit voltage due to the characteristics of the TEG [22]. The fractional short circuit current method is very similar to the fractional open circuit voltage method. The method uses short circuit current of the TEG. The MPP also equals to half of the short circuit current [24]. Determination of the MPP in the incremental conductance method is employed the derivative power to voltage ( $dP/dV = 0$ ). If the derivative equals to zero, the MPP is obtained. If the derivative is greater than zero, the operation voltage is less than the MPP. If the derivative is less than zero, the operation voltage is greater than the MPP [12]. The fuzzy logic and neural networks method is carried out on complex systems, in which there are not any mathematical model of the system [23]. The variation-tolerant technique is also employed by adaptive control of the switching frequency [17]. Even though there are several MPPT methods, P&O method is more common in terms of human thought.

Each of the algorithms mentioned above is embedded a controller in a converter. These converters are employed for both voltage regulation and MPPT in TEGs. In this context, an application specific DC–DC converter for the small TEG system has been realized through P&O algorithm in Ref. [11]. The circuit with MPPT has charged with 15% more efficiency than the direct charging of the battery pack. Besides these studies, Ref. [15] has compared the direct charging to the charging with MPPT for a small scale electricity generation. As a result of Ref. [15], the charging with MPPT using open circuit voltage algorithm has generated 1.187 W, whereas the direct charging has generated 0.68 W from the TEG. In Ref. [24], a converter has been also enhanced for taking more efficiency from the TEG and then the fractional short circuit algorithm has been operated better than the other algorithm. In Ref. [16], a MPPT algorithm with a current sensing has been improved for constant load and obtained the power of 0.36 W at the temperature difference of  $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ .

Today, TEGs are being used for both geothermal and waste heats with converters with MPPT. In this connection, Sasaki et al. designed and manufactured a TEG having 1 kW with  $95^\circ\text{C}$  hot spring water and  $15^\circ\text{C}$  mountain water [25]. Liu et al. carried out a TEG of 500 W used geothermal/waste areas. They obtained an output power over 150 W from the TEG at the temperature difference  $80^\circ\text{C}$  [26]. For waste heat recovery, Weng et al. carried out a study of using a TEG to harvest energy from a table lamp [27]. Bonin et al. tested a TEG employed autonomous sensors placed in remote environmental locations [28]. Shi et al. designed and fabricated a self-powered wireless temperature sensor for a power supply by using four TEGs [29].

A novel self-powered wireless temperature sensor has been designed and presented for solving the power supply problem of temperature sensors.

The internal resistance ( $R_{in}$ ) of a TEG system varies with temperature. As temperature in the system increases, the internal resistance ( $R_{in}$ ) of the TEG increases. Therefore, the variation should be taken into account in the converter circuits with MPPT in the TEG system. In some carried out studies, a power supply has been operated to simulate as a TEG. However, this does not constitute a real TEG system. In the study, performance of a boost converter with MPPT in a real geothermal TEG system has been presented in detail.

## 3. TEG power management equations for MPPT

The obtained power ( $P_{TEG}$ ) from the TEG can be calculated by multiplying the output current ( $I_o$ ) and voltage ( $V_o$ ) and is expressed by the below equation:

$$P_{TEG} = V_o I_o. \quad (1)$$

The internal resistance ( $R_{in}$ ) of the TEG is the rate of the open circuit voltage ( $V_{OC}$ ) to the short circuit current ( $I_{SC}$ ) and is given as below [6]:

$$R_{in} = V_{OC}/I_{SC}. \quad (2)$$

The open circuit voltage ( $V_{OC}$ ) of the TEG is directly proportional to both Seebeck constant ( $\alpha$ ) and the temperature difference ( $\Delta T$ ), and it is expressed by [28]:

$$V_{OC} = \alpha \Delta T. \quad (3)$$

When a load ( $R_L$ ) is connected to the TEG, the output current of the TEG is obtained from the below equation [30]:

$$I_o = (V_{OC} - V_o)/R_{in}. \quad (4)$$

If Eq. (4) is substituted in Eq. (1), the obtained power from the TEG ( $P_{TEG}$ ) is only represented by the voltages and the internal resistance and is given as the below equation:

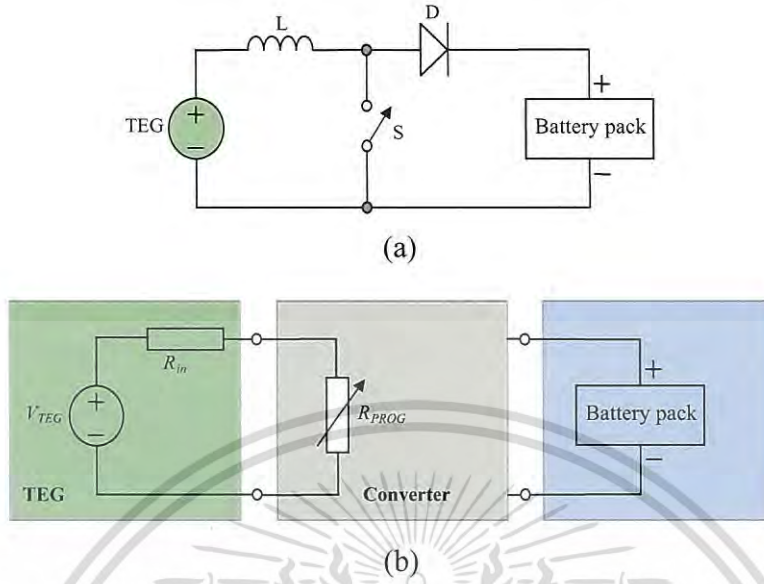


Fig. 3. (a) A DC–DC boost converter, and (b) the principle of MPPT.

$$P_{TEG} = V_O(V_{OC} - V_O)/R_{in}. \tag{5}$$

Then, the MPP is obtained when the derivated power from pTEG over  $V_O$  is equal to zero. If the derivative of Eq. (5) is taken with reference to the output voltage at the MPP, the MPP is attained, and is defined by:

$$\left. \frac{dP}{dV_O} \right|_{max} = \frac{V_{OC} - 2V_O}{R_{in}} = 0. \tag{6}$$

Hence, the output voltage of the TEG at the MPP ( $V_{O|MAX}$ ) is half of the open circuit voltage, and is expressed [31]:

$$V_{O|MAX} = V_{OC}/2. \tag{7}$$

If Eq. (7) is substituted in Eq. (5), the obtained maximum power ( $P_{TEG\_MAX}$ ) from the TEG is calculated by the below equation:

$$P_{TEG\_MAX} = V_{OC}^2/4R_{in}. \tag{8}$$

Moreover, if Eq. (2) is substituted in Eq. (8), the obtained maximum power ( $P_{TEG\_MAX}$ ) from the TEG is only represented by the short circuit current ( $I_{SC}$ ) and the internal resistance ( $R_{in}$ ), and it is given by the below equation:

$$P_{TEG\_MAX} = I_{SC}^2 R_{in}/4. \tag{9}$$

In addition to these, since the current and the voltage of the TEG linearly vary depending on the load ( $R_L$ ), the MPP can be tracked by half the value of the current ( $I_{MPP}$ ) and the voltage ( $V_{MPP}$ ) as shown in Fig. 2. It can be expressed as the below equation [32]:

$$V_{MPP} = V_{O|MAX} = V_{OC}/2 \tag{10}$$

or

$$I_{MPP} = I_{O|MAX} = I_{SC}/2. \tag{11}$$

Also, the maximum power ( $P_{TEG\_MAX}$ ) of the TEG can be clarified by the short circuit current ( $I_{SC}$ ) and the open circuit voltage ( $V_{OC}$ ). It is given by:

$$P_{TEG\_MAX} = V_{OC} I_{SC}/4. \tag{12}$$

The heat absorbed ( $Q_h$ ) of a TEG applied in a geothermal area is expressed by [6]:

$$Q_h = G_h \rho_h C_h \Delta t_h, \tag{13}$$

where  $G_h$  is the hot fluid volume flow,  $\rho_h$  is the hot fluid density,  $C_h$  is the specific heat capacity of hot fluid at stable pressure and  $\Delta t_h$  is the temperature decrease of hot fluid in the fluid passage. Therefore, the geothermal energy conversion efficiency ( $\eta_{geo}$ ) of the TEG is given by:

$$\eta_{geo} = P_{TEG}/Q_h. \tag{14}$$

An operating efficiency ( $\eta_{ope}$ ) of the TEG with both direct connection and the DC–DC boost converter with MPPT is expressed by the output power ( $P_{TEG}$ ), which is given to battery pack, to the maximum power ( $P_{TEG\_MAX}$ ) to be obtained in the matched condition load and is given by [33]:

$$\eta_{ope} = (P_{TEG}/P_{TEG\_MAX}). \tag{15}$$

Eventually, for tracking the MPP of the TEG, if the P&O or the incremental conductance methods will be employed, the output current ( $I_O$ ) and the voltage ( $V_O$ ) have to be continually tracked. If the fractional open circuit voltage method will be employed, the open circuit voltage ( $V_{OC}$ ) has to be continually tracked. If the fractional short circuit current method will be employed, the short circuit current ( $I_{SC}$ ) has to be continually tracked.

### 4. Experimental setup and method

#### 4.1. Hardware

An experimental setup is consisted of (a) a pTEG with all properties analyzed in Ref. [6], (b) a DC–DC boost converter with MPPT, and (c) a battery pack consisting of two batteries of 12 V connected in series. The experimental setup has been also given in Fig. 4.

Firstly, for charging the battery pack, the pTEG has been directly connected to the battery pack. Then, the pTEG has been connected to the battery pack via a DC–DC boost converter with MPPT. A microcontroller ( $\mu C$ ) being peripheral interface controller (PIC) PIC16F628A of Microchip Company has been employed to manage the DC–DC boost converter with P&O algorithm embedded in the PIC and other all controls. IRFZ44N has been operated as switch. The switch has been driven with pulse width modulation (PWM) of 20 kHz of the PIC. The inductor has been also used 33  $\mu H$ .

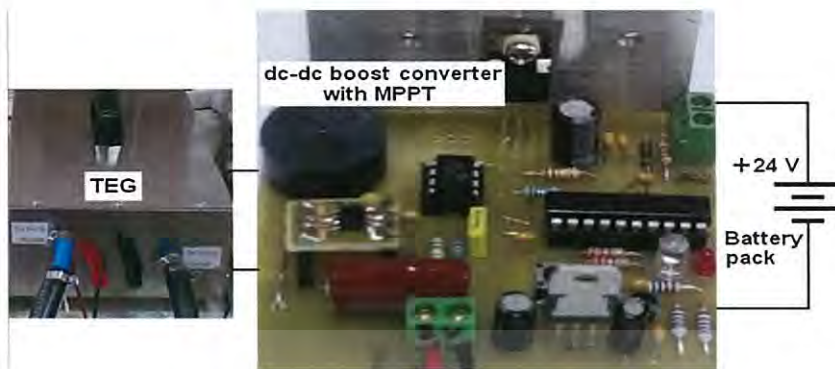


Fig. 4. The experimental setup.

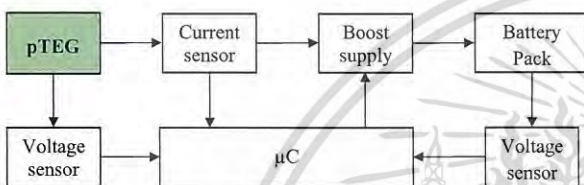


Fig. 5. The block diagram of the experimental setup.

The instant current drawn from the TEG has been sensed by a current sensing resistance of 10 mΩ, and has been transmitted to the PIC through a MAX4143 integrated circuit. A voltage divider rating by 1/5 has been used to sense the output voltage of the pTEG. The block diagram of the system has been illustrated in Fig. 5.

#### 4.2. Software

By knowing the current sensing resistance and its voltage, the current in the inductor has been calculated. The value of the current sensing resistor has been on purposefully kept at a low value to not affect the efficiency of the converter. The analog current and voltage values have been converted into digital by the analog digital converter (ADC) and then the obtained power from the pTEG has been calculated in PIC.

The output power control of the pTEG has been executed by changing the output current of the pTEG. For this purpose, the voltage reference of first comparator,  $C_1$ , of the PIC has been utilized. The increase or decrease of current of the pTEG has been independently provided from the voltage of the pTEG by making programmable reference. A RC filter interact the PWM of the PIC has been utilized for applying the programmable voltage reference.

The second comparator,  $C_2$ , of the PIC has been employed to protect the battery pack from over voltage. The positive input of the  $C_1$  has been connected to the output of the voltage divider by 1/7 at the converter output. Then, the negative input of the  $C_1$  has been connected to the internal voltage reference producing the supply voltage by 3/4. When the over voltage is occurred, the high output of the  $C_2$  has driven the output of the  $C_1$  to ground.

In order to control the converter with MPPT, the developed software has been divided into two parts: (a) a main program algorithm managing the interrupt routine, and (b) a current reduction algorithm. The main program algorithm and the current reduction algorithm have been given in Figs. 6 and 7, consecutively. Each algorithm has varied the current of the pTEG through the programmable voltage reference that has been generated by the PWM of the PIC. The output current of the pTEG has been

linearly scaled with reference to the PWM by arranging the duty cycle of the PWM of the PIC. The PWM duty cycle dividing into 256 different values to the output current of the pTEG has been only utilized 8 most significant bits (MSB).

The control of whether to increase or decrease the output power with reference to the former output power of the pTEG has been carried out in the main program. The proportional output power of the pTEG has been calculated by multiplying the duty cycle of the PWM and the output voltage of the pTEG. To simplify, 8 MSB of the duty cycle of the PWM has been multiplied by 8 MSB of ADC reading the output voltage of the pTEG. The crucial point of the main program is whether increase or decrease of power has been done, due to the changing current. When the power increased, the current has been increased as pointed out by the direction flag. When the power is decreased, the direction flag has been cleared, and then the current has been adjusted in the opposite way as pointed out by the direction flag.

The current reduction algorithm is to make the boost converter as efficient as possible. If the over voltage protection circuit is enabled, this indicates that the excessive power from pTEG is being taken. While the main program algorithm is being taken out the maximum power from the pTEG, the current reduction algorithm has reduced the current extracted from the pTEG. This algorithm has not been operated unless the over voltage condition determining the  $C_2$  interrupt. If  $C_2$  interrupt occurs, the hardware has been disabled. The current extracted from the pTEG has been softly decreased by the current reduction algorithm. When the over voltage is disappeared, the increase of current has been softly restarted the algorithm. Both the current reduction algorithm and the main program algorithm have been optimized the power of the pTEG.

When the  $C_1$  comparator is operated, the interrupt of the  $C_1$  comparator has been set. An interrupt is triggered by any change of the comparators. If the interrupt of the  $C_1$  comparator is activated, a main flag is set in the current reduction algorithm. Then the interrupt of the  $C_1$  comparator is disabled in the current reduction algorithm. The main flag has been only used in the main program algorithm. At the end of the main program algorithm, the main flag is cleared. The high current status extracted from the pTEG, which could not provide a condition, has been prevented by the interrupt.

## 5. Experimental results and discussion

### 5.1. pTEG having variable load

Characterization of pTEG has been obtained by a variable load ( $R_L$ ), which is of 100 Ω, in Ref. [6]. In pTEG system, a hot water inlet provided from a hot–cold water circulator system and a cold water

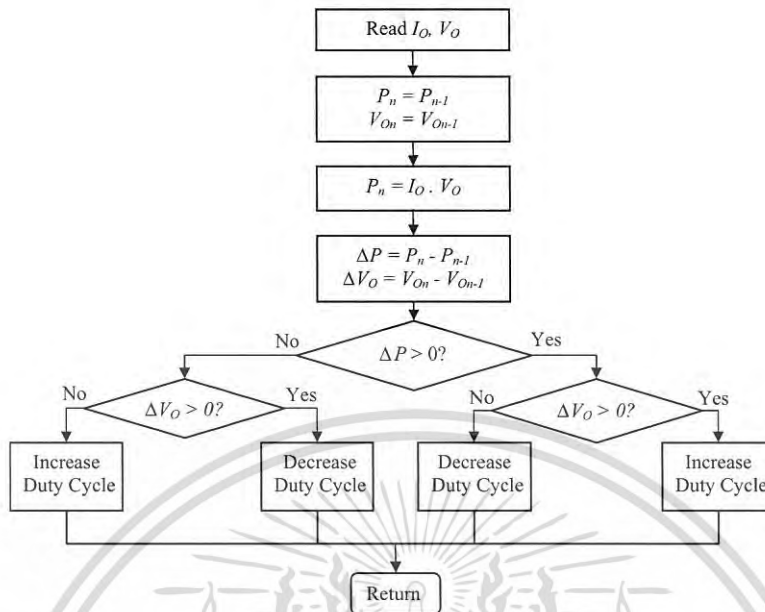


Fig. 6. The main program algorithm.

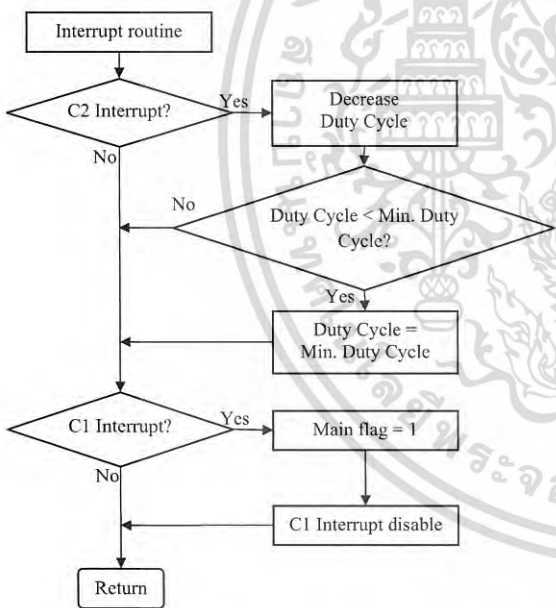


Fig. 7. The current reduction algorithm.

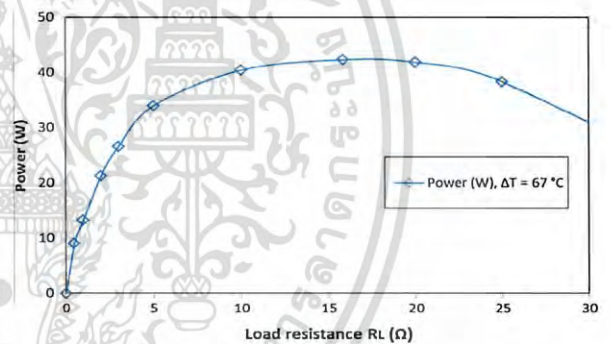


Fig. 8. The temperature difference and the hot–cold water flows are constant, the obtained power of the pTEG as a function of the load resistance.

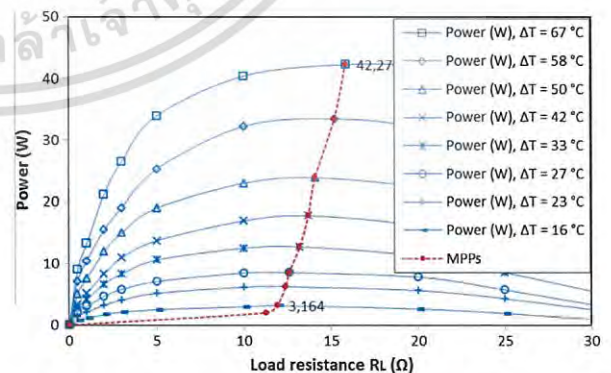


Fig. 9. The experimentally obtained curve of the MPPs as a function of the temperature difference.

inlet provided from running water have been employed for geothermal energy application [7]. The temperature of the hot surface of the pTEG system has been reached from about 25 °C to 82 °C and the temperature of the cold surface through the running water has been decreased until about 15 °C. Then a temperature difference of  $\Delta T = 67^\circ\text{C}$  has been achieved. In this status, the power values ( $P_{TEG}$ ) of pTEG have been taken by changing of the variable load ( $R_L$ ) as shown in Fig. 8. For the situation, it is seen that the MPP has been attained in 15.84  $\Omega$  when Fig. 8 is examined in detail. If the temperature difference ( $\Delta T$ ) is raised through the hot–cold water flows, the obtained power ( $P_{TEG}$ ) would increase linearly in pTEG system.

As the temperature difference ( $\Delta T$ ) is changed, the MPP would change up and down. The experimentally obtained curve of the

MPPs as a function of the temperature difference ( $\Delta T$ ) of pTEG has been given in Fig. 9. The MPPs have varied from 11.25  $\Omega$  to 15.84  $\Omega$  depending on the temperature difference ( $\Delta T$ ) from 16 °C to 67 °C.

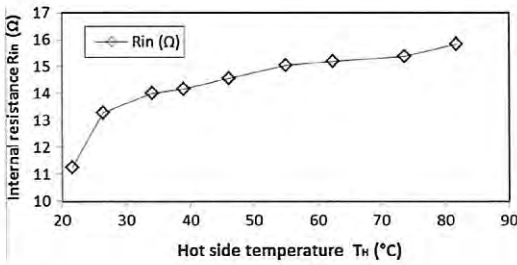


Fig. 10. The experimentally obtained internal resistance curve as a function of the hot side temperature.

Up and down variation of the MPP would be caused by not only the load ( $R_L$ ), but also the temperature change ( $\Delta T$ ). As the temperature difference ( $\Delta T$ ) varies, the internal resistance ( $R_{in}$ ) of pTEG varies. Therefore, the variation of the internal resistance ( $R_{in}$ ) of pTEG is known for a convertor circuit with MPPT. The experimentally obtained internal resistance curve as a function of the hot side temperature of pTEG has been given in Fig. 10. The internal resistance ( $R_{in}$ ) of pTEG has been measured in 11.25  $\Omega$  at ambient temperature of 21.7  $^{\circ}\text{C}$ . Depending on the hot side temperature, the value has reached until 15.84  $\Omega$ .

In Figs. 9 and 10, while the MPP has been varying from about 0 W to 42 W, the internal resistance ( $R_{in}$ ) of pTEG has varied from about 11.2  $\Omega$  to 15.8  $\Omega$ . These variations affects to the obtained output power of pTEG. Thus, pTEG must be operated with a DC–DC convertor circuit with MPPT in order to produce more efficiency from it. The geothermal efficiency of pTEG has been given in Fig. 11. While the efficiency has been obtaining about  $\eta_{geo} = 2.8\%$  at temperature difference about 50  $^{\circ}\text{C}$ , the efficiency has been about  $\eta_{geo} = 4\%$  at temperature difference about 67  $^{\circ}\text{C}$ . The efficiency of TEGs can be increased by both the temperature difference and employing modules having a higher figure of merit.

5.2. pTEG having a DC–DC boost convertor with MPPT and battery

The experimental studies of the DC–DC boost convertor with MPPT have been performed on the pTEG in Ref. [6]. In Ref. [6], while the temperature difference between the surfaces of the pTEG is obtained  $\Delta T = 67^{\circ}\text{C}$ , the experiments of the DC–DC boost convertor with MPPT have been fulfilled. In this case, the short circuit current and the open circuit voltage have been measured  $I_{SC} = 3.25\text{ A}$  and  $V_{OC} = 51.5\text{ V}$ , respectively. Data of pTEG and the convertor have been taken with the help of a test system and supervisory control and data acquisition application with programmable logic controller for thermoelectric generators in Ref. [7]. According to these data, the internal resistance of the pTEG has been calculated  $R_{in} = 15.84\ \Omega$  from Eq. (2). Then,  $V_{MPP}$  and  $I_{MPP}$

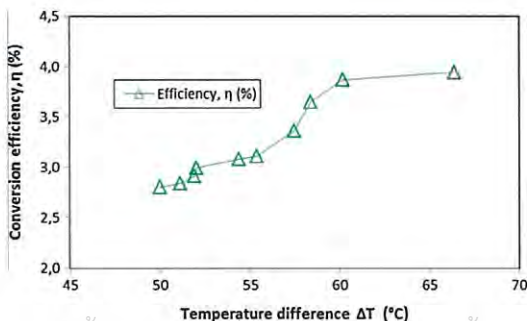


Fig. 11. The efficiency of pTEG as a temperature difference.

Table 1 Steady state performance results of the direct charging and the charging with MPPT.<sup>a</sup>

Variables	Units	Direct charging	With MPPT
$P_{TEG\_MAX}$ (input)	W	41.8	41.8
$V_O$	V	24.12	26.49
$I_O$	A	0.95	1.45
$P_{TEG}$ (output)	W	22.91	38.41
$P_{lost}$	W	18.89	3.39
$\eta_{ope}$	%	55	92

<sup>a</sup> In Ref. [6], while the temperature difference between the surfaces of the pTEG is obtained  $\Delta T = 67^{\circ}\text{C}$ , the experiments of the DC–DC boost convertor with MPPT have been fulfilled.

have been found at about 25.75 V and 1.62 A from Eqs. (10) and (11), respectively. The theoretical maximum power has been achieved about  $P_{TEG\_MAX} = 41.8\text{ W}$  from Eqs. (8), (9) or (12).

The experimental studies have been conducted by two different connections in pTEG; (a) the pTEG has been connected to the battery pack directly, and (b) the DC–DC boost convertor with MPPT has been connected between the pTEG and the battery pack.

Firstly, the pTEG has been connected to the battery pack directly. When the steady state is occurred, the output voltage and the current have been measured as  $V_O = 24.12\text{ V}$  and  $I_O = 0.95\text{ A}$ . From Eq. (1), the obtained output power of the pTEG has been found to be  $P_{TEG} = 22.91\text{ W}$ . While the maximum power of the pTEG is about 41.8 W, the given power to the battery pack has been taken place 22.91 W. The decrease is because of mismatch of the pTEG internal resistance and the load resistance ( $R_{in} \neq R_L$ ). According to the theoretical maximum power of the pTEG to be obtained, the operating efficiency of pTEG has been calculated as about  $\eta_{ope} = 55\%$  from Eq. (15).

Secondly, when the DC–DC boost convertor with MPPT is connected between the pTEG and the battery pack, data has been taken. When the steady state is occurred,  $V_O$  and  $I_O$  giving the convertor to the battery pack have been measured as 26.49 V and 1.45 A, respectively. Then, the output power and the operating efficiency of the pTEG have been calculated as about  $P_{TEG} = 38.41\text{ W}$  and about  $\eta_{ope} = 92\%$  from Eqs. (1) and (15), respectively. The efficiency value also equals to the convertor efficiency. The results of two implementations have been given together in Table 1.

In the fulfilled first connection, the obtained power has been few than the theoretical power. The lost power ( $P_{lost}$ ) or unused power of pTEG has been not used about 18.89 W ( $P_{lost} = P_{TEG\_MAX} - P_{TEG}$ ). The value has been about half of the theoretical power. In the second set, the pTEG has been almost employed at full capacity. 3.39 W has been not used. The power has been consumed by the convertor. When the convertor is connected to the pTEG, the matching load condition has been realized ( $R_{in} = R_L$ ). In this case, the entire power of the pTEG should be given to the battery pack. However, the entire power has not been given to the battery pack because of convertor power losses.

6. Conclusions

This paper has presented the charging differences between a direct charging and a DC–DC boost convertor with MPPT for charging a battery group of a pTEG in a real geothermal TEG system. Therefore, the variation of the internal resistance of pTEG being more sensitive to temperature and varying depending on the temperature difference has been taken into account. The application of a DC–DC boost convertor with PIC16F628A microcontroller embedded in P&O MPPT algorithm has been carried out. Firstly, when the pTEG is connected to the battery group directly, the operating efficiency of the pTEG has been about 55%. Secondly, when the pTEG is connected to the battery group through the

converter, the operating efficiency of the pTEG has been about 92%. For TEG systems, the obtained results show that usage of DC–DC boost converters with MPPT is more suitable than directly connecting to a battery pack.

### Acknowledgement

This research is sponsored by NATO's Public Diplomacy Division in the framework of "Science for Peace" (NATO.NUKR.SFPP 984536).

### References

- [1] Mamur H. A data acquisition and test system for investigation of electrical, thermoelectric and heat parameters of thermoelectric generator. PhD. Ankara, Turkey: Gazi University; 2013.
- [2] Ahiska R, Mamur H, Ullis M. Modelling and experimental study of thermoelectric module as generator. *J Fac Eng Archit Gazi Univ* 2011;26:889–96.
- [3] Zhao M, Zhang H, Hu Z, Zhang Z, Zhang J. Performance characteristics of a direct carbon fuel cell/thermoelectric generator hybrid system. *Energy Convers Manage* 2015;89:683–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.035>.
- [4] Ahiska R, Mamur H. A review: thermoelectric generators in renewable energy. *Int J Renew Energy Res* 2014;4:128–36.
- [5] Riffat SB, Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Appl Therm Eng* 2003;23:913–35. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7).
- [6] Ahiska R, Mamur H. Design and implementation of a new portable thermoelectric generator for low geothermal temperatures. *IET Renew Power Gen* 2013;7:700–6. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2012.0370>.
- [7] Ahiska R, Mamur H. A test system and supervisory control and data acquisition application with programmable logic controller for thermoelectric generators. *Energy Convers Manage* 2012;64:15–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.05.010>.
- [8] Lesage FJ, Pagé-Potvin N. Experimental analysis of peak power output of a thermoelectric liquid-to-liquid generator under an increasing electrical load resistance. *Energy Convers Manage* 2013;66:98–105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.001>.
- [9] Liu X, Deng YD, Li Z, Su CQ. Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application. *Energy Convers Manage* 2015;90:121–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.015>.
- [10] Hsu CT, Huang GY, Chu HS, Yu B, Yao DJ. Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators. *Appl Energy* 2011;88:1291–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.005>.
- [11] Eakburanawat J, Boonyaroonate I. Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique. *Appl Energy* 2006;83:687–704. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.06.004>.
- [12] Laird I, Lovatt H, Savvides N, Lu D, Agelidis VG. Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generators. In: AUPEC'08 power engineering conference; 14–17 December 2008; Sydney, Australia. p. 1–6.
- [13] Tsai HL, Lin JM. Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink. *J Electron Mater* 2010;39:2105–11. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-009-0994-x>.
- [14] Wu YY, Wu SY, Xiao L. Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover. *Energy Convers Manage* 2015;93:151–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.013>.
- [15] Kinsella CE, O'Shaughnessy SM, Deasy MJ, Duffy M, Robinson AJ. Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module. *Appl Energy* 2014;114:80–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.025>.
- [16] Yamada H, Kimura K, Hanamoto T, Ishiyama T, Sakaguchi T, Takahashi T. A novel MPPT control method of thermoelectric power generation with single sensor. *Appl Sci* 2013;3:545–58. <http://dx.doi.org/10.3390/app3020545>.
- [17] Kim J, Kim C. A DC–DC boost converter with variation-tolerant MPPT technique and efficient ZCS circuit for thermoelectric energy harvesting applications. *IEEE Trans Power Electr* 2013;28:3827–33. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2012.2231098>.
- [18] Montecucco A, Siviter J, Knox AR. The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. *Appl Energy* 2014;123:47–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.030>.
- [19] Karabetoglu S, Sisman A, Ozturk ZF, Sahin T. Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures. *Energy Convers Manage* 2012;62:47–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.005>.
- [20] Zhang X, Chau KT. An automotive thermoelectric–photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking. *Energy Convers Manage* 2011;52:641–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.07.041>.
- [21] Liu Y, Li M, Ji X, Luo X, Wang M, Zhang Y. A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems. *Energy Convers Manage* 2014;85:809–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.049>.
- [22] Park JD, Lee H, Bond M. Uninterrupted thermoelectric energy harvesting using temperature-sensor-based maximum power point tracking system. *Energy Convers Manage* 2013;86:233–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.004>.
- [23] Chatzidakis PG, Christidis GC, Tatakis EC. Comparative study of MPPT algorithms for thermoelectric generators. In: AUPEC'08 power engineering conference; 14–17 December 2008; Sydney, Australia. p. 1–6.
- [24] Laird I, Lu D. High step-up DC/DC topology and MPPT algorithm for use with a thermoelectric generator. *IEEE Trans Power Electr* 2013;28:3147–57. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2012.2219393>.
- [25] Sasaki K, Horikawa D, Goto K. Consideration of thermoelectric power generation by using hot spring thermal energy or industrial waste heat. *J Electron Mater* 2015;44:391–8. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-014-3189-Z>.
- [26] Liu C, Chen P, Li K. A 500 W low-temperature thermoelectric generator: design and experimental study. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:15497–505. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.163>.
- [27] Weng CC, Huang MJ. A study of using a thermoelectric generator to harvest energy from a table lamp. *Energy* 2014;76:788–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.078>.
- [28] Bonin R, Boero D, Chiaberge M, Tonoli A. Design and characterization of small thermoelectric generators for environmental monitoring devices. *Energy Convers Manage* 2013;73:340–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.016>.
- [29] Shi Y, Wang Y, Deng Y, Gao H, Lin Z, Zhu W, et al. A novel self-powered wireless temperature sensor based on thermoelectric generators. *Energy Convers Manage* 2014;80:110–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.010>.
- [30] Karri MA, Thacher EF, Helenbrook BT. Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: two case studies. *Energy Convers Manage* 2011;52:1596–611. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.013>.
- [31] Nuwayhid RY, Shihadeh A, Ghaddar N. Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling. *Energy Convers Manage* 2005;46:1631–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.07.006>.
- [32] Ahiska R, Mamur H. Development and application of a new power analysis system for testing of geothermal thermoelectric generators. *Int J Green Energy* in press. <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2015.1017102> [2015].
- [33] Wang JL, Wu JY, Zheng CY. Simulation and evaluation of a CCHP system with exhaust gas deep-recovery and thermoelectric generator. *Energy Convers Manage* 2014;86:992–1000. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.036>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้