

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก



นายไพบูรณ์ โกวิทเจริญกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

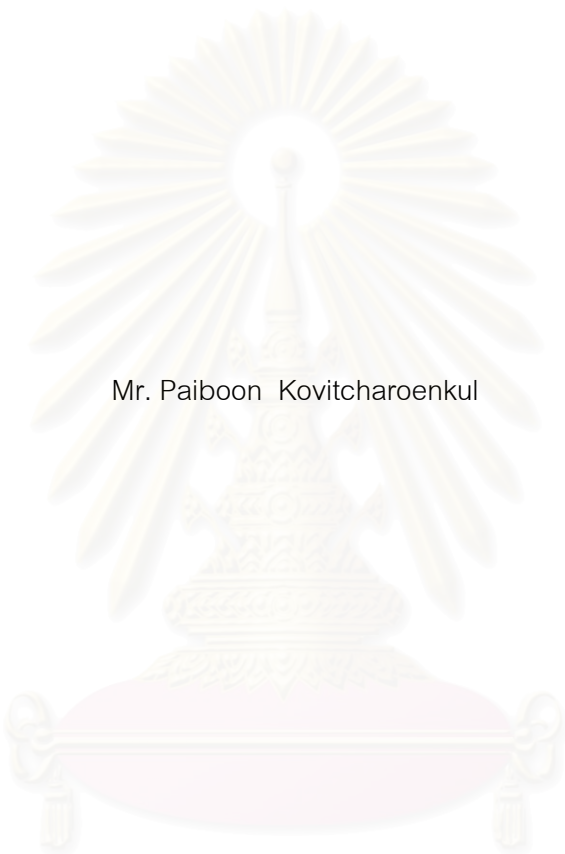
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A WASTE HEAT THERMOELECTRIC POWER GENERATOR



Mr. Paiboon Kovitcharoenkul

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก


โดย    นายไพบุลย์ โกวิทเจริญกุล

สาขาวิชา                                    นิเวศเคีลียร์เทคโนโลยี

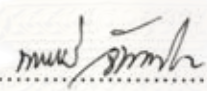
อาจารย์ที่ปรึกษา                            ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม                      อาจารย์เคโซ ทองอร่าม

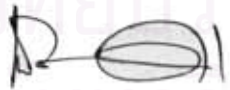
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

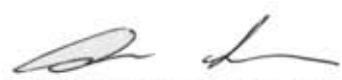
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์เคโซ ทองอร่าม)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

ไพบูลย์ โกวิทเจริญกุล : การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนเหลือทิ้งด้วย  
 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (DEVELOPMENT OF A WASTE HEAT THERMOELECTRIC  
 POWER GENERATOR) อ.ที่ปรึกษา: ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ.เค โส  
 ทองอร่าม, 105 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกขนาด  
 กำลังผลิตไฟฟ้า 50 วัตต์ โดยใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ อันเป็นการ  
 นำพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับการระบายความร้อนของระบบหล่อเย็นในงานอุตสาหกรรม  
 และคืนกำเนิดรังสีความแรงรังสีสูงให้กลับคืนมาใช้ประโยชน์ การกำเนิดไฟฟ้าอาศัยกระบวนการ  
 ทำงานย้อนกลับของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกกัลเลอไรต์ (TEC) ซึ่งดัดแปลงเป็นชุดเซลล์ความร้อน  
 ทำงานที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 °C เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยชุดเซลล์ความร้อน  
 ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 12.5 วัตต์ จำนวน 4 ชุด ซึ่งจัดชุดเซลล์ความร้อนต่ออันดับกัน 2 ชุดก่อนต่อ  
 ขนานกัน แต่ละชุดใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกกัลเลอไรต์ 96 ตัว ต่ออันดับกัน โดยติดตั้งผนังอุปกรณ์  
 เทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อน (hot side) บนพื้นที่ผนัง 4 ด้านของท่อระบายความร้อนที่ทำด้วย  
 อลูมิเนียมทรงกระบอกเหลี่ยมกลวงขนาด 12.2 × 12.2 × 50 ซม.<sup>3</sup> ส่วนผนังด้านเย็น (cold side)  
 ประกอบด้วยแผ่นระบายความร้อนและใช้พัดลมช่วยระบายความร้อน

จากการทดลองผลิตไฟฟ้าโดยใช้แหล่งความร้อนจากไอน้ำเดือดแทนความร้อนเหลือ  
 ทิ้งจากระบบหล่อเย็น พบว่าที่อุณหภูมิผนังเซลล์ด้านร้อน 96 °C และความแตกต่างอุณหภูมิระหว่าง  
 ผนังเซลล์ด้านร้อนและด้านเย็นระหว่าง 24 – 25 °C สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด  
 ได้ 250 โวลต์ และกระแสลัดวงจร 1.2 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้านี้ใช้แปลงผันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ  
 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ได้โดยตรงและสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดแบบตัวต้านทานได้มากกว่า  
 50 วัตต์อย่างต่อเนื่องตรงเท่าที่มีแหล่งความร้อนป้อนเข้าระบบ ด้วยประสิทธิภาพในการแปลง  
 ความร้อนเป็นไฟฟ้าในระดับ 0.418 เปอร์เซ็นต์และมีราคาต้นทุน 2,500 บาท/วัตต์ นอกจากนี้ยังมี  
 การประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ด้วยแหล่งความร้อนที่ได้จากสาร  
 กัมมันตรังสีเปรียบเทียบกับถ่านหุงต้ม

ภาควิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อนิสิตไพบูลย์.....โกวิทเจริญกุล.....  
 สาขาวิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา 2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## 4770394521: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: THERMOELECTRIC DEVICE/ POWER GENERATOR/ WASTE HEAT/  
THERMAL CELL/ DIRECT CONVERSION

PAIBOON KOVITCHAROENKUL: DEVELOPMENT OF A WASTE HEAT  
THERMOELECTRIC POWER GENERATOR. THESIS ADVISOR: ASST. PROF.  
SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO – ADVISOR: DECHO THONG – ARAM,  
105 pp.

This research aims to develop a 50-watt thermoelectric power generator using low-grade waste heat as a heat source, in order to recover and utilize the excess heat from cooling systems in industries and high activity radioisotope sources. Electricity generation is based on the reverse operation of a thermoelectric cooler (TEC) device. The TEC devices were modified and assembled into a set of thermal cell modules operating at a temperature less than 100 °C. The developed power generator consists of 4 modules, each generating 12.5 watts. Two adjacent modules are connected in parallel. Each module comprises 96 TEC devices connected in series. The hot side of each module is mounted on an aluminum heat transfer pipe with dimensions 12.2 × 12.2 × 50 cm<sup>3</sup>. Heat sinks are installed on the cold side with cooling fans to provide forced air cooling.

To test electricity generation in the experiment, water steam was used as a heat source instead of low-grade waste heat. An open-circuit direct current (DC) of 250 V and a short-circuit current of 1.2 A were achieved with the following operating conditions: a hot side temperature of 96 °C and the temperature difference between the hot and cold sides of 24 – 25 °C. The DC power output was inverted to an AC power source of 220 V with 50 Hz frequency, which can continuously supply more than 50 watts of power to a resistive load as long as the heat source was applied to the system. The system achieves an electrical conversion efficiency of about 0.418 percent with the capital cost of 2,500 Baht/W. Electricity generation costs between radioisotope source and charcoal heat source was also compared.

Department.....Nuclear Technology ..... Student's signature.....  
Field of study...Nuclear Technology..... Advisor's signature.....  
Academic year 2007.....Co-Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์กิตติคุณ สุวรรณ แสงเพชร ที่ได้ช่วยชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และอาจารย์เค โข ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาชี้แนะ และถ่ายทอดประสบการณ์ อีกทั้งให้โอกาสในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญนิเวศวิทยเทคโนโลยีสำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ ภาควิชา นิเวศวิทยเทคโนโลยี ที่ได้อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณรัฐภูมิ โลกศิริ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณบุญนาถ บัวมีศิลป์ ช่างกลภาควิชานิเวศวิทยเทคโนโลยี ที่อำนวยความสะดวกและแนะนำเทคนิคด้านเครื่องมือ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆ ทุกคนที่บ้านที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้โอกาสในการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 การกำเนิดไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	4
2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	4
2.1.1 ทฤษฎีเทอร์โมอิเล็กทริก.....	4
2.1.2 ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	6
2.1.3 วัสดุที่มีค่า ZT สูง.....	7
2.1.4 การทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	8
2.1.5 โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	9
2.2 การทำความเย็นและการผลิตไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	12
2.2.1 การทำความเย็นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	12
2.2.2 การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ความร้อน.....	13
2.2.3 ประสิทธิภาพของเซลล์ความร้อน.....	16
2.2.4 ข้อดีและข้อด้อยในการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน.....	18
2.3 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน.....	19
2.4 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง.....	23
2.4.1 ที่มาของความร้อนเหลือทิ้ง.....	23

2.4.2	ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง.....	24
2.5	การแปลงผันไฟฟ้าจากเซลล์ความร้อนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ.....	25
2.5.1	แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง (switching power supply).....	26
2.5.2	อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	28
3	การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	31
3.1	การออกแบบและสร้างเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะของเซลล์ความร้อน.....	31
3.2	การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยชุดเซลล์ความร้อน.....	33
3.2.1	การออกแบบระบบกำเนิดไฟฟ้าเซลล์ความร้อน.....	33
3.2.2	การหาจำนวนเซลล์ความร้อนในการกำเนิดไฟฟ้า.....	34
3.2.3	การออกแบบโมดูลเซลล์ความร้อน.....	37
3.2.4	การออกแบบระบบถ่ายเทความร้อน.....	39
3.2.5	การออกแบบการระบายความร้อน.....	42
3.3	การสร้างโมดูลเซลล์ความร้อน.....	44
3.4	การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดความร้อนเหลือทิ้งจำลอง สำหรับการทดสอบ.....	46
3.5	การพัฒนาระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ.....	49
4	การดำเนินงานและผลการวิจัย.....	51
4.1	การทดสอบคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลเตอร์.....	51
4.1.1	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ.....	51
4.1.2	ทดสอบคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลเตอร์.....	51
4.1.3	ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์.....	53
4.2	การทดสอบการทำงานของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	55
4.2.1	ทดสอบการระบายความร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน.....	55
4.2.2	การทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิผนังเซลล์ความร้อน.....	60
4.2.3	ทดสอบการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน.....	63
4.3	การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน.....	66
4.3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ.....	66
4.3.2	ทดสอบชุดเซลล์ความร้อน.....	67
4.4	การวิเคราะห์ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากเซลล์ความร้อน.....	69
4.4.1	การประเมินต้นทุนการผลิตชุดโมดูลเซลล์ความร้อน.....	70



บทที่	ณ หน้า
4.4.2 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน.....	71
4.4.3 การประเมินประสิทธิภาพและค่าไฟฟ้าต่อหน่วย.....	71
4.4.4 การประเมินเปรียบเทียบต้นทุนเชื้อเพลิง.....	73
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	77
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	85
ภาคผนวก ค.....	88
ภาคผนวก ง.....	90
ภาคผนวก จ.....	94
ภาคผนวก ฉ.....	96
ภาคผนวก ช.....	98
ภาคผนวก ซ.....	100
ภาคผนวก ฌ.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	105

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลต้นกำเนิดรังสีที่ใช้กำเนิดพลังงานความร้อนใน RTG.....	16
ตารางที่ 2.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง.....	24
ตารางที่ 2.3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง.....	25
ตารางที่ 2.4 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ.....	25
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 6 °C, 19 °C และ 29 °C ตามลำดับ.....	52
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 6 °C, 19 °C และ 29 °C.....	55
ตารางที่ 4.3 ผลของความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์เมื่อระบายความร้อนตามธรรมชาติ.....	57
ตารางที่ 4.4 ผลของความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์เมื่อระบายความร้อนด้วยพัดลม.....	59
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน 4 โมดูล.....	66
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาด 50 W.....	67
ตารางที่ 4.7 ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเมื่อแปรเปลี่ยนระยะเวลาคุ้มทุนของเซลล์ความร้อน.....	73
ตารางที่ 4.8 ต้นทุนพลังงานและค่าไฟฟ้าต่อหน่วยจากการผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงต่างกัน.....	74

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพการทดลองของ Thomas Seebeck.....	4
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการ Peltier effect จากการเคลื่อนที่ของประจุในโลหะต่างชนิด.....	5
รูปที่ 2.3 การเกิดไฟฟ้าจากความต่างระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ (Cu-Bi).....	5
รูปที่ 2.4 การทำความเย็นจากภาวะต่างระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ (Cu-Bi).....	5
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ power factor และ Seebeck coefficient.....	7
รูปที่ 2.6 Thermoelectric generation (heat engine).....	9
รูปที่ 2.7 Thermoelectric cooling (heat pump).....	9
รูปที่ 2.8 แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์.....	10
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายโครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์.....	10
รูปที่ 2.10 โครงสร้างบริเวณรอยต่อที่ผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็น.....	11
รูปที่ 2.11 เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์.....	11
รูปที่ 2.12 เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์.....	12
รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์.....	13
รูปที่ 2.14 แก๊สน้ำแข็งที่เกาะบนผนังด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์.....	13
รูปที่ 2.15 แผนภาพการใช้เซลล์ความร้อนผลิตไฟฟ้า.....	14
รูปที่ 2.16 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วย TEG ใช้แหล่งความร้อนจากการเผาแก๊สหุงต้ม.....	14
รูปที่ 2.17 สถานีผลิตไฟฟ้า (Power station) ด้วยเซลล์ความร้อน โดยใช้แหล่งความร้อนจากการเผาแก๊ส เพื่อใช้ในบริเวณที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึง.....	15
รูปที่ 2.18 เครื่องผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากไอโซโทปรังสี.....	15
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่แตกต่างกันของ TE.....	17
รูปที่ 2.20 วงจรจ่ายไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน 1 เซลล์ ซึ่ง $T_h > T_c$ .....	19
รูปที่ 2.21 การจัดวงจรแบบผสมเพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้า.....	21
รูปที่ 2.22 ความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้พลังงานแหล่งต่าง ๆ.....	23
รูปที่ 2.23 แผนภาพระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ.....	26
รูปที่ 2.24 หลักการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตซิง.....	26
รูปที่ 2.25 แผนภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง.....	27
รูปที่ 2.26 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	28
รูปที่ 2.27 แผนภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	29
รูปที่ 2.28 การกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์คัดแปลง.....	30

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.29 ภาพอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคโนโลยียุคใหม่.....	30
รูปที่ 3.1 แผนภาพของเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อน.....	32
รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	33
รูปที่ 3.3 แผนภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่ออกแบบขึ้น.....	34
รูปที่ 3.4 แผนภาพการจัดกลุ่มเซลล์บน โมดูลเซลล์ความร้อน.....	38
รูปที่ 3.5 การจัดโมดูลเซลล์ความร้อนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W.....	38
รูปที่ 3.6 แบบแปลนโครงสร้างของโมดูลเซลล์ความร้อนขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 12.5 W.....	39
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของท่อถ่ายเทความร้อน.....	40
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ประกอบของระบบถ่ายเทความร้อน.....	41
รูปที่ 3.9 แสดงการจัดวางเซลล์ความร้อนบนแผ่นระบายความร้อน.....	42
รูปที่ 3.10 โมดูลเซลล์ความร้อนที่ติดตั้งเซลล์ความร้อนและแผ่นระบายความร้อนรอบด้าน.....	43
รูปที่ 3.11 การติดตั้งชุดพัฒนาระบายความร้อนรอบ โมดูลเซลล์ความร้อน.....	44
รูปที่ 3.12 แบบโครงสร้างส่วนประกอบของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	45
รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์บนท่อถ่ายเทความร้อนและประกบด้วยแผ่นระบายความร้อน.....	45
รูปที่ 3.14 โมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 200 V DC, 12.5 W ที่พัฒนาขึ้น.....	46
รูปที่ 3.15 การผลิตไอน้ำด้วยเตาไฟฟ้าต้มน้ำแทนความร้อนเหลือทิ้ง.....	47
รูปที่ 3.16 การผลิตไอน้ำด้วยชุดเตาไฟฟ้าต้มน้ำ 2 ชุด.....	48
รูปที่ 3.17 ชุดผลิตไอน้ำที่พัฒนาขึ้นสำหรับจำลองแหล่งความร้อน.....	48
รูปที่ 3.18 แผนภาพระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ.....	49
รูปที่ 3.19 เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ขนาดกำลัง 100 วัตต์.....	50
รูปที่ 4.1 แสดงการจัดระบบทดสอบคุณลักษณะของเซลล์ความร้อน.....	52
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่แปรเปลี่ยนตามความแตกต่าง อุณหภูมิ.....	53
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการจ่ายไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน.....	53
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของเซลล์ ความร้อน ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) 6 °C, 19 °C และ 29 °C ตามลำดับ.....	55
รูปที่ 4.5 ระบบระบายความร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน.....	56
รูปที่ 4.6 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบการระบายความร้อน.....	56

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.7 แสดงความแตกต่างอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อระบายความร้อนตามธรรมชาติ.....	58
รูปที่ 4.8 แสดงความแตกต่างอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อระบายความร้อนด้วยพัดลม.....	59
รูปที่ 4.9 การจัดระบบทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิผนังเซลล์.....	60
รูปที่ 4.10 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบการกระจายความร้อน.....	61
รูปที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อป้อนไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าทางเดียว.....	62
รูปที่ 4.12 แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อป้อนไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าสองทาง.....	63
รูปที่ 4.13 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน.....	64
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของ โมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	65
รูปที่ 4.15 แผนภาพระบบทดสอบการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับจากชุด โมดูลเซลล์ความร้อน.....	67
รูปที่ 4.16 การจัดอุปกรณ์ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาด 50 W.....	68
รูปที่ 4.17 การทดสอบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า.....	69
รูปที่ 4.18 แผนภาพการป้อนปริมาณความร้อนสู่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยชุดโมดูลเซลล์ความร้อน..	71



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาวะวิกฤติพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ได้แก่ น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ มีผลให้หลายประเทศมีการกำหนดนโยบายประหยัดและลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงดังกล่าวค่อนข้างผันผวน กลายเป็นตัวแปรสำคัญทางเศรษฐกิจ ทำให้ไม่สามารถควบคุมต้นทุนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้และนับวันจะหมดไป กลุ่มวิจัยพลังงานทดแทนจึงได้พัฒนากระบวนการนำความร้อนเหลือทิ้งคืนกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ผลิตจากการสันดาปของเชื้อเพลิงสามารถให้ประสิทธิภาพในการใช้งานเพียง 30 - 40 % ด้วยขีดจำกัดประสิทธิภาพของคาร์โนต์ (Carnot limit) ตามหลักอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) [1] พลังงานความร้อนส่วนที่เหลือ 60-70 % จะสูญเสียไปในระบบระบายความร้อนเพื่อหล่อเย็นหรือทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ นอกจากนี้ยังมีความร้อนที่เกิดจากการหล่อเย็นต้นกำเนิดรังสีความร้อนสูง ระบบทำความเย็น และระบบกลั่นน้ำ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาวិธีการนำความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวมาผลิตไฟฟ้าแทนการปล่อยให้สูญเสียไปจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

จากการติดตามงานวิจัยในกลุ่มพลังงานทดแทน พบว่ามีความพยายามที่จะผลิตไฟฟ้ากลับคืนด้วยการใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูงจากระบบระบายความร้อนของโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ [2] จากปล่องไอเสียรถบรรทุก [3] และจากระบบหล่อเย็นโรงงานอุตสาหกรรม [4] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์ความร้อนให้สูงขึ้น เพื่อรองรับการใช้ความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงในการผลิตไฟฟ้า อันเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามเซลล์ความร้อนที่ออกแบบเฉพาะในการผลิตไฟฟ้า (Thermoelectric generator) มีราคาสูงและยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายนัก

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางในการศึกษาและออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน ซึ่งอาศัยกระบวนการย้อนกลับของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric cooler) เพื่อเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งประเภทเกรดต่ำ (low grade waste heat) ซึ่งมีอุณหภูมิไม่เกิน 100 °C ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 50 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์มีการนำมาใช้ในระบบทำความเย็นอย่างแพร่หลาย จึงจัดหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพงมากนัก นอกจากนี้การออกแบบและสร้างระบบถ่ายเทความร้อนและระบบระบายความร้อนสามารถทำได้โดยการเลือกใช้วัสดุตลอดจนส่วนประกอบที่หาได้จากในประเทศเป็นหลัก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้นอกจากจะเป็นประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าจาก

แหล่งความร้อนเหลือทิ้งในงานอุตสาหกรรมแล้วยังสามารถผลิตไฟฟ้าด้วยการต้มน้ำด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับผลิตไฟฟ้าในครัวเรือนชนบทที่ระบบจ่ายไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึงได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 วัตต์จากพลังงานความร้อนเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดสอบคุณลักษณะของกระบวนการย้อนกลับของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เพื่อใช้เป็นเซลล์ความร้อนจากความร้อนที่อุณหภูมิน้ำเดือด
2. ออกแบบและสร้างระบบถ่ายเทความร้อนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 วัตต์
3. เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากต้นกำเนิดรังสี

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ทดสอบหาคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์
3. ออกแบบและสร้างระบบถ่ายเทความร้อนให้ได้ประสิทธิภาพสูง
4. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์และระบบแปลงผันไฟฟ้า
5. เปรียบเทียบข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์กับการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น
6. สรุปผลและเขียนรายงาน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และได้ข้อมูลเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานความร้อนจากต้นกำเนิดรังสี

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี พ.ศ. 2535 Bass, J.C. ; Elsner, N.B. และ Leavitt, F.A. ได้ทำงานวิจัยร่วมกับกระทรวงพลังงานของสหรัฐ ตั้งแต่ พ.ศ. 2535 เพื่อพัฒนาระบบกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โมอิเล็กทริกที่ความร้อนมาจากท่อไอเสียรถบรรทุกผู้สินค้า สามารถผลิตไฟฟ้ากลับคืนได้ 1000 วัตต์ โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 13 วัตต์ จำนวน 72 เซลล์ ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงและจำนวนของเซลล์คงที่ตลอดการทดสอบ
2. ปี พ.ศ. 2536 Allen, D. ; Haugeto, R. ; Kajor, M. และ Namazian, M. ได้พัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยการใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล เพื่อจะใช้แทนแบตเตอรี่หรือใช้เป็นที่ชาร์จแบตเตอรี่ ระบบผลิตไฟฟ้ามีขนาดตั้งแต่ 0.3 วัตต์ถึง 20 วัตต์ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อได้เปรียบที่เซลล์ความร้อนสามารถทำงานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำได้และยังพร้อมที่จะพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต
3. ปี พ.ศ. 2537 Bass, J.C. และ Farley, R.L. ได้ทำการทำวิจัยและพัฒนาระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ความร้อนจากระบบส่งก๊าซธรรมชาติ โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างท่อด้านร้อนและเย็นของ glycol natural gas dehydrator cycle ซึ่งเกิดจากความร้อนเหลือทิ้งของระบบ gas dehydrator boiler ความร้อนปริมาณ 125,000 Btu สามารถผลิตไฟฟ้าได้ระหว่าง 66-293 kW สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ทางด้านสื่อสารและระบบป้องกันการก่อกวนของท่อส่งก๊าซ
4. ปี พ.ศ. 2543 Allen, D. และ Mallon, W.C. ได้ทำการวิจัยโดยการนำความร้อนจากน้ำไหลเวียนของระบบทำน้ำร้อนเพื่อความอบอุ่นในฤดูหนาวมาผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนและแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานความร้อนปริมาณ 22 kW (75,000 Btu/hr) สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 55-60 W การผลิตไฟฟ้านี้เป็นที่นิยมในประเทศแถบยุโรปในช่วงฤดูหนาว ถือเป็นความช่วยเหลือประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะในประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งเชื่อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ามีราคาค่อนข้างแพง

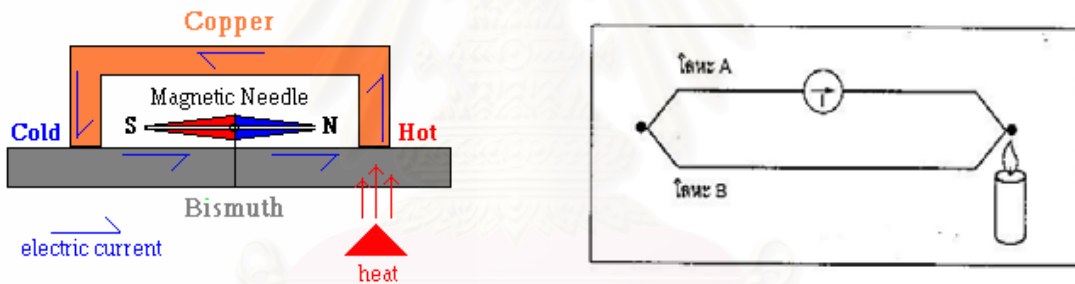
## บทที่ 2

### การกำเนิดไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

#### 2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

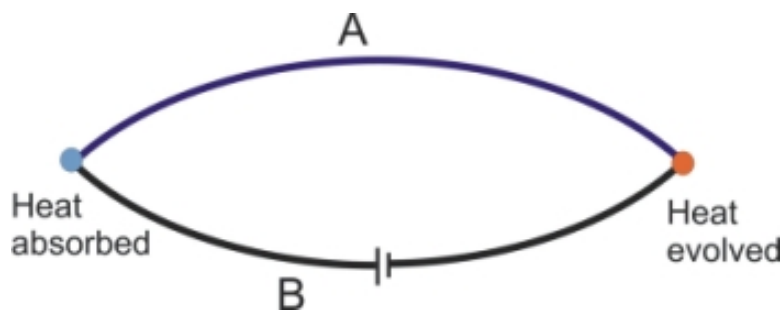
##### 2.1.1 ทฤษฎีเทอร์โมอิเล็กทริก

ในปี ค.ศ. 1821 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ Thomas Johann Seebeck ได้ค้นพบโดยบังเอิญว่า ถ้าให้ความร้อนที่รอยต่อของโลหะ 2 ชนิด จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายโลหะทั้งสอง ดังแผนภาพรูปที่ 2.1 เนื่องจากกลุ่มอิเล็กตรอนในโลหะด้านร้อนจะมีพลังงานจลน์สูงกว่าโลหะด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า จึงทำให้เกิดความแตกต่างปริมาณของอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะดังกล่าว Seebeck ได้สรุปว่าความแตกต่างอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Seebeck effect



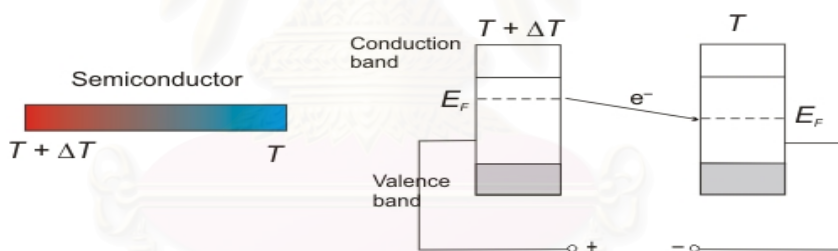
รูปที่ 2.1 แผนภาพการทดลองของ Thomas Seebeck [5]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 Jean Peltier ได้ทำการทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโลหะทองแดงและบิสมัทที่เชื่อมต่อกัน ผลที่เกิดขึ้น คือ รอยต่อระหว่างทองแดงและบิสมัทข้างหนึ่งจะร้อนขึ้น ส่วนอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง อันเป็นผลจากคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านโลหะด้านหนึ่งจะปลดปล่อยความร้อน (Heat evolved) แต่อีกด้านหนึ่งจะดูดกลืนความร้อน (Heat absorbed) ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ ดังแผนภาพรูปที่ 2.2 เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า Peltier effect และ Peltier ยังได้ใช้รอยต่อของทองแดงและบิสมัททำให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็งจากกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ จะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ทั้งสองเป็นกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ที่สามารถกำเนิดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานย้อนกลับกระบวนการ (Reverse operation) กันได้

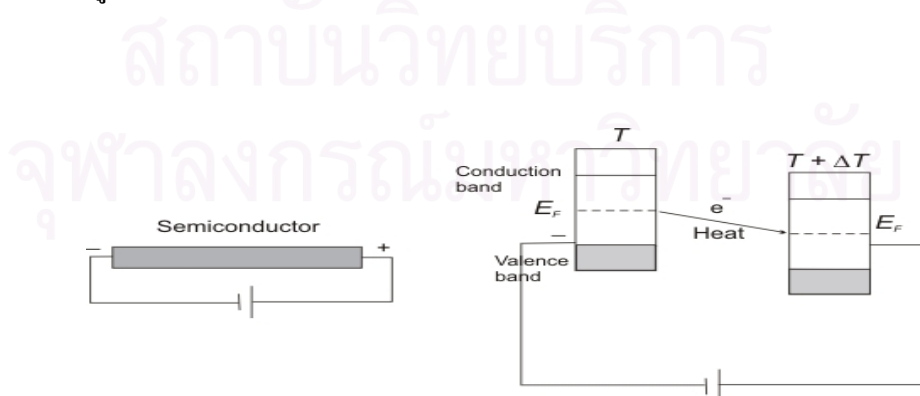


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยา Peltier effect จากการเคลื่อนที่ของประจุในโลหะต่างชนิด [5]

ตามปรากฏการณ์ Seebeck effect เนื่องจากมีการใช้โลหะต่างชนิดมาเชื่อมต่อกัน จึงเรียกอุปกรณ์นี้ว่า เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สามารถผลิตไฟฟ้าได้ประสิทธิภาพเพียง 1 % และในการทำงานกลับกันตามปรากฏการณ์ Peltier effect นั้นโลหะต่างชนิดมีการระบายความร้อนได้ไม่ดีพอ จึงมีการคิดค้นหาวัสดุใหม่ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1929 Abram Fedorovich Loffe ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Seebeck effect และ Peltier effect โดยใช้สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) แทน ดังแผนภาพรูปที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ [5] พบว่าโครงสร้างใหม่ให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงถึง 4 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.3 การเกิดไฟฟ้าจากภาวะต่างระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ (Cu-Bi)



รูปที่ 2.4 การทำความเย็นจากภาวะต่างระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ (Cu-Bi)



### 2.1.2 ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [6]

จากผลการวิจัยและพัฒนาด้านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกประเภทสารกึ่งตัวนำ มีการพบว่า ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

- สามารถให้สภาพนำไฟฟ้าสูงแต่เกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า)
- สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้มากที่สุด
- มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุ

คุณสมบัติทั้ง 3 ประการ มีความสัมพันธ์กันด้วยหลักการทางฟิสิกส์ตามสมการที่ 2.1 สำหรับใช้บ่งชี้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ (Z)

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad \dots\dots\dots 2.1$$

โดยที่  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค  $\left[ \frac{\Delta V}{\Delta T} \right]$  (Volt/Kelvin)

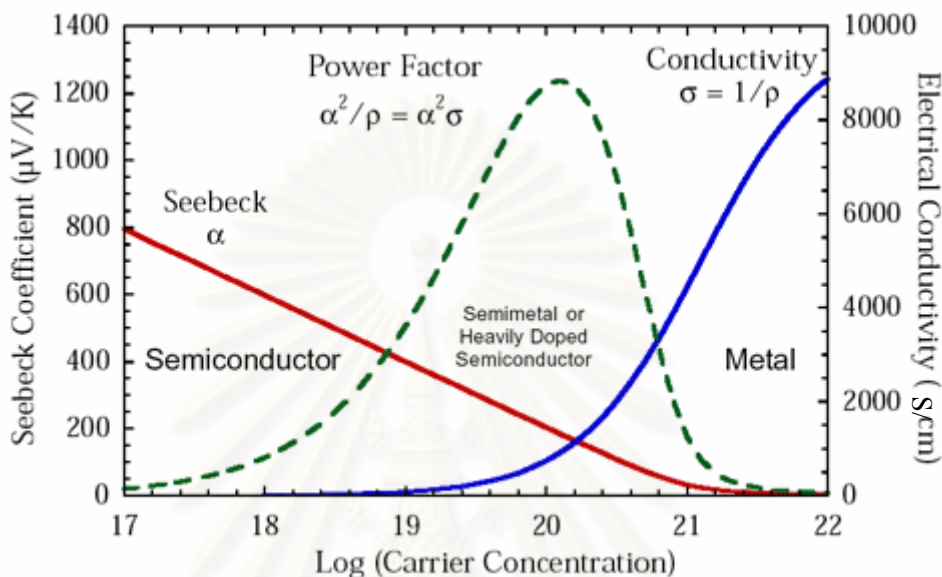
$\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (Ampere/Volt·meter)

และ  $\lambda$  คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ (Watt/meter·Kelvin)

เนื่องจาก Z มีหน่วยต่ออุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติค่าบ่งชี้ที่เปรียบเทียบกันได้ง่ายควรจะไม่มียุทธศาสตร์เรียกว่าค่า figure-of-merit ดังนั้นจึงมีการคูณสมการ 2.1 ด้วย T ได้สมการใหม่เป็น ZT โดยที่ T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขณะทำงาน ค่า ZT จึงเป็นค่า figure-of-merit ที่ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และคุณสมบัติการทำความเย็นสูงสุดของวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนองค์ประกอบ (Thermo-element) ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ในยุคแรกช่วงปี ค.ศ. 1950 ถึง 1960 งานวิจัยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมุ่งไปที่โลหะผสมกลุ่ม bismuth telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), lead telluride (PbTe) และ silicon-germanium (SiGe) ซึ่งเป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่ให้ค่า figure-of-merit ดีที่สุดขณะนั้นอย่างเด่นชัด ในช่วงอุณหภูมิใช้งาน 3 ช่วง โดยโลหะผสม  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  เหมาะกับการนำมาใช้ในระบบทำความเย็นและระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีช่วงอุณหภูมิใช้งานระหว่าง 180 K (-93 °C) ถึง 450 K (177 °C) ส่วนวัสดุ PbTe และ SiGe เหมาะกับการนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูงและในยานอวกาศซึ่งมีช่วงอุณหภูมิใช้งานตั้งแต่ 500 K (227 °C) ถึง 900 K (627 °C) และตั้งแต่ 800 K (527 °C) ถึง 1300 K (1027 °C) ตามลำดับ

ในรูปที่ 2.5 [7] เป็นเส้นกราฟเปรียบเทียบค่า power factor และสัมประสิทธิ์ซีเบ็คระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำ จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำ ให้ค่า power factor สูงกว่าโลหะ (metal) โดยสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ที่ใช้ ได้แก่ Bi-Te, Bi-Sb, Pb-Te และ Si-Ge เป็นต้น ค่า power factor จะสูงที่สุดถ้า วัสดุเป็น Semimetal (Metal alloys) หรือ Heavily doped semiconductor



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ power factor และ Seebeck coefficient

### 2.1.3 วัสดุที่มีค่า ZT สูง

ประมาณปี ค.ศ. 1990 นักวิจัยส่วนใหญ่ปรับแนวทางวิจัยไปที่การศึกษาสารกึ่งตัวนำและ โลหะผสมเชิงสอง (Binary elements) เพื่อพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ได้คุณสมบัติวัสดุที่มี คุณภาพสูงตามสมการที่ 2.1 โดยจะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและมีสภาพเป็นฉนวนความร้อน แต่ ด้วยข้อจำกัดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในหลาย ๆ ส่วนผสมที่ทำการพัฒนาขึ้น สามารถให้ค่า ZT ได้ประมาณ 1 เนื่องจากขณะนั้นยังไม่เข้าใจข้อจำกัดทางทฤษฎีของ ZT ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงเป็น การยากที่จะพัฒนาวัสดุซึ่งให้ค่า ZT สูง ๆ ได้ ต่อมาพบว่าสมบัติการนำไฟฟ้าและการนำความร้อน ที่มีอยู่ในวัสดุจะมีความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ตามกฎ Wiedemann-Franz [6] กล่าวคือ เมื่อ อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ในเนื้อวัสดุจะมีการพาความร้อนและนำไฟฟ้าไปพร้อมกัน วัสดุที่มีสภาพ นำไฟฟ้าสูงจะมีสภาพนำความร้อนสูงด้วยแปรตามกัน แต่การเพิ่มค่า ZT ในวัสดุจะต้องปรับปรุง คุณสมบัติของวัสดุให้มีสภาพนำไฟฟ้าแปรผกผันกับสภาพนำความร้อน สิ่งนี้ถือเป็นข้อจำกัดใน การเพิ่มค่า ZT ในวัสดุ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1995 เทคโนโลยีนาโนด้านวัสดุศาสตร์มีความก้าวหน้ามาก ขึ้น [6] งานวิจัยที่องค์กร NASA-JPL รวมทั้งห้องทดลอง MIT-Lincoln มหาวิทยาลัยมิชิแกนและ

องค์กรต่าง ๆ ก่อให้เกิดพัฒนาการนำไปสู่การคิดค้นคุณลักษณะของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่นใหม่ เช่น วัสดุ skutterudites, วัสดุ thin-film superlattice, วัสดุ quantum well และโลหะผสม PbAgSbTe (LAST) และพลอยได้ โดยเฉพาะโลหะผสม LAST จะมีโครงสร้างนาโนเกิดอยู่ภายในผลึกเมทริกซ์ (crystal matrix) จึงแฝงไว้ด้วยปรากฏการณ์ quantum well ซึ่งล้วนแล้วแต่มีสภาพเป็นฉนวนความร้อนแต่นำไฟฟ้าได้ดี ทำให้มีทางเป็นไปได้ที่วัสดุเหล่านี้จะให้ค่า ZT ประมาณ 1.5 - 2 หรือบางเงื่อนไขการทดลองพบค่า ZT เข้าใกล้ 3 หรือ 4 ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุนาโนเป็นตัวนำที่สามารถมีโครงสร้างในรูปแบบที่เป็น จุด (0 มิติ), สาย (1 มิติ) และฟิล์มบาง (2 มิติ) มีผลให้คุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้มีค่า ZT สูงกว่า ด้วยเหตุผลสำคัญ 2 ประการของ quantum well [6] ได้แก่

- ก. โครงสร้างนาโนมีลักษณะการนำไฟฟ้าดีและการนำความร้อนแยกออกจากกัน ตามลักษณะโครงสร้าง ทำให้สภาพนำความร้อนต่ำ
- ข. เมื่อวัสดุมีสภาพนำไฟฟ้าสูงและสภาพนำความร้อนต่ำ จะมีผลในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในวัสดุ

#### 2.1.4 การทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ปัจจุบันวิวัฒนาการของปรากฏการณ์ Seebeck effect และ Peltier effect ได้รับการพัฒนาเป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานตามกระบวนการอุณหพลศาสตร์ใน 2 รูปแบบ คือ จักรกลความร้อน (Heat engine) และจักรกลสูบน้ำร้อน (Heat pump) โดยมีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์แยกชนิดตามหน้าที่ในการทำงานดังนี้

- ก. อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าจากความร้อน (ตามปรากฏการณ์ Seebeck effect) เรียกว่า Thermoelectric Generator (TEG)
- ข. อุปกรณ์ทำความเย็น (ตามปรากฏการณ์ Peltier effect) เรียกว่า Thermoelectric Cooler (TEC) หรือ Peltier cooler

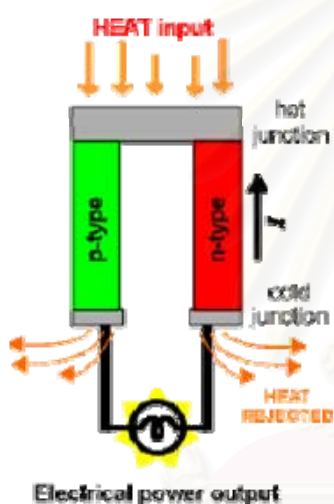
##### ก. เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator)

การกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนจากพฤติกรรมรอยต่อโอห์มมิก (Ohmic junction) ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ อาศัยความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างรอยต่อด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก มีผลให้กลุ่มอิเล็กตรอนในวัสดุด้านร้อนมีพลังงานจลน์สูงกว่าวัสดุด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า เกิดความต่างปริมาณของประจุไฟฟ้าและกำเนิดไฟฟ้าขึ้นที่ปลายขั้วต่อของอุปกรณ์ พร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลด (Load) ได้ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.6 [8] เนื่องจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ (TEG) ผลิตไฟฟ้าจากความร้อนบางครั้งจึงเรียกว่า เซลล์ความร้อน (Thermoelectric cell)

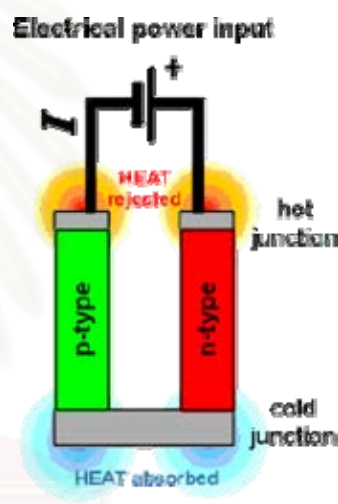
## ข. เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric Cooler)

การทำความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบริเวณรอยต่อไอหุ้มมิกของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) อาศัยผลการคูดเคลื่อนความร้อนของกลุ่มอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากรอยต่อด้านเย็นผ่านเทอร์โมลิเมนต์ และนำไปปลดปล่อยที่รอยต่อด้านร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ โดยมีผลให้รอยต่อด้านเย็นมีอุณหภูมิต่ำลง ขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและการระบายความร้อนที่รอยต่อด้านร้อนออก ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.7 [8]

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์และเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์นั้น มีลักษณะของโครงสร้างคล้ายคลึงกัน จึงสามารถทำงานย้อนกระบวนการกันได้ แต่ภาวะการทนอุณหภูมิของอุปกรณ์และค่า ZT ของเทอร์โมลิเมนต์ที่เลือกใช้จะแตกต่างกันขึ้นกับความต้องการประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์



รูปที่ 2.6 Thermoelectric generation  
(Heat engine)



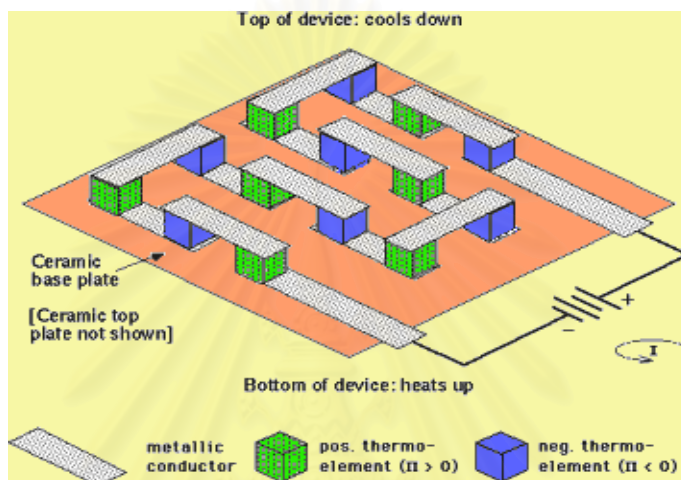
รูปที่ 2.7 Thermoelectric cooling  
(Heat pump)

### 2.1.5 โครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

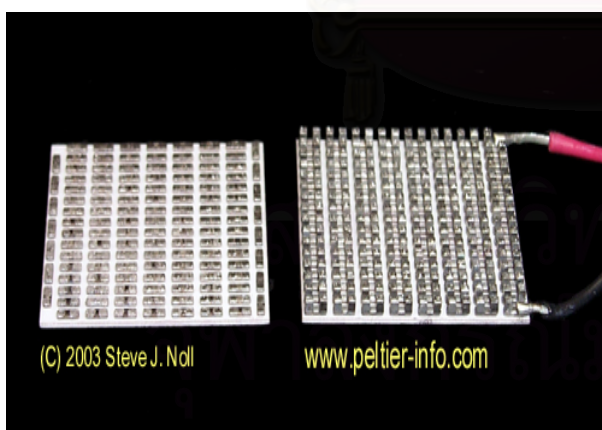
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลิตกันในเชิงพาณิชย์ จะมีมาตรฐานการกำหนดข้อมูลเฉพาะ (Specification) ทั้งขนาดพื้นที่ รูปร่าง และกำลังไฟฟ้าของเซลล์ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายตามวัตถุประสงค์ โดยในการผลิตทางอุตสาหกรรม เทอร์โมลิเมนต์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบพีและเอ็น (P type - N type) จะถูกนำมาจัดเรียงบนแผ่นฉนวนไฟฟ้าต่อสลับอันดับกันทางวงจรไฟฟ้าและต่อขนานกันในเชิงวงจรความร้อนบนพื้นที่กว้าง ทั้งนี้เพื่อให้มีทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะไฟฟ้าที่สอดคล้องกับการเกิดปรากฏการณ์ Peltier effect เป็นการสร้างรอยต่อไอหุ้มมิกที่ผนังอุปกรณ์ด้านร้อนและด้านเย็น ดังแผนภาพโครงสร้างในรูปที่ 2.8 และภาพถ่ายส่วนประกอบใน



รูปที่ 2.9 [9] ทำให้ได้พื้นที่ทำความเย็นและระบายความร้อนเพิ่มขึ้นในกรณีของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) และ ขณะเดียวกันก็ได้พื้นที่ในการรับพลังงานความร้อนและระบายความร้อนในการสร้างกระบวนการย้อนกลับให้ทำงานเป็นเทอร์โมอิเล็กทริเจนเนอเรเตอร์ (TEG) ในรูปที่ 2.10 แสดงสภาพของโครงสร้างรอยต่อไอทึมมิกที่ผนังอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อนและด้านเย็นซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการนำความร้อนบริเวณรอยต่อ [10]



รูปที่ 2.8 แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

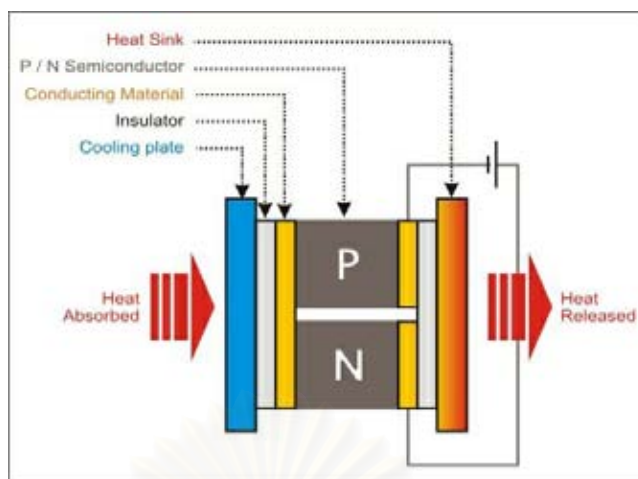


ก. แผ่นฉนวนที่จัดเรียงเทอร์โมลิเมนต์

ข. ภาพขยายส่วนฐานและเทอร์โมลิเมนต์

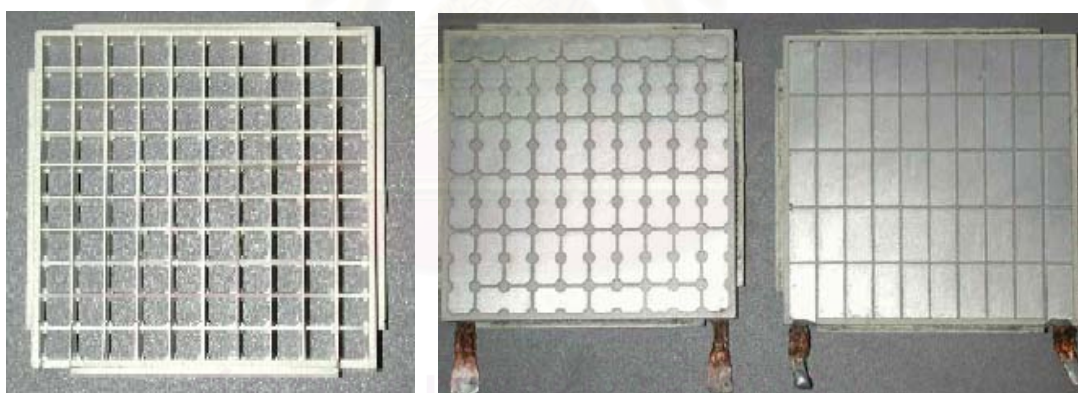
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายโครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์





รูปที่ 2.10 โครงสร้างบริเวณรอยต่อที่ผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็น

เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ที่ออกแบบเพื่อการผลิตไฟฟ้าซึ่งให้กำลังไฟฟ้าต่อเซลล์สูงมากกว่า 10 W และทำงานที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 250 – 500 °C จึงมีโครงสร้างที่แข็งแรง ดังในรูปที่ 2.11 เทอร์โมอิเล็กทริกต้องมีการยึดร่วมกับวัสดุเชื่อมรอยต่อเพื่อรองรับการทำงานต่อเนื่องที่สภาพแวดล้อมอุณหภูมิสูง



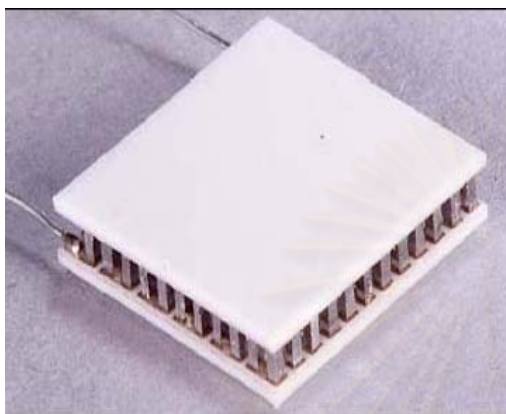
ก. กรอบยึดเทอร์โมอิเล็กทริก

ข. รูปร่างของเซลล์ความร้อน

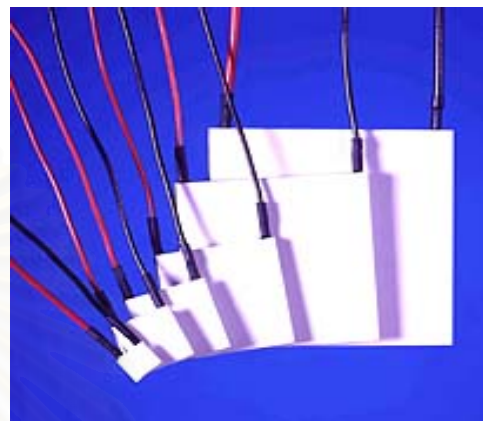
รูปที่ 2.11 เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

เทอร์โมอิเล็กทริกคลดเลอร์เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ที่ออกแบบเพื่อใช้งานในระบบทำความเย็นหรือระบบทำความเย็นร่วมกับการทำความร้อนพร้อมกันจากผนังเซลล์ 2 ด้าน โดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าและหล่อเย็นผนังเซลล์เพื่อรักษาให้อุณหภูมิผนังด้านร้อนไม่เกิน 60 °C เซลล์มาตรฐานดังในรูปที่ 2.12 สามารถดูดกลืนปริมาณความร้อนได้ตั้งแต่ 10 – 130 W/Cell ขึ้นกับขนาดที่

ออกแบบ ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เกิน 140 °C ปัจจุบันมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบทำความเย็นของเครื่องมือต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เครื่องมือทางการแพทย์ คอมพิวเตอร์และเครื่องมือสื่อสารบางชนิด เป็นต้น จึงมีการออกแบบรูปทรงของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ในแบบต่าง ๆ หลากหลาย



ก. รูปร่างของเพลเทียร์คูลเลอร์



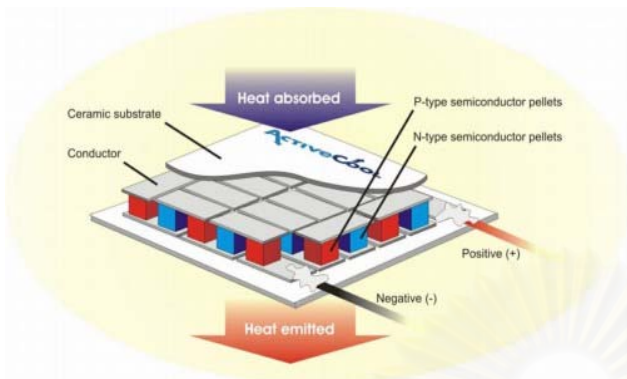
ข. ขนาดของเซลล์ที่ต่างกัน

รูปที่ 2.12 เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

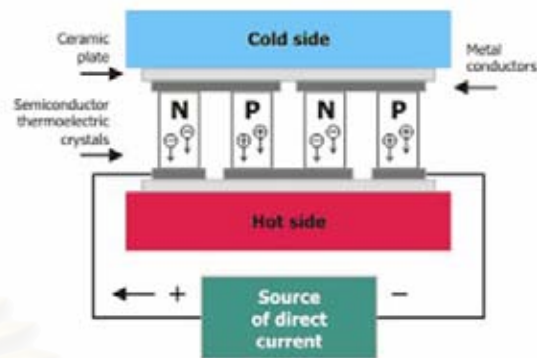
## 2.2 การทำความเย็นและการผลิตไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

### 2.2.1 การทำความเย็นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ระบบทำความเย็นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์แตกต่างจากระบบทำความเย็นแบบอัดไอเคมี (Compression) ที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว ไม่ต้องการสารทำความเย็น ไม่มีเสียงรบกวน การทำความเย็นด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ต้องการเพียงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันและกระแสไฟฟ้า พร้อมทั้งระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมหรือน้ำ ที่เหมาะสมกับการสูบปริมาณความร้อนของเซลล์ออกจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็น โดยจัดวางตามแผนภาพรูปที่ 2.13 [10, 11] การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเทอร์โมอิเล็กทริเมนต์ก่อให้เกิดกลุ่มพาหะประจุรับความร้อนจากผนังด้านเย็นเคลื่อนไปปล่อยที่ผนังด้านร้อนที่อยู่ตรงกันข้าม ทำให้ผนังด้านเย็นมีอุณหภูมิต่ำลงต่อเนื่องจนมีเกล็ดน้ำแข็งซึ่งเกิดจากความชื้นในอากาศจับตรึงตัวที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าป้อนให้ระบบและระบายความร้อนออกจากผนังด้านร้อนของระบบ ดังภาพถ่ายในรูปที่ 2.14

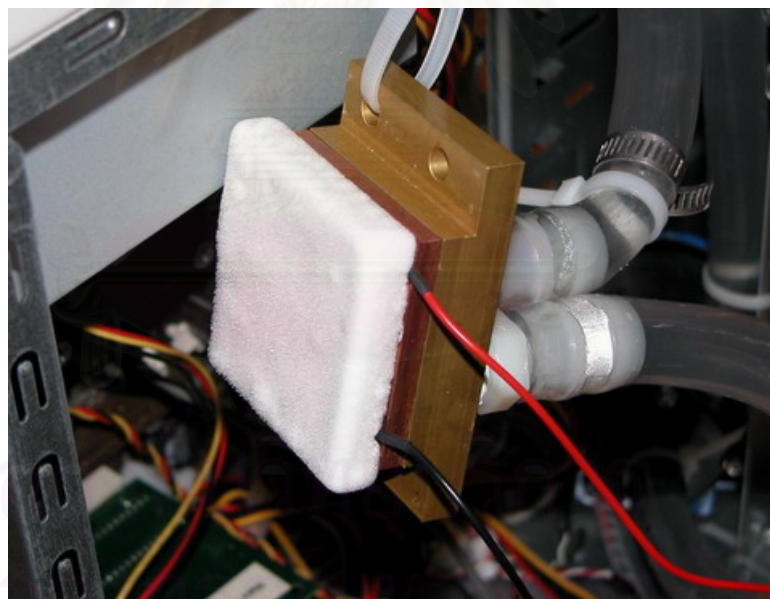


ก. การทำความเย็นด้วยแผ่น TEC



ข. การทำงานของ TEC 2 รอยต่อ

รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

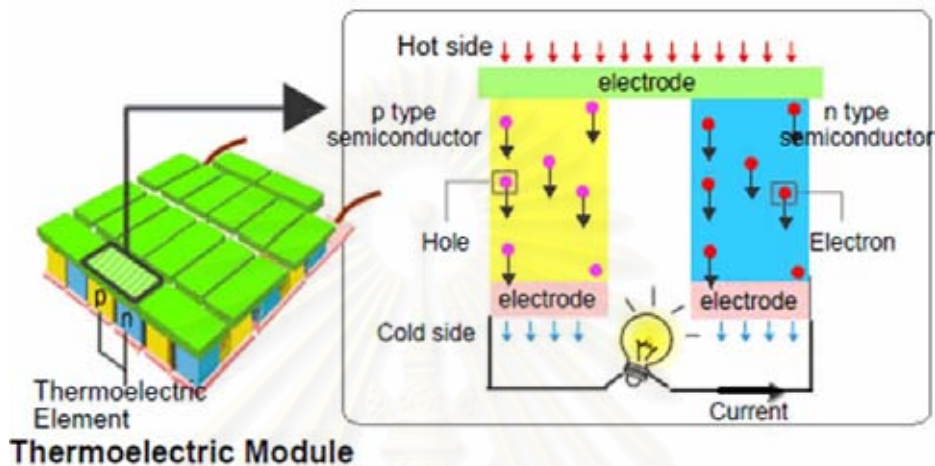


รูปที่ 2.14 เกล็ดน้ำแข็งที่เกาะบนผนังด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

### 2.2.2 การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ความร้อน

ในกระบวนการทำงานกลับกันของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ เมื่อนำพลังงานความร้อนถ่ายให้กับเซลล์ความร้อน (Thermoelectric cell) ที่ผนังด้านร้อนและระบายความร้อนออกจากผนังด้านเย็น เพื่อให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังเซลล์ทั้งสองด้าน จะสามารถผลิตไฟฟ้า

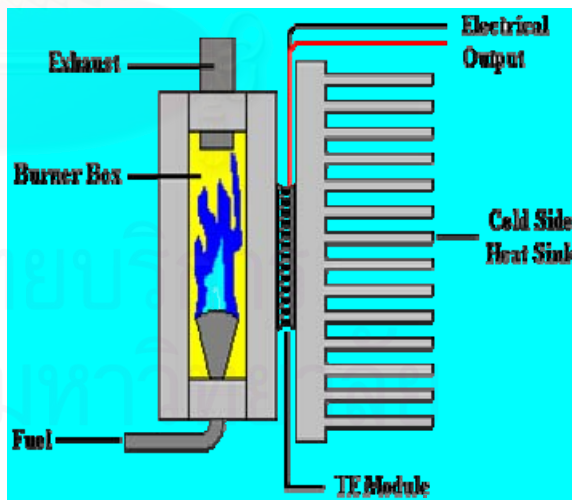
กระแสดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.15 [12] การจัดเซลล์ความร้อนอันดับกันจะได้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและถ้าจัดเซลล์ความร้อนขนานกันจะได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อจัดวงจรผสมทั้งอันดับและขนาน จะสามารถสร้างระบบผลิตไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสำหรับใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงได้ ดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 [13]



รูปที่ 2.15 แผนภาพการใช้เซลล์ความร้อนผลิตไฟฟ้า



ก. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วย TEG



ข. แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าด้วย TEG

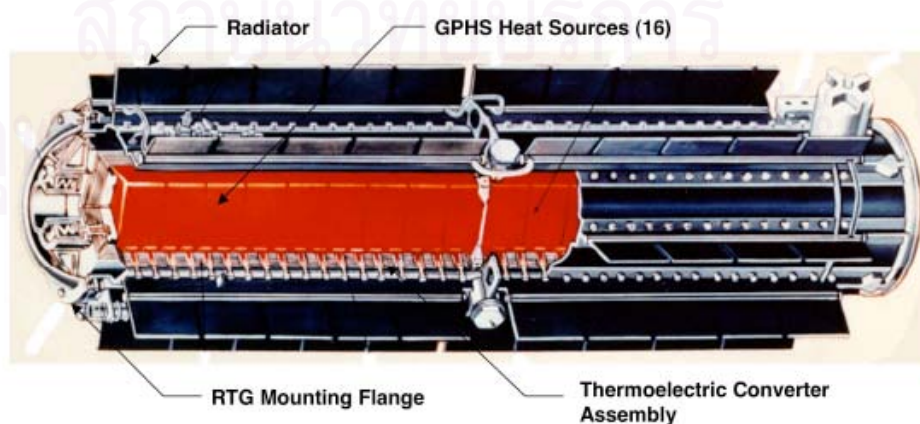
รูปที่ 2.16 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วย TEG ใช้แหล่งความร้อนจากการเผาแก๊สหุงต้ม





รูปที่ 2.17 สถานีผลิตไฟฟ้า (Power station) ด้วยเซลล์ความร้อนโดยใช้แหล่งความร้อนจากการเผาแก๊ส เพื่อใช้ในบริเวณที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึง

นอกจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนสามารถใช้กับแหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้วยังสามารถผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากต้นกำเนิดรังสีประเภทไอโซโทปรังสีที่มีความแรงรังสีสูงได้ เรียกระบบนี้ว่า “เครื่องผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากไอโซโทปรังสี (Radioisotope thermoelectric generator; RTG)” [14] พลังงานความร้อนได้จากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ถ่ายไอให้กับผนังของภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสี ความร้อนนี้ถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยชุดเซลล์ความร้อน (thermoelectric cell) อย่างต่อเนื่อง จึงนิยมใช้เป็นแบตเตอรี่ชนิดหนึ่ง ในแหล่งพลังงานของดาวเทียม ยานอวกาศ อุปกรณ์ตรวจวัดในอวกาศ และเครื่องมือที่สถานีตรวจวัดในพื้นที่ทุรกันดารโดยการควบคุมระยะไกล



รูปที่ 2.18 เครื่องผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากไอโซโทปรังสี



โครงสร้างภายในของ RTG ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ แหล่งพลังงานความร้อน และชุดเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ดังในรูปที่ 2.18 แหล่งพลังงานความร้อนประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสี ซึ่งมีลักษณะแคปซูลวางเรียงอันดับกันบรรจุในภาชนะปิดที่มีผนังถ่ายเทความร้อนและป้องกันการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม เรียกว่า General Purpose Heat Source (GPHS) โดยความร้อนที่ผลิตขึ้นจะถ่ายเทสู่ผนังด้านร้อนของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ขณะที่ผนังด้านเย็นจะมีชุดแผ่นระบายความร้อน เพื่อรักษาความแตกต่างอุณหภูมิในการเปลี่ยนความร้อนเป็นปริมาณไฟฟ้า ที่มีกำลังไฟระหว่าง 1 - 150 W โดยทั่วไปแล้วจะมีกำลังไฟฟ้าจำเพาะที่ 2 - 4 W/kg และต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ใน RTG ต้องมีคุณสมบัติเฉพาะดังนี้

ก. ต้องมีครึ่งชีวิตยาวพอเหมาะที่จะสามารถใช้ผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่องตลอดการใช้งาน มีความแรงรังสีมากพอที่จะสลายตัวเพื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ตามที่ต้องการ โดยทั่วไปต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ใน RTG จะมีครึ่งชีวิตหลายสิบปี แต่บางกรณีอาจจะใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีครึ่งชีวิตที่สั้นกว่านั้น ต้นกำเนิดรังสีที่นิยมนำมาใช้แสดงในตารางที่ 2.1

ข. ต้องเป็นต้นกำเนิดรังสีอัลฟาหรือบีตา ที่ไม่มีการปลดปล่อยรังสีแกมมาหรือถ้ามีต้องพลังงานต่ำเพื่อให้สามารถกำบังรังสีได้ง่ายและไม่ไปเพิ่มน้ำหนักของ RTG

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลต้นกำเนิดรังสีที่ใช้กำเนิดพลังงานความร้อนใน RTG [15]

ธาตุ	ครึ่งชีวิต (ปี)	Watts/g (thermal)	US\$/Watts (thermal)
Po - 210	0.378	141	570
Pu - 238	86.8	0.55	3000
Ce - 144	0.781	25	15
Sr - 90	28.0	0.93	250
Cm - 242	0.445	120	495

### 2.2.3 ประสิทธิภาพของเซลล์ความร้อน

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์หรือเซลล์ความร้อนสามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้า กระแสตรงได้โดยอาศัยความแตกต่างอุณหภูมิของวัสดุด้านร้อนและด้านเย็น ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าขึ้นกับคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและการเป็นฉนวนความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในเวลาเดียวกัน เพื่อรักษาความแตกต่างอุณหภูมิขณะทำงานให้มาก รวมทั้งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกต้องมีค่า ZT มากกว่า 1 ซึ่งจะทำได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มากกว่า 5 % แต่ค่อนข้างหายาก เนื่องจากสิ่งที่กล่าวถึงเป็นข้อจำกัดของเซลล์ความร้อน อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกประเภทเซลล์ความร้อนในการผลิตไฟฟ้า พบว่าเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.2 [6]

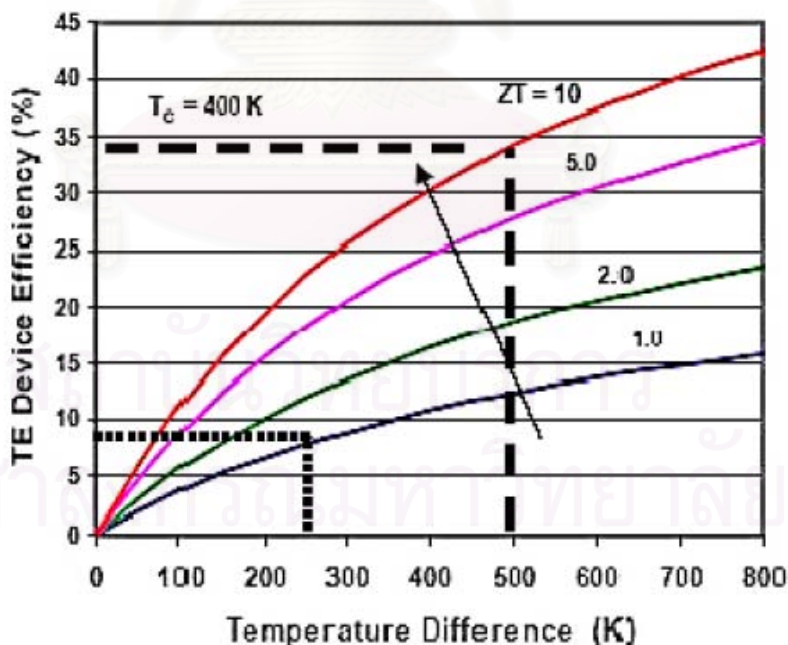
$$\eta_{\max} = \left[ \frac{T_h - T_c}{T_h} \right] \cdot \left[ \frac{\left(1 + Z^* \bar{T}\right)^{0.5} - 1}{\left(1 + Z^* \bar{T}\right)^{0.5} + 1} \right] \dots\dots\dots 2.2$$

โดยที่  $Z^*$  คือ ค่า  $Z$  ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P type – N type ที่ดีที่สุด (V/K)

$T_h$  และ  $T_c$  คือ อุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (K)

$\bar{T}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็น (K)

ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟในรูปที่ 2.19 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพและความแตกต่างอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งใช้เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า  $ZT$  ต่าง ๆ กัน โดยวิเคราะห์ตามสมการ 2.2 พบว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดถูกจำกัดเช่นเดียวกับข้อจำกัดประสิทธิภาพคาร์โนต์ตามวัฏจักรคาร์โนต์ในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นงานตามหลักอุณหพลศาสตร์ [1] ดังนั้นในบางครั้งประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจึงเรียกว่า เปรอ์เซ็นต์คาร์โนต์ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่แตกต่างกันของ TE

## 2.2.4 ข้อดีและข้อด้อยในการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน [16]

### ก. ข้อดีของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนด้วยเซลล์ความร้อน

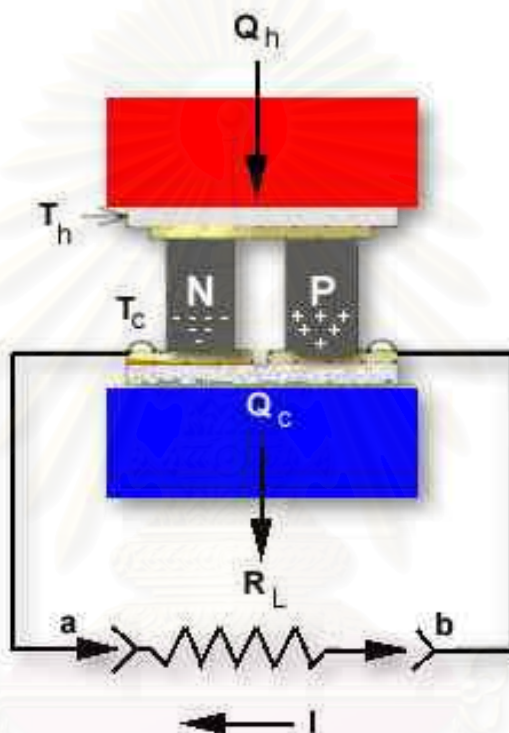
1. การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในระบบแปลงผันตรง (direct conversion) จากแหล่งความร้อน ไม่ต้องพึ่งการสะสมไฟฟ้าที่แบตเตอรี่
2. สามารถใช้ความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งที่มีเกรดต่ำได้ โดยไม่ต้องลงทุนในด้านแหล่งความร้อน เป็นการคืนกลับพลังงานที่สูญเสียไป
3. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากันมีการใช้พื้นที่น้อยกว่า
4. เซลล์ความร้อนมีความคงทนแข็งแรงและมีอายุใช้งานนาน
5. สามารถผลิตไฟฟ้าได้ต่อเนื่องตราบเท่าที่มีแหล่งความร้อนป้อนให้ระบบ ไม่ต้องรอธรรมชาติของพลังงานอื่นที่แปรผันตามฤดูกาล
6. สามารถติดตั้งในที่ร่มหรือภายในอาคารได้ ทำให้ดูแลรักษาง่าย ไม่ต้องกังวลเรื่องฝุ่นและฝนที่จะเป็นอุปสรรคต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า
7. สามารถประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานร่วมได้ง่าย เช่น พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน ไอน้ำ การนำความร้อนผ่านตัวกลาง รวมถึงเปลวความร้อนจากการเผาไหม้ เป็นต้น
8. ผลิตไฟฟ้าโดยไม่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนไหวจึงไม่มีเสียงดังรบกวน

### ข. ข้อด้อยของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนด้วยเซลล์ความร้อน

1. ต้นทุนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนยังค่อนข้างสูง เนื่องจากเซลล์ความร้อนยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย จึงยังไม่มีการผลิตเป็นจำนวนมากในเชิงพาณิชย์เท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีการค้นคว้าวิจัยนานกว่า 30 ปีแล้ว
2. เซลล์ความร้อนต้องทำงานด้วยอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนและระบายความร้อน ดังนั้นน้ำหนักรวมอุปกรณ์ของเซลล์ความร้อนจึงค่อนข้างหนัก
3. ปัจจุบันเซลล์ความร้อน (TEG) ที่มีจำหน่ายทั่วไปยังมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่ำ 4 – 5 %
4. การทำงานของเซลล์ความร้อนในประเทศเขตร้อน จำเป็นต้องยอมสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการระบายความร้อน
5. ในด้านการบำรุงรักษาต้องตรวจตราการกัดกร่อนอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนและระบายความร้อน เมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง

## 2.3 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน

ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วย TEG จำเป็นต้องทราบจำนวนเซลล์ความร้อนในการกำหนดขนาดพื้นที่ของอุปกรณ์ด้านอุณหพลศาสตร์รองรับการถ่ายเทความร้อนและระบายความร้อน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่โหลดได้ตามต้องการ จึงต้องมีการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนด้วยสมการดังนี้ [17]



รูปที่ 2.20 วงจรจ่ายไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน 1 เซลล์ ซึ่ง  $T_h > T_c$

จากวงจรในรูปที่ 2.20 ถ้าไม่มีการใส่โหลด (load) ภาวะการทำงานจะเป็นวงจรเปิด ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่าง a และ b จะได้

$$V = S \times \Delta T \quad \dots\dots\dots 2.3$$

- โดยที่
- V เป็น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเซลล์ความร้อน (V)
  - S เป็น ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (V/K)
  - $\Delta T$  เป็น ค่าผลต่างอุณหภูมิของเซลล์ความร้อน (K) ซึ่ง  $\Delta T = T_h - T_c$

เมื่อต่อโหลดกับเซลล์ความร้อน กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรจะเกิดแรงดันไฟฟ้าจำนวนหนึ่งตกคร่อมความต้านทานภายในของเซลล์แบ่งแรงดันไฟฟ้ากับโหลด มีผลให้แรงดันไฟฟ้าระหว่าง a และ b ลดลง โดยกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็น

$$I = \frac{S \times \Delta T}{R_C + R_L} \dots\dots\dots 2.4$$

- โดยที่ I เป็น ค่ากระแสที่เกิดขึ้น (A)  
 $R_C$  เป็น ค่าเฉลี่ยความต้านทานภายในของเซลล์ความร้อน ( $\Omega$ )  
 $R_L$  เป็น ค่าความต้านทานโหลด ( $\Omega$ )

ความต้องการอัตราปริมาณความร้อนทั้งหมดที่จ่ายให้กับเซลล์ความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_h = (S \times T_h \times I) - (0.5 \times I^2 \times R_C) + (K_C \times \Delta T) \dots\dots\dots 2.5$$

- โดยที่  $Q_h$  เป็น ค่าความร้อนที่รับเข้ามา (W)  
 $K_C$  เป็น ค่าความนำความร้อนของเซลล์ความร้อน (W/K)  
 $T_h$  เป็น อุณหภูมิด้านร้อนของเซลล์ความร้อน (K)

ซึ่งสามารถหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์ความร้อน ( $E_g$ ) ได้จาก

$$E_g = \frac{V \times I}{Q_h} \dots\dots\dots 2.6$$

ในกรณีที่ต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะต้องมีการเพิ่มจำนวนเซลล์ความร้อนอันดับกันและหากต้องการกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะต้องนำชุดเซลล์มาขนานกัน การจัดวงจรแบบผสมประกอบกันเป็นโมดูลเซลล์ความร้อนดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.21 ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางไฟฟ้างานนี้

$$V_o = S_M \times \Delta T = I \times (R_M + R_L) \dots\dots\dots 2.7$$

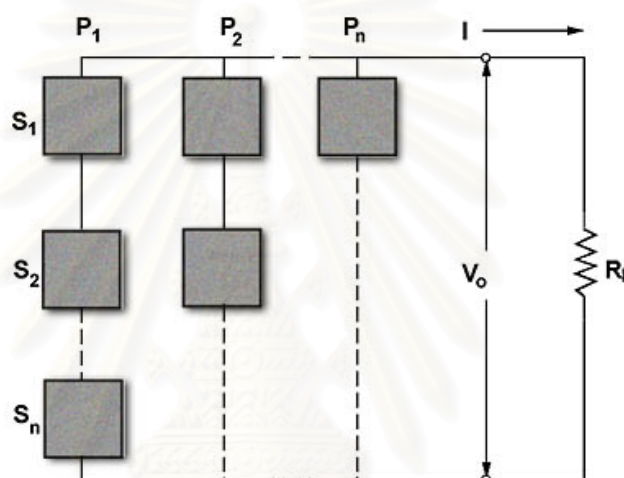
- โดยที่  $V_o$  เป็น ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น (V)  
 $S_M$  เป็น ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโมดูล (V/K)



$R_M$  เป็น ค่าเฉลี่ยความต้านทานของโมดูล ( $\Omega$ )  
 $M$  เป็น จำนวนเซลล์ที่อันดับกัน

กำลังไฟฟ้า ( $P_O$ ) ที่ได้จากการเพิ่มจำนวนเซลล์ เพื่อสร้าง โมดูลเซลล์ความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$P_O = R_L \times \left[ \frac{S_M \times \Delta T}{R_M + R_L} \right]^2 \dots\dots\dots 2.8$$



รูปที่ 2.21 การจัดวงจรแบบผสมเพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้า

ในการคำนวณหาจำนวนเซลล์ความร้อน เริ่มจากการพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และการจัดเรียงเซลล์ความร้อนทั้งอันดับและขนานกัน โดยจำนวนเซลล์ความร้อนหาได้จาก

$$N_T = N_S \times N_P \dots\dots\dots 2.9$$

โดยที่  $N_T$  เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนทั้งหมด  
 $N_S$  เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนต่ออันดับกัน  
 $N_P$  เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนต่อขนานกัน

จากวงจรรูปที่ 2.21 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดชนิดตัวต้านทาน จะมีค่าดังนี้

$$I = \frac{N_S \times S_M \times \Delta T}{\left( \frac{N_S \times R_M}{N_P} \right) + R_L} \quad \dots\dots\dots 2.10$$

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากชุดเซลล์ความร้อน ตามกฎของโอห์มจะมีค่าเป็น

$$V_O = \left[ \frac{N_S \times S_M \times \Delta T}{\left( \frac{N_S \times R_M}{N_P} \right) + R_L} \right] \times R_L \quad \dots\dots\dots 2.11$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากโมดูลเซลล์ความร้อน จึงหาได้จาก

$$P_O = V_O \times I = \frac{N_T \times (S_M \times \Delta T)^2}{4 \times R_M} \quad \dots\dots\dots 2.12$$

ปริมาณความร้อนที่ชุดเซลล์ความร้อนทั้งหมดต้องการใช้ในการกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีค่า

$$Q_h = N_T \times \left[ \frac{S_M \times T_h \times I}{N_P} - 0.5 \times R_M \times \left( \frac{I}{N_P} \right)^2 + K_M \times \Delta T \right] \quad \dots\dots\dots 2.13$$

และประสิทธิภาพของชุดเซลล์ความร้อนจะคำนวณได้จาก

$$E_g = \frac{P_O}{Q_h} \times 100\% \quad \dots\dots\dots 2.14$$

ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้น เมื่อความต้านทานภายในของชุดเซลล์ความร้อน ( $R_{GEN}$ ) เท่ากับความต้านทานของโหลด ( $R_L$ )

$$R_{GEN} = \frac{N_S \times R_M}{N_P} \quad \dots\dots\dots 2.15$$

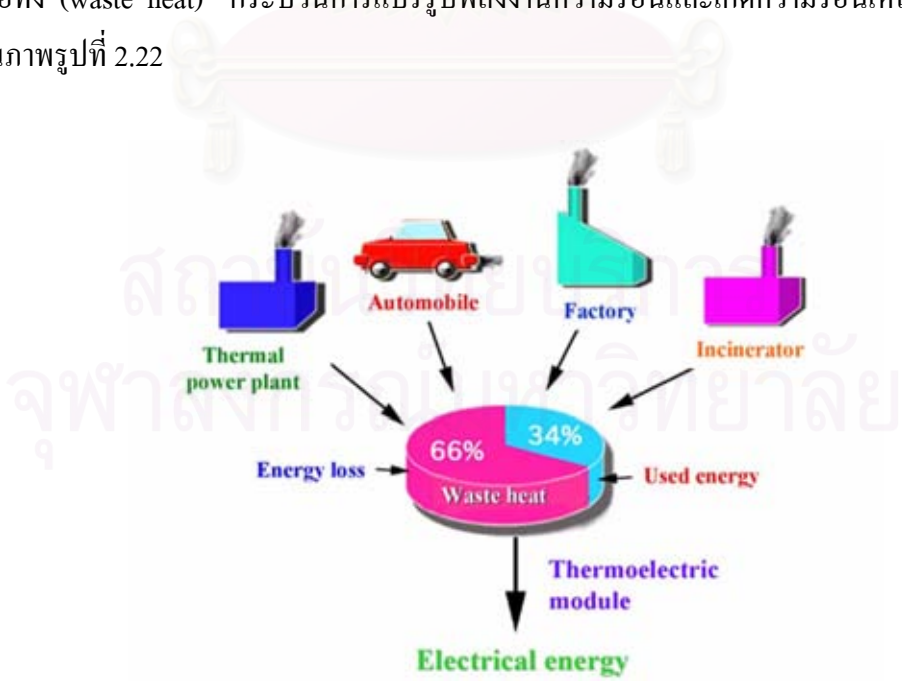
ค่า  $S_M$ ,  $R_M$  และความนำความร้อน ( $K_M$ ) ในบางกรณีอาจกำหนดจากอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังด้านร้อนและด้านเย็นของชุดเซลล์ความร้อน

$$T_{avg} = \frac{T_h + T_c}{2} \dots\dots\dots 2.16$$

**2.4 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง**

**2.4.1 ที่มาของความร้อนเหลือทิ้ง**

การเปลี่ยนรูปพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวมวล หรือปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น ไปเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันและงานด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การใช้ความร้อนสำหรับจักรกลไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การใช้ความร้อนเพื่อแปรรูปโลหะ การสันดาปเครื่องยนต์ การเผาขยะในระบบปิด และการทำความเย็นแบบ absorption เป็นต้น พบว่า ประสิทธิภาพของการนำความร้อนจากแหล่งพลังงานดังกล่าวไปใช้ประโยชน์นั้นทำได้เพียง 30 % – 40 % เท่านั้น ความร้อนส่วนเกินต้องทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระบายความร้อน ซึ่งต้องสูญเสียพลังงานไป 60 % - 70 % เนื่องจากข้อจำกัดของประสิทธิภาพคาร์โนต์ ( $\eta_c$ ) [1] ในการแปลงผันพลังงานตามวัฏจักรคาร์โนต์ดังสมการที่ 2.17 เรียกความร้อนที่ไม่ก่อประโยชน์นี้ว่า "ความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat)" กระบวนการแปรรูปพลังงานความร้อนและเกิดความร้อนเหลือทิ้งแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้พลังงานแหล่งต่าง ๆ [18]

$$\eta_c = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}} \dots\dots\dots 2.17$$

- โดยที่  $\eta_c$  เป็น ประสิทธิภาพคาร์โนต์
- $T_{hot}$  เป็น อุณหภูมิสัมบูรณ์ของแหล่งกำเนิดความร้อน
- $T_{cold}$  เป็น อุณหภูมิสัมบูรณ์ระบบถ่ายความร้อน

**2.4.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง**

ความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งกำเนิดความร้อนขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมหลอม

โลหะและโรงเผาขยะ นับเป็นแหล่งความร้อนเกรดสูง (high grade heat source) มีอุณหภูมิสูงมากกว่า 650 °C ส่วนโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า และความร้อนจากปล่องไอเสียเครื่องยนต์ จะมีอุณหภูมิปานกลางประมาณ 120 – 650 °C ขณะที่ความร้อนจากการหุงต้มหรือกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ใช้ไอน้ำแรงดันต่ำจะเป็นแหล่งความร้อนเกรดต่ำ (low grade heat source) มีอุณหภูมิสูงในช่วง 60 – 120 °C โดยประมาณ ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งประเภทต่าง ๆ ในตารางที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 [16] ซึ่งความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำกลับคืนมาใช้ได้ แทนที่จะทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยเปล่าประโยชน์ อีกประการหนึ่งลักษณะของแหล่งความร้อนนี้เป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก จึงสามารถนำมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนเพื่อคืนกลับพลังงานเหลือทิ้งมาเป็นพลังงานไฟฟ้า อันจะช่วยให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าเสริมตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน

ตารางที่ 2.2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง

Type of device	Temperature, °C	Temperature, °F
Nickel refining furnace	1371 – 1649	2500 - 3000
Aluminum refining furnace	649 – 760	1200 - 1400
Zinc refining furnace	760 – 1093	1400 - 2000
Copper refining furnace	760 – 816	1400 - 1500
Steel heating furnace	927 – 1038	1700 - 1900
Glass melting furnace	982 – 1538	1800 - 2800
Solid waste incinerators	649 – 982	1200 - 1800

ตารางที่ 2.3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง

Type of device	Temperature, °C	Temperature, °F
Steam boiler exhausts	123 – 482	450 – 900
Gas turbine exhausts	371 – 538	700 – 1000
Reciprocating engine exhausts	316 – 593	600 -1100
Heat treating furnace	427 – 649	800 – 1200
Drying and backing ovens	232 – 593	450 – 1100

ตารางที่ 2.4 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ

Type of device	Temperature, °C	Temperature, °F
Process steam condensate	54 – 88	130 – 190
Cooling water from :		
Furnace	32 -55	90 – 130
Bearing	32 – 88	90 – 190
Welding machines	32 – 88	90 – 190
Injection molding machines	32 – 88	90 – 190
Air compressor	27 – 49	80 – 120
Internal combustion engines	66 – 121	150 – 250
Air-cond. and refrig. condensers	62 – 43	90 – 110

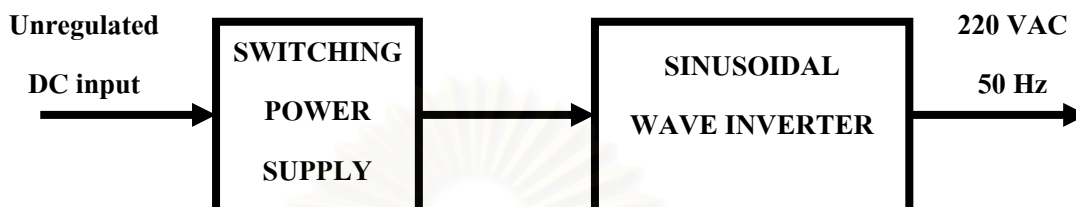
## 2.5 การแปลงผันไฟฟ้าจากเซลล์ความร้อนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

การนำกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้งาน มีสิ่งที่จะต้องพิจารณา 2 ประการ คือ

- ก. เนื่องจากไฟฟ้าที่กำเนิดจากเซลล์ความร้อนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ไม่สามารถนำมาใช้งานโดยตรงกับเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนซึ่งใช้ไฟฟ้ากระแสสลับมาตรฐาน 220 V, 50 Hz ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ
- ข. แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนจะแปรผันตามสภาวะการใช้งานของโหลด เนื่องจากผลของความต้านทานภายในของเซลล์ จำเป็นต้องมีระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่



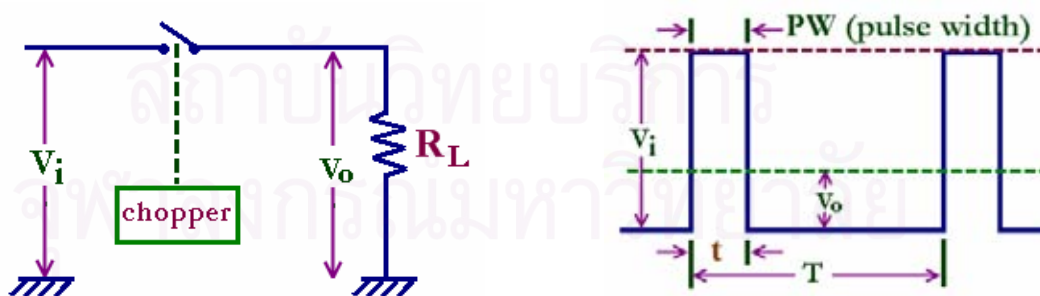
ดังนั้นในทางเทคนิคการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนจึงต้องมีระบบแปลงผันไฟฟ้า กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีประสิทธิภาพสูง ประกอบด้วย ระบบปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิคสวิตซิง (Switching technique) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง และระบบแปลงผันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal wave inverter) ดังแผนภาพในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แผนภาพระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

### 2.5.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง (switching power supply)

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีประสิทธิภาพสูง อาศัยการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์กำลัง (Power switching electronic) ความถี่สูง สามารถควบคุมแรงดันทางออกให้คงที่ได้แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าทางเข้าจะแปรเปลี่ยนในย่านกว้าง ด้วยการป้อนสัญญาณย้อนกลับ (Feedback) ในรูปของการปรับความถี่หรือความกว้างพัลส์ของสัญญาณขับวงจรสวิตซ์กำลังเพื่อชดเชยแรงดันทางออกให้มีระดับคงที่ โดยมีหลักการทำงานดังในรูปที่ 2.24 และการปรับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของวงจรสวิตซ์ดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ 2.25



ก. วงจรสวิตซ์พื้นฐาน

ข. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยทางออก ( $V_o$ )

รูปที่ 2.24 หลักการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตซิง

จากวงจรสวิตช์ในรูป 2.24 ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าบนโหลดสามารถคำนวณได้ดังนี้

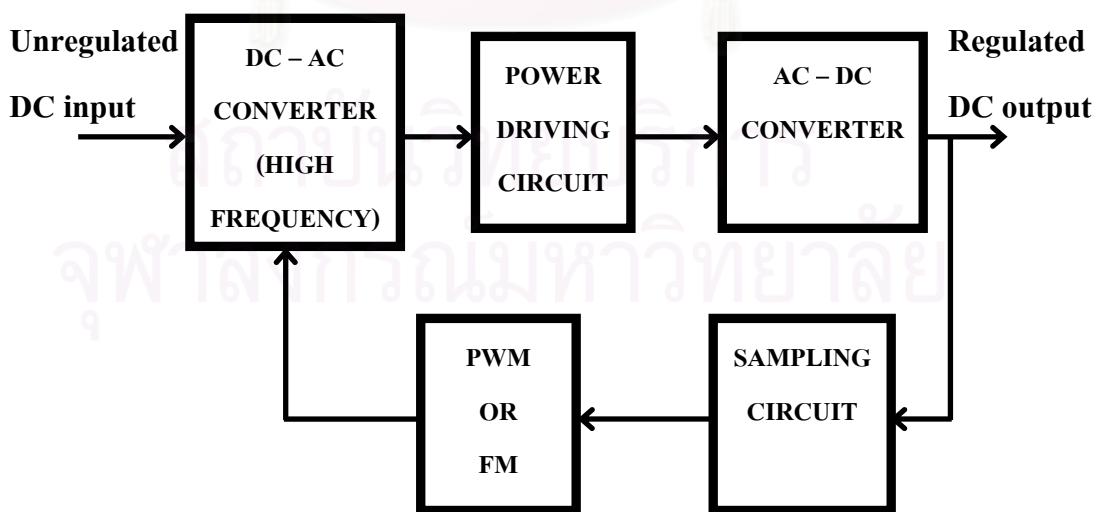
$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^t V_i dt$$

$$= \frac{V_i t}{T}$$

$$V_o = V_i f t \quad \dots\dots\dots 2.18$$

- โดยที่  $V_o$  เป็น ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าทางออก (V)
- $V_i$  เป็น แรงดันไฟฟ้าทางเข้า (V)
- $T$  เป็น คาบเวลาของสัญญาณขับวงจรสวิตช์ (s)
- $f$  เป็น ความถี่ของสัญญาณ =  $\frac{1}{T}$  (Hz)
- $t$  เป็น ความกว้างพัลส์ของสัญญาณ (s)

จากสมการที่ 2.18 แรงดันไฟฟ้าทางออกเป็นผลคูณของ แรงดันไฟฟ้าทางเข้า ( $V_i$ ) ความกว้างพัลส์ (Pulse width) และความถี่ (Frequency) ดังนั้นหากแรงดันไฟฟ้าทางเข้าแปรเปลี่ยนไม่คงที่ จึงสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าทางออกให้คงที่ได้ โดยการปรับความกว้างพัลส์หรือความถี่ของสัญญาณขับวงจรสวิตช์ให้สอดคล้องกับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าได้ ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงจึงมีส่วนประกอบที่สำคัญดังแผนภาพรูปที่ 2.25

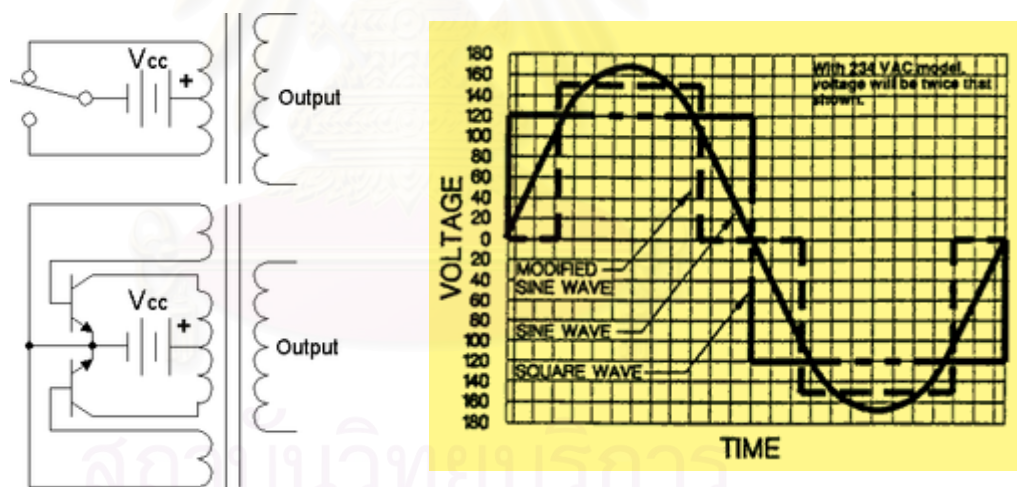


รูปที่ 2.25 แผนภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง เริ่มจากการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (20 - 200 kHz) ส่งให้วงจรสวิตช์กำลังเพื่อขับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบให้แปลงแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับการกรองความถี่ให้เรียบ ขณะที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางออกจะถูกส่งไปตรวจระดับแรงดันไฟฟ้าที่วงจรปรับแรงดันเพื่อป้อนกลับไปควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางออกให้คงที่ด้วยเทคนิคการปรับความถี่ เรียกว่า Frequency Modulation ; FM หรือ ปรับความกว้างพัลส์ เรียกว่า Pulse Width Modulation ; PWM ซึ่งการปรับแรงดันแบบ PWM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสามารถรองรับการปรับแรงดันไฟฟ้าได้ในย่านกว้างโดยไม่กระทบต่อความถี่ตอบสนองของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

### 2.5.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) [16]

อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ตามมาตรฐานระบบจ่ายไฟฟ้าสากล เช่น 110 V, 60 Hz หรือ 220 V, 50 Hz มีหลักการทำงานดังในแผนภาพรูปที่ 2.26



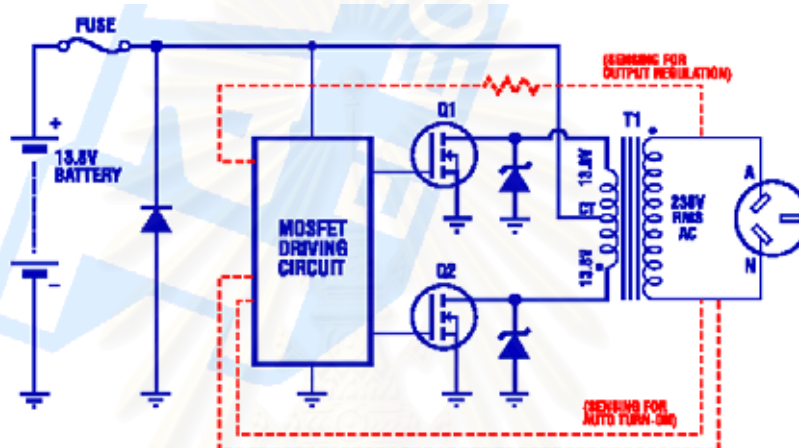
ก. วงจรแปลงผันไฟฟ้าพื้นฐาน

ข. รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าทางออก

รูปที่ 2.26 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

จากแผนภาพในรูป 2.26 การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อาศัยอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำออกแบบให้อัตรารอบขดลวด (Turn ratio) ของขดลวดปฐมภูมิรับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่และขดลวดทุติยภูมิเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทางออกตามที่ต้องการ ส่วนหลังเป็นวงจรสวิตช์กลหรืออุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลังที่ทำหน้าที่ตัดต่อ (Chopper)

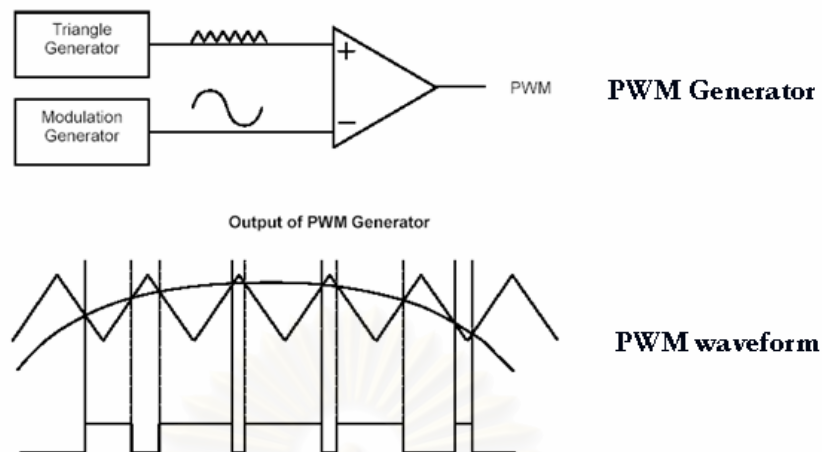
ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับตามความถี่ที่ต้องการ โดยรับการควบคุมการตัดต่อจาก วงจรกำเนิดคลื่นสัญญาณ รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับทางออกของวงจรพื้นฐานจะไม่ใช่รูปคลื่น ซายน์ที่สมบูรณ์ (Pure sine wave) จึงจำเป็นต้องพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้าให้มีคุณภาพในการ กำเนิดรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นซายน์ (Modified sine wave) ทั้งนี้ขึ้นกับเทคนิคการกำเนิดรูปคลื่น สัญญาณขับวงจรสวิทช์กำลังและการกรองคลื่นแผลง (Harmonic frequency) ที่ปนอยู่ ออก ดังนั้น วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีคุณภาพสูงจึงมีวงจรประกอบที่ซับซ้อนขึ้น ดังแผนภาพแสดงการทำงาน เบื้องต้นในรูปที่ 2.27



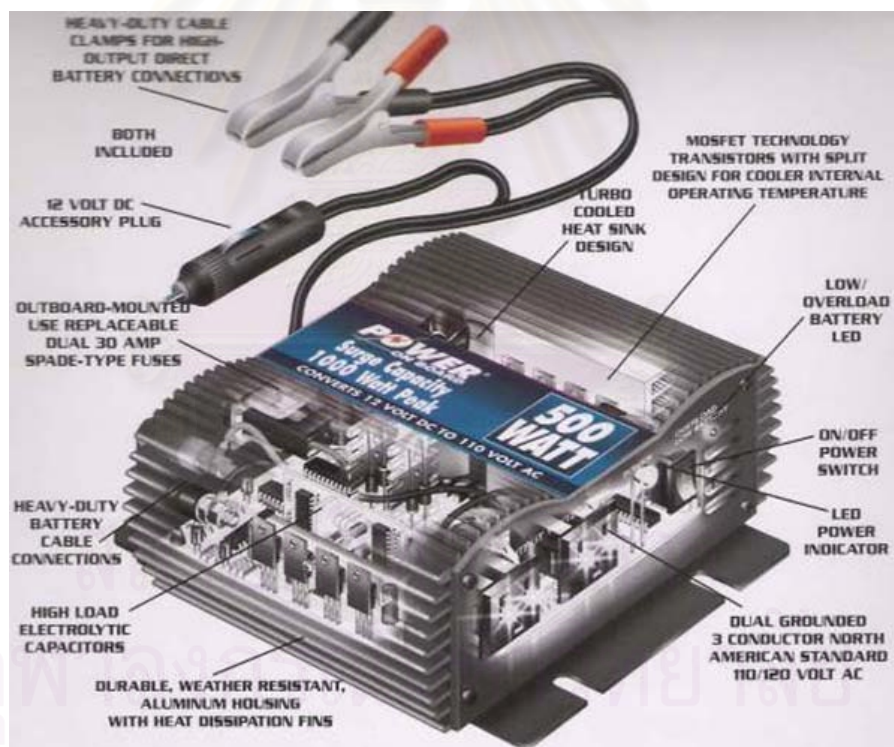
รูปที่ 2.27 แผนภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านสวิทช์กำลังมีความก้าวหน้ามาก วงจรอินเวอร์เตอร์ไม่ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้า แต่ใช้เทคนิคการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่าที่โหลดต้องการด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิทช์จ่ายให้วงจรอุปกรณ์สวิทช์กำลังขับโหลดโดยตรง และกำเนิดสัญญาณ รูปคลื่นซายน์ตัดแปลงด้วยเทคนิคการมอดูเลตความกว้างสัญญาณพัลส์ (PWM) เพื่อสร้าง สัญญาณขับอุปกรณ์สวิทช์กำลังทางออก ดังแสดงกระบวนการมอดูเลตสัญญาณรูปสามเหลี่ยมกับ สัญญาณรูปคลื่นซายน์สมบูรณ์ผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage comparator) ทำให้ได้ สัญญาณรูปเหลี่ยมทางออก (PWM waveform) ที่มีจังหวะความกว้างพัลส์สอดคล้องกับสัญญาณ รูปคลื่นซายน์ดังแสดงในรูป 2.28

หากมีการสวิทช์สัญญาณตามจังหวะความกว้างของพัลส์ให้ละเอียดมากขึ้น จะช่วยให้ได้ รูปคลื่นซายน์ตัดแปลงเพื่อขับโหลดที่สมบูรณ์ อันเป็นการลดคลื่นแผลง (Harmonic frequency) ที่ปน อยู่ลงและช่วยลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในกระบวนการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้า กระแสสลับลง นอกจากการขับโหลดโดยตรงด้วยเทคโนโลยีใหม่นี้จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม มากแล้ว อุปกรณ์ยังมีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก อีกด้วย



รูปที่ 2.28 การกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ตัดแปลง



รูปที่ 2.29 ภาพอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคโนโลยียุคใหม่



### บทที่ 3

#### การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W โดยอาศัยกระบวนการทำงานย้อนกลับของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) เพื่อผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์มาดัดแปลงเป็นเซลล์ความร้อน (TEG) จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เพื่อนำข้อมูลมาประกอบการออกแบบระบบถ่ายเทความร้อนและระบบระบายความร้อนจากเซลล์ความร้อนที่ดัดแปลงขึ้น รวมถึงแหล่งกำเนิดความร้อนที่จะใช้ทดสอบ ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

- การออกแบบและสร้างเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะของเซลล์ความร้อน
- การออกแบบและสร้างระบบถ่ายเทความร้อนให้เซลล์ความร้อน
- การออกแบบและสร้างระบบระบายความร้อนจากเซลล์ความร้อน
- การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน
- การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดความร้อนเหลือทิ้งจำลองสำหรับการทดสอบ
- การพัฒนาแบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

#### 3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะของเซลล์ความร้อน

เนื่องจากข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (specification) ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบทำความเย็นตามปรากฏการณ์ Peltier effect แต่งานวิจัยนี้ต้องการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เพื่อนำมาผลิตไฟฟ้าตามปรากฏการณ์ Seebeck effect ซึ่งเป็นการทำงานย้อนกลับทาง จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเครื่องมือขึ้นมาเฉพาะเพื่อทดสอบคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ในกรณีที่น่ามาประยุกต์ใช้ผลิตไฟฟ้า โดยอาศัยข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเซลล์ความร้อน ซึ่งอ้างอิงจากตัวอย่างข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEG) ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ ในภาคผนวก ก.

จากการศึกษาข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ พบว่าข้อมูลหลักที่จำเป็นในการออกแบบชุดเซลล์ความร้อนมี 5 ชนิด ได้แก่

$R_c$  = ความต้านทานภายในของเซลล์ (internal resistance) ( $\Omega$ )

$\Delta T$  = ความแตกต่างอุณหภูมิของเซลล์ (temperature difference) ( $^{\circ}\text{C}$ )

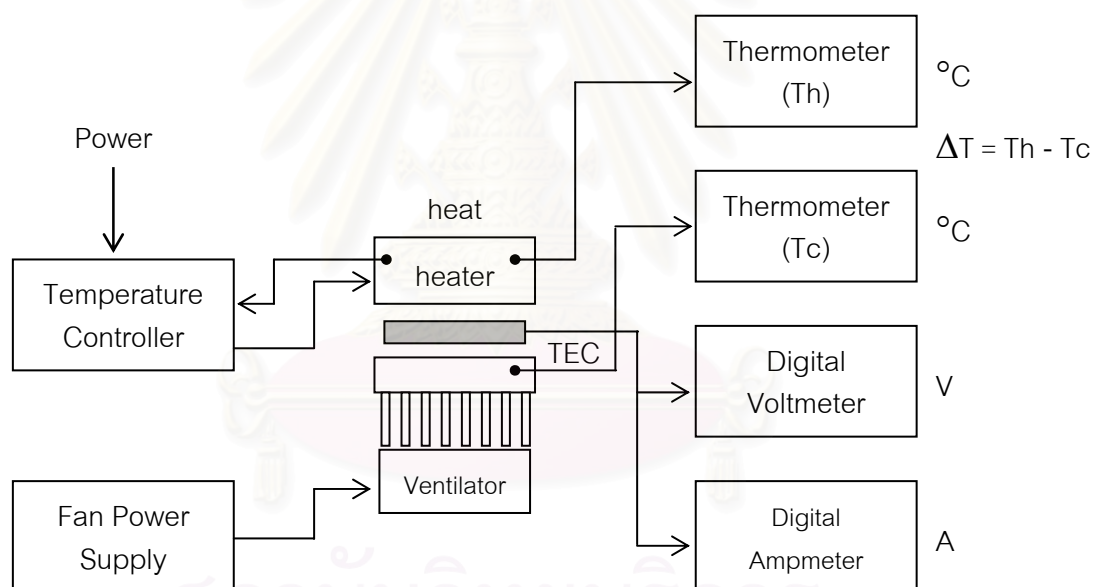
$V$  = แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage) (V)

$I_{sc}$  = กระแสลัดวงจร (short circuit current) (A)

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck coefficient) (V/K)

$\sigma$  = ความนำความร้อนของเซลล์ (Thermal conductance) (W/K)

ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ใช้สำหรับการคำนวณหาจำนวนเซลล์ความร้อนที่จะใช้ในการผลิตไฟฟ้าให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายแก่โหลดตามกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ดังนั้นระบบของเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะของเซลล์ความร้อนที่ออกแบบขึ้น จึงประกอบด้วยระบบย่อยต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลดังกล่าว ได้แก่ แหล่งกำเนิดความร้อนที่ปรับค่าอุณหภูมิได้และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เพื่อบันทึกข้อมูล ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลม และระบบอ่านข้อมูลอุณหภูมิรวมทั้งตัวแปรทางไฟฟ้า เพื่อใช้ศึกษาคุณลักษณะในการหาข้อมูลเซลล์ความร้อน ดังแสดงแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.1 การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล type k จำนวน 3 จุด ได้แก่ อุณหภูมิของแหล่งความร้อน อุณหภูมิของผนังเซลล์ด้านร้อน ( $T_h$ ) และอุณหภูมิของผนังเซลล์ด้านเย็น ( $T_c$ ) โดยชุดเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพของเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อน

ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อนที่สร้างขึ้น มีสมรรถนะดังนี้

ก. กำลังความร้อนที่สามารถผลิตได้ 100 W

ข. ควบคุมอุณหภูมิของแหล่งความร้อนได้ในย่าน  $30\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

ค. อ่านค่าอุณหภูมิได้ในย่าน  $0 - 199.9\text{ }^{\circ}\text{C}$

ง. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type k (chromel – alumel)

- จ. อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ในย่าน 0 - 50 V
- ฉ. อ่านค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์ในย่าน 0 - 5 A
- ช. ระบายความร้อนจากแผ่นระบายความร้อนด้วยพัดลม
- ฅ. ใช้กับระบบไฟฟ้า 220 Vac, 50 Hz



ก. แทนให้ความร้อนและอุปกรณ์ระบายความร้อน

ข. เครื่องทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อน

รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น

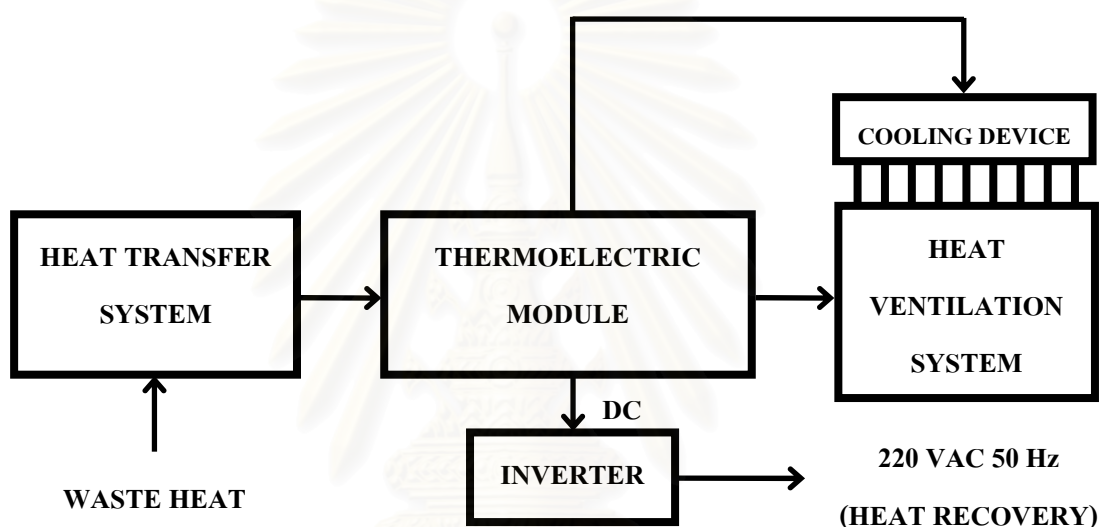
### 3.2 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยชุดเซลล์ความร้อน

#### 3.2.1 การออกแบบระบบกำเนิดไฟฟ้าเซลล์ความร้อน

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้เลือกใช้ TEC รุ่น TEC 1 - 12710 ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตามรายละเอียดในภาคผนวก ข. และผลการทดสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อใช้เป็นเซลล์ความร้อนในข้อ 4.1 พร้อมทั้งเลือกกระบอกจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันไฟฟ้าสูงที่ 200 V กระแสไฟฟ้าต่ำ ที่กำลังไฟฟ้า 50 W เพื่อความสะดวกในการจัดอุปกรณ์ตามหลักการส่งกำลังไฟฟ้าและการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่ออกแบบขึ้นจัดระบบการทำงานดังแผนภาพในรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยระบบย่อย 4 ระบบ ได้แก่

- ก. โมดูลเซลล์ความร้อน (Thermoelectric module)
- ข. ระบบถ่ายเทความร้อน (Heat transfer system)
- ค. ระบบระบายความร้อน (Heat ventilation system)
- ง. ระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter)

การทำงานเริ่มจากระบบถ่ายเทความร้อนรับความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ผ่านแผงอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนสู่ผนังเซลล์ด้านร้อน ความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียไปยังผนังด้านเย็นจากผลความนำความร้อนของเซลล์ จึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยแผ่นระบายความร้อนเพื่อระบายความร้อนสู่บรรยากาศ เป็นการรักษาความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังเซลล์ความร้อน ( $\Delta T = T_h - T_c$ ) ให้มากที่สุด สำหรับผลิตไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ  $200\text{ V}$  กำลังไฟฟ้า  $50\text{ W}$  ส่งให้ระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ  $220\text{ V}$  ความถี่  $50\text{ Hz}$  รูปคลื่นไซน์ อันเป็นการสร้างกระบวนการกักเก็บความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 แผนภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่ออกแบบขึ้น

### 3.2.2 การหาจำนวนเซลล์ความร้อนในการกำเนิดไฟฟ้า

จากผลการทดลองเบื้องต้นสามารถประเมินอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถ่ายความร้อนที่ผนังอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน เกิดการกระจายความร้อนไปทั่วผนังเซลล์ความร้อนด้านร้อนมีอุณหภูมิในภาวะสมดุลความร้อนประมาณ  $96\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $273.2 + 96 = 369.2\text{ K}$  ( $T_h$ ) ขณะที่อุณหภูมิผนังแผ่นระบายความร้อนมีพัลคมระบายความร้อนช่วย ในภาวะสมดุลของความร้อนจะมีอุณหภูมิประมาณ  $72\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $273.2 + 72 = 345.2\text{ K}$  ( $T_c$ ) เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ  $T_h - T_c = 369.2 - 345.2 = 24\text{ K}$  ทำให้สามารถคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยได้เป็น

$$\text{อุณหภูมิเฉลี่ย} = \frac{T_h + T_c}{2} = \frac{369.2 + 345.2}{2} = 357.2\text{ K}$$

จากการทดสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก TEC รุ่น TEC 1 - 12710 เพื่อใช้เป็นเซลล์ความร้อนด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นพบว่า TEC จำนวน 1 เซลล์ มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดประมาณ 1 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมากกว่า 0.3 A มีค่าสัมประสิทธิ์ซีบีค 0.04167 V/K และมีค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance) 1.48 K/W หรือค่าความนำความร้อน (thermal conductance) เท่ากับ  $1/1.48 = 0.67568$  W/K วัดความต้านทานภายในได้ประมาณ  $2 \Omega$  จากข้อมูลดังกล่าว สามารถนำมาใช้คำนวณหาจำนวนเซลล์ความร้อนด้วยสมการ 2.8 ถึง 2.16 ในบทที่ 2 ดังนี้

จากสมการ 2.12 กำลังไฟฟ้ามากที่สุดที่ได้จากเซลล์ความร้อนมีค่า

$$P_{\max} = \frac{(S_M \times \Delta T)^2}{4 \times R_M} = \frac{(0.04167 \times 24)^2}{4 \times 2} = 0.12502 \text{ W}$$

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 50 วัตต์ ดังนั้นจำนวนเซลล์ความร้อนที่ต้องนำมาประกอบเป็นโมดูลเซลล์ความร้อน คำนวณได้จาก

$$N_T = \frac{P_o}{P_{\max}} = \frac{50}{0.12502} = 399.936 \text{ หรือ } 400 \text{ เซลล์}$$

การจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบมีเงื่อนไข คือ ความต้านทานภายในเซลล์ความร้อนและความต้านทานโหลดต้องเท่ากันหรือใกล้เคียงกันและแรงดันไฟฟ้าของระบบจะลดลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือ  $R_{\text{TEC}} = R_L$  และ  $V_o = \frac{V_o}{2}$  จากสถานะนี้ได้นำมาพิจารณาในการจัดเรียงชุดเซลล์ความร้อน ทั้งอันดับและ/หรือขนานเพื่อให้ความต้านทานใกล้เคียงกับโหลด โดยค่าความต้านทานของโหลดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดหาได้จาก

$$\text{ค่าความต้านทานโหลด} = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{110^2}{50} = 242 \Omega$$

เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 200 V จะต้องนำเซลล์ความร้อนมาต่ออันดับกัน 200 เซลล์ จะได้ความต้านทานภายใน  $400 \Omega$  และขนานกับอีก 200 เซลล์ จะได้ความต้านทานภายใน  $\frac{200 \times 2}{2} = 200 \Omega$  ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานภายในของโมดูลเซลล์ความร้อนใกล้เคียงกับความต้านทานโหลด จากนั้นใช้สมการ 2.11 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าได้



$$V_o = \left[ \frac{N_s \times S_M \times \Delta T}{\left( \frac{N_s \times R_M}{N_p} \right) + R_L} \right] \times R_L = \left[ \frac{200 \times 0.04167 \times 24}{\left( \frac{200 \times 2}{2} \right) + 242} \right] \times 242 = 109.511V$$

จากผลการคำนวณข้างต้นสามารถนำมาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้เป็น

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{109.511^2}{242} = 49.556W_e$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการต่อโหลดผสม } I = \frac{P_o}{V_o} = \frac{50}{110} = 0.454A$$

การพิจารณาหาปริมาณความร้อนที่ต้องจ่ายให้กับโมดูลเซลล์ความร้อนใช้สมการ 2.13 ได้

$$\begin{aligned} Q_h &= N_T \left[ \frac{S_M \times T_h \times I}{N_p} - 0.5R_M \left( \frac{I}{N_p} \right)^2 + K_M \times \Delta T \right] \\ &= 400 \left[ \frac{0.04167 \times 369.2 \times 0.454}{2} - 0.5 \times 2 \left( \frac{0.454}{2} \right)^2 + 0.67568 \times 24 \right] \\ &= 7,862.8348 \text{ W}_{th} \end{aligned}$$

จากค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และปริมาณความร้อนที่ต้องการสามารถคำนวณประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนได้จาก

$$E_g = \frac{P_o}{Q_h} \times 100\% = \frac{49.556}{7,862.8348} \times 100\% = 0.63\%$$

### 3.2.3 การออกแบบโมดูลเซลล์ความร้อน

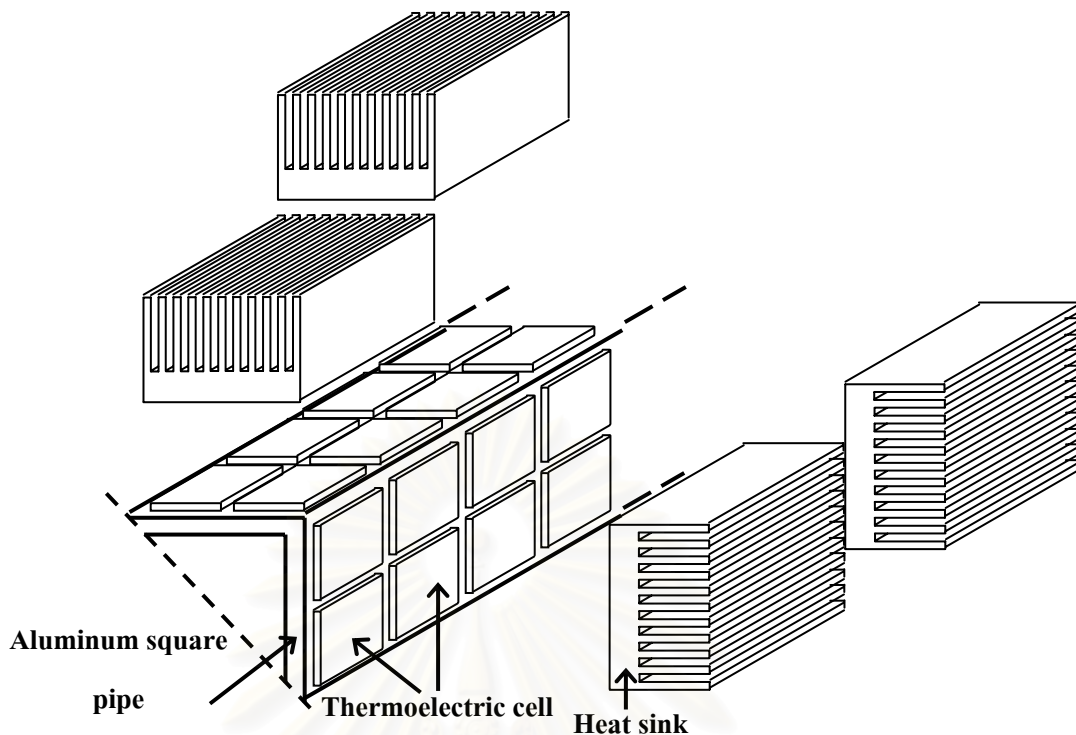
การออกแบบโครงสร้างโมดูลเซลล์ความร้อนจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมทางเทคนิค เช่น การเคลื่อนย้าย การติดตั้ง ประสิทธิภาพของระบบและการใช้งานกับแหล่งความร้อน เป็นต้น จึงมีสิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบดังนี้

1. การแนบสนิทบริเวณผิวสัมผัสของผนังเซลล์ที่ยึดประกบกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อน และระบายความร้อน เพื่อประสิทธิภาพในการทำงาน
2. การควบคุมน้ำหนักต่อหน่วยโมดูลเซลล์ความร้อนไม่ให้หนักเกินไป
3. การรักษาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ผนังเซลล์จากการกระจายความร้อนของไอน้ำในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน
4. การส่งไอน้ำเดือดที่แรงดันบรรยากาศปกติของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน เพื่อเลี่ยงการอัดแรงดันสูง
5. การป้องกันกระแสไหลย้อนด้วยไดโอด (Diode) ระหว่างเซลล์ เมื่อเกิดความแตกต่างแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนที่ขนานกัน
6. การระบายน้ำที่เกิดจากการควบแน่นในท่อและคืนกลับระบบผลิตไอน้ำ

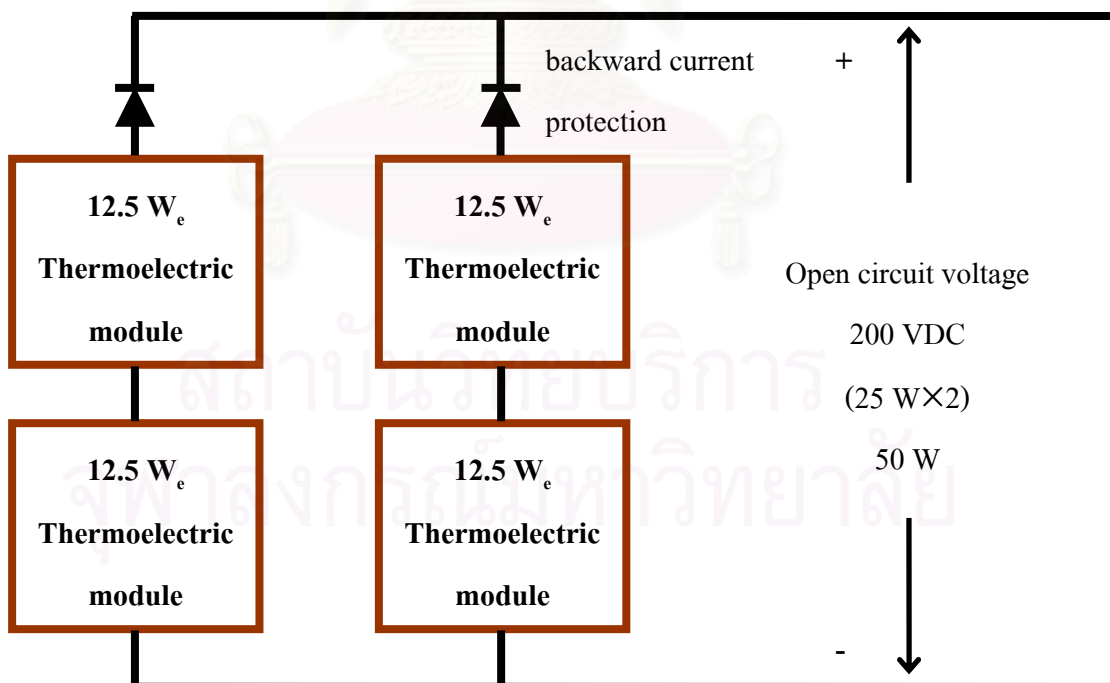
เมื่อพิจารณาคูสมบัติของเซลล์ความร้อนที่เลือกใช้ 1 เซลล์ มีขนาด  $4 \times 4$  ซม.<sup>2</sup> มีความหนาของเซลล์แต่ละเซลล์แตกต่างกันเล็กน้อย หากวิเคราะห์การจัดเรียงเซลล์ความร้อน 200 เซลล์ต่อโมดูลขนาด 25 W บนผนัง 4 ด้านของท่ออุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนทรงเหลี่ยม โดยวางเซลล์ด้านละ 2 เซลล์ รอบท่อจะวางเซลล์ได้  $2 \times 4 = 8$  เซลล์ ใช้ความยาวของท่อ 4 ซม. ดังนั้นต้องใช้ความยาวท่อถ่ายเทความร้อน =  $(200 \text{ เซลล์}) \times (4 \text{ ซม.}) / (8 \text{ เซลล์}) = 100$  ซม.

เมื่อประเมินความยาวของโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 1 ม. พบว่ามีน้ำหนักมากถึง 60 กก. มีผลให้การติดตั้งและเคลื่อนย้ายทำได้ลำบาก ความยาวท่อส่งผลให้แรงดันไอน้ำไม่เพียงพอที่จะกระจายความร้อนได้ทั่วถึง ฉะนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาจึงต้องแบ่งโมดูลเซลล์ความร้อนเป็นขนาด 12.5 W จำนวน 2 โมดูลและนำมาต่ออันดับกัน แต่ละโมดูลมีความยาว 50 ซม. เพื่อจัดวางเซลล์ 100 เซลล์ อย่างไรก็ตามการวางเซลล์ยังต้องพิจารณาความแนบสนิทของผิวสัมผัสผนังเซลล์ จึงจัดวางเซลล์เป็นกลุ่มละ 4 เซลล์ บนผนัง 4 ด้านของท่ออุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน เพื่อการจัดหาแผ่นระบายความร้อนได้ง่าย ถอดประกอบสะดวกเมื่อต้องการเปลี่ยนเซลล์ความร้อนในการซ่อมบำรุง

การจัดวางเซลล์ 1 กลุ่มใช้ความยาวท่อ 8 ซม. ความยาวท่อ 50 ซม. จะวางเซลล์ได้  $50/8 = 6.25$  กลุ่ม หรือประมาณ 6 กลุ่ม ดังนั้นท่ออุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจะวางเซลล์ได้เท่ากับ  $(6 \text{ กลุ่ม}) \times (4 \text{ ด้าน}) \times (4 \text{ เซลล์}) = 96$  เซลล์ จึงจะลงตัวพอดี เพื่อพื้นที่สำหรับยึดสกรูแต่ละกลุ่ม ดังแผนภาพในรูปที่ 3.4 และในรูปที่ 3.5 แสดงการจัดวางจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 W

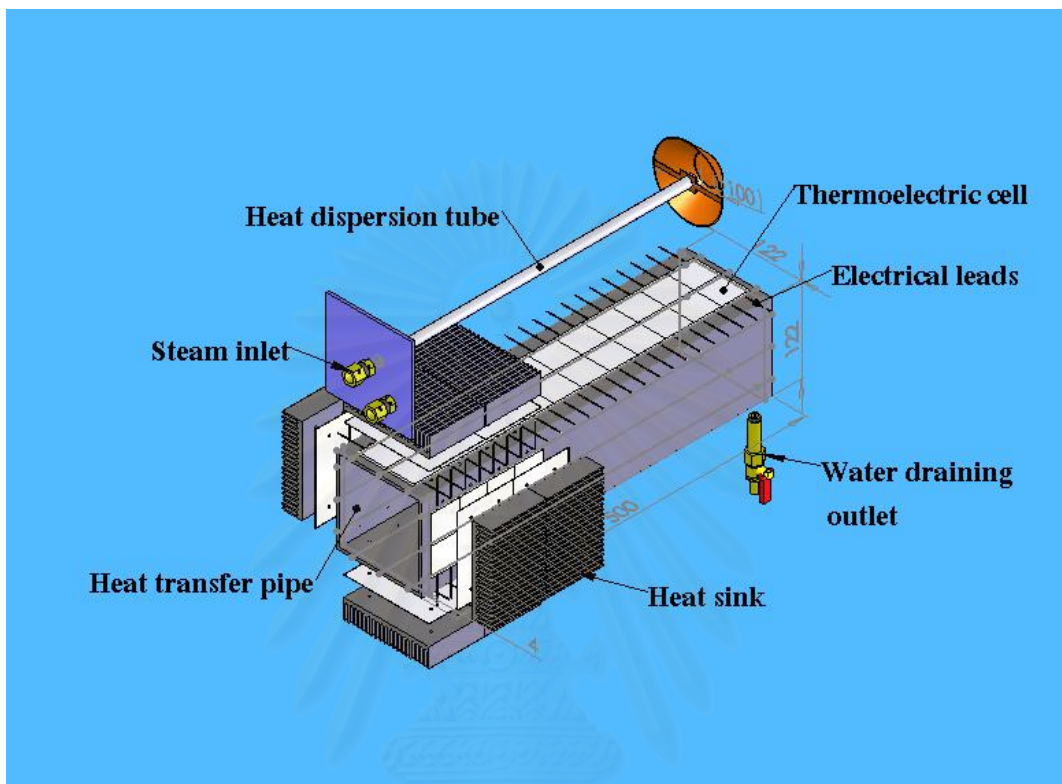


รูปที่ 3.4 แผนภาพการจัดกลุ่มเซลล์บน โมดูลเซลล์ความร้อน



รูปที่ 3.5 การจัดโมดูลเซลล์ความร้อนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเทคนิคดังกล่าวข้างต้นสามารถออกแบบโครงสร้างของโมดูลเซลล์ความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 12.5 W สำหรับผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนในรูปไอน้ำได้ดังแบบแปลนในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบแปลน โครงสร้างของ โมดูลเซลล์ความร้อนขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 12.5 W

### 3.2.4 การออกแบบระบบถ่ายเทความร้อน

#### 3.2.4.1 ท่อถ่ายเทความร้อน

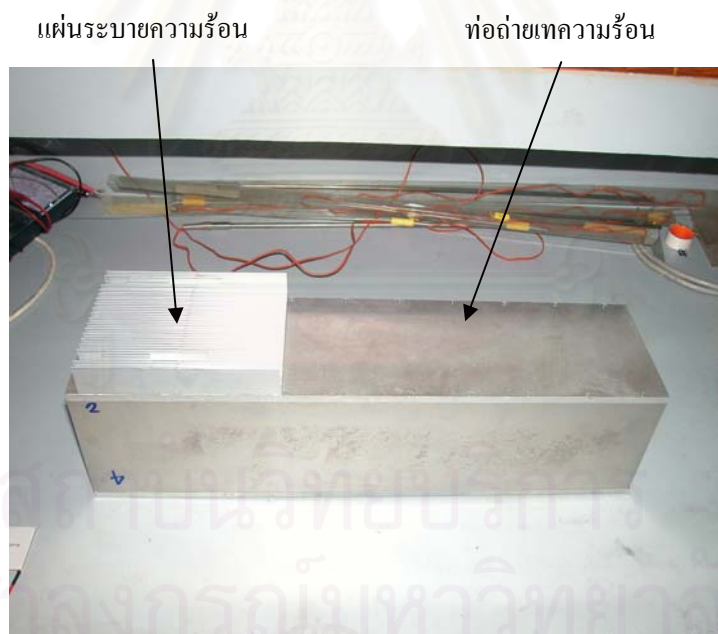
วัสดุที่เลือกใช้ทำท่อถ่ายเทความร้อนเป็นอลูมิเนียมผิวเรียบหนา 4 มม. ปลายท่อปิดด้วยแผ่นฉนวนความร้อนทำจากเบคก้าไลท์ หนา 4 มม. สำหรับติดตั้งหัวต่อทางเข้าและออกของไอน้ำ ขนาดของท่อถ่ายเทความร้อนประเมินจากผลวิเคราะห์การจัดวางเซลล์ความร้อนขนาด  $4 \times 4$  ซม.<sup>2</sup> ในข้อ 3.2.3 เพื่อพื้นที่ไว้สำหรับการประกอบกลุ่มเซลล์ ทำให้สามารถกำหนดขนาดของท่อ ได้ดังนี้

ขนาดปากท่อด้านใน	=	$11.4 \times 11.4$	ซม. <sup>2</sup>
ความยาวท่อเฉพาะที่วางเซลล์ความร้อน	=	$(24/2) \times 4 = 48$	ซม.
เพื่อความยาวท่อเพื่อเจาะยึดสกรู	=	$48 + 2 = 50$	ซม.
เพื่อความกว้างท่อเพื่อเจาะยึดสกรู	=	$11.4 + 0.8 = 12.2$	ซม.

สำหรับชิ้นส่วนประกอบของระบบถ่ายเทความร้อนประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ก. หัวต่อทองเหลืองขนาด  $\varnothing 2.54$  ซม. สำหรับทางเข้าไอน้ำ
- ข. หัวต่อทองเหลืองขนาด  $\varnothing 2.54$  ซม. พร้อมวาล์วสำหรับทางออกไอน้ำ และควบคุมแรงดันไอน้ำ
- ค. หัวต่อระบายน้ำขนาด  $\varnothing 0.40$  ซม. สำหรับระบายน้ำจากการควบแน่นไอน้ำภายในท่อออก
- ง. ท่อทองแดงขนาด  $\varnothing 1.27$  ซม. และยาว 49 ซม. พร้อมกรวยกระจายไอน้ำปลายท่อ
- จ. ฝานวนความร้อนปิดปลายท่อและติดตั้งหัวต่อทางเข้าและออกของไอน้ำขนาด  $12.2 \times 12.2$  ซม.<sup>2</sup>

ในรูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของท่อถ่ายเทความร้อนที่ประกอบจากแผ่นอลูมิเนียมผิวเรียบทรงกระบอกกลวงเหลี่ยมขนาดความยาว 50 ซม.



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของท่อถ่ายเทความร้อน





ก. ท่อกระจายไอน้ำ



ข. หัวต่อทางเข้าไอน้ำเดือด

รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ประกอบของระบบถ่ายเทความร้อน

### 3.2.4.2 อุปกรณ์กระจายไอน้ำ

ระบบถ่ายเทความร้อนให้แก่เซลล์ความร้อนนั้น ต้องออกแบบให้ไอน้ำกระจายตัวได้ทั่วถึง เพื่อความสม่ำเสมอของอุณหภูมิผนังท่อและถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงทดสอบการกระจายความร้อน 2 วิธี และเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ผนังท่อด้านนอก ดังนี้

ก. ผลการกระจายความร้อนด้วยท่อกระจายไอน้ำที่ทำด้วยทองแดงกลาง ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.27 ซม. ยาว 49 ซม. ที่ปลายท่อมักวางทองแดงช่วยกระจายไอน้ำภายในท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ก. จัดทางเข้าและทางออกไอน้ำบนฝาท่อด้านเดียวกัน จากการทดลองพบว่าการกระจายความร้อนด้วยวิธีนี้ สามารถทำให้อุณหภูมิที่ผนังด้านนอกสูงเพียง 50 °C เนื่องจากไอน้ำถ่ายเทความร้อนให้ท่อกระจายความร้อนและมีการควบแน่นเป็นน้ำในท่อ อุณหภูมิจึงลดลงก่อนถ่ายให้ผนังท่ออุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน ดังนั้นเพื่อยืนยันผลวิเคราะห์จึงได้ทดลองเปลี่ยนท่อกระจายไอน้ำที่เป็นฉนวนความร้อน โดยเลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 ซม. และมีการเจาะรูรอบท่อพีวีซี เพื่อกระจายไอน้ำและถ่ายเทความร้อนแก่ผนังท่อภายในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน พบว่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น การควบแน่นในท่อกระจายไอน้ำน้อยลง อุณหภูมิผนังด้านนอกเพิ่มขึ้นเป็น 65 – 70 °C แต่ยังไม่ถึงระดับที่ประเมินไว้ (ภาคผนวก ค.) และท่อพีวีซีไม่สามารถทนความร้อนได้

ข. ผลการกระจายความร้อนด้วยการฟุ้งกระจายและอัดแรงดันไอน้ำ โดยไม่ใช้ท่อกระจายความร้อน และจัดทางเข้าและทางออกไอน้ำบนฝาปิดปลายท่อด้านตรงข้ามกัน เลือกหัวต่อทางเข้าไอน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 ซม. และทางออกไอน้ำปรับวาล์วจนกระทั่งได้อุณหภูมิผนังท่ออุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด พบว่าสามารถทำอุณหภูมิผนังท่อด้านนอกสูงถึง 96 °C

ตำแหน่งวาล์วที่ปรับได้มีขนาดเทียบเท่าการใช้ท่อทางออกไอน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.635 ซม. ในงานวิจัยจึงเลือกการกระจายไอน้ำด้วยวิธีนี้เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงกว่า

### 3.2.5 การออกแบบระบบระบายความร้อน

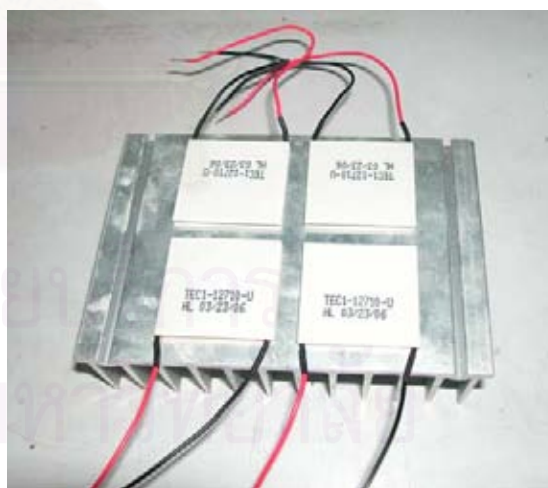
ประสิทธิภาพของการกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน ขึ้นกับความแตกต่างอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็นของเซลล์ความร้อน แต่เนื่องจากการนำความร้อนของเซลล์ความร้อนเองทำให้ความร้อนส่วนหนึ่งจากผนังด้านร้อนข้ามมาสะสมที่ผนังด้านเย็น จึงจำเป็นต้องจัดระบบระบายความร้อนเพื่อระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศ

#### 3.2.5.1 การระบายความร้อนด้วยแผ่นระบายความร้อน

การระบายความร้อนจากผนังเซลล์ด้านเย็น เลือกใช้แผ่นระบายความร้อน (heat sink) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronic device) ที่ทำด้วยอลูมิเนียมรีดเย็นผิวเรียบ มีพื้นที่หน้าตัดสำหรับการติดตั้งกลุ่มเซลล์ความร้อนชุดละ 4 เซลล์ ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการติดตั้ง และหน้าสัมผัสสามารถรับความร้อนได้เต็มที่ แผ่นระบายความร้อนต้องมีจำนวนครีบมากจะได้มีพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนออกจากผนังเซลล์ความร้อนให้มากที่สุด เพื่อช่วยลดอุณหภูมิผนังเซลล์ด้านเย็นให้ใกล้เคียงอุณหภูมิแวดล้อมด้วยวิธีธรรมชาติ สำหรับการจัดวางกลุ่มเซลล์ความร้อนบนแผ่นระบายความร้อนแสดงในรูปที่ 3.9



ก. แผ่นระบายความร้อนชนิดอลูมิเนียม

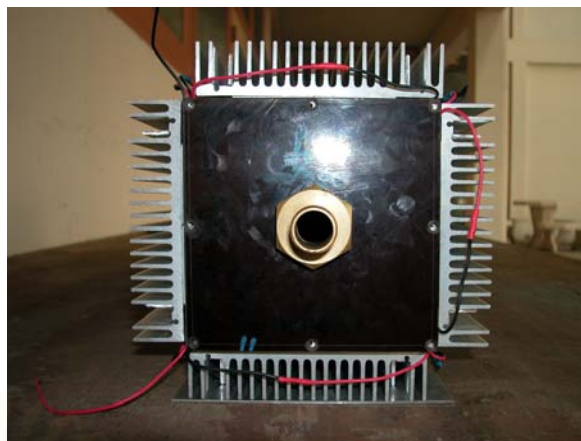


ข. แสดงการวางเซลล์บนแผ่นระบายความร้อน

รูปที่ 3.9 แสดงการจัดวางเซลล์ความร้อนบนแผ่นระบายความร้อน



ก. โมดูลเซลล์ความร้อนด้านข้าง



ข. โมดูลเซลล์ความร้อนด้านหน้า

รูปที่ 3.10 โมดูลเซลล์ความร้อนที่ติดตั้งเซลล์ความร้อนและแผ่นระบายความร้อนรอบด้าน

### 3.2.5.2 การระบายความร้อนด้วยพัดลม

เนื่องจากบ้านเราเป็นประเทศในเขตร้อน จากผลทดสอบการระบายความร้อนโดยธรรมชาติจากครีระบายความร้อน พบว่าไม่สามารถระบายความร้อนออกจากผนังเซลล์ด้านเย็นได้ทันและเกิดการสะสมความร้อน ทำให้ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังเซลล์มีน้อย การผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้พัดลมช่วยระบายความร้อนจากผิวครีระบายความร้อน

การออกแบบชุดพัดลมระบายความร้อน ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพการระบายความร้อนด้วยพัดลม โดยจัดอุปกรณ์บังคับทิศทางลมในแนวขนานกับช่องครีระบายความร้อน และวัดผลการลดอุณหภูมิที่ผนังเซลล์ด้านเย็น เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งพัดลม ในขั้นต้นได้ทดลองติดตั้งพัดลมเดี่ยวขนาดกำลังไฟฟ้า 30 W ที่ปลายโมดูลเซลล์ความร้อน ริดลมจากด้านทางเข้าไปยังปลายทางออก ซึ่งมีระยะทาง 50 ซม. พบว่าเกิดการสะสมความร้อนระหว่างทาง ด้านปลายทางออกจะมีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่แผ่นครีระบายความร้อนที่อยู่ปลายทางสูงกว่าด้านทางลม ส่งผลต่อการกำเนิดไฟฟ้าโดยรวมลดลง จึงเปลี่ยนวิธีใหม่ใช้พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง 12 V กำลังไฟฟ้า 6 W จำนวน 4 ตัว ติดตั้งที่กึ่งกลางโมดูลในแนวตั้งฉากกับครีระบายความร้อนและบังคับทิศทางลมให้ลาดลงสู่ช่องครีระบายความร้อนเพื่อให้ลมเคลื่อนที่ผ่านได้สะดวก ชุดพัดลมระบายความร้อนที่ออกแบบขึ้นจะติดตั้งรอบโมดูลดังในรูปที่ 3.11 จากการทดลองพบว่าการระบายความร้อนดีขึ้น มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตั้งแต่บนแผ่นระบายความร้อน อุณหภูมิที่ปลายโมดูลทั้งสองด้านใกล้เคียงกัน ทำให้ได้ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังเซลล์สูงขึ้นเป็น 23 - 24 °C

ด้วยเหตุนี้ในการทดลองผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจึงต้องสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อจ่ายให้พัดลมระบายความร้อน 24 W แต่ในการใช้งานกับแหล่งความร้อนเหลือทิ้งจะมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำมาทดแทนกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้



ก. ชุดพัดลมระบายความร้อน



ข. ชุดพัดลมระบายความร้อนบนโมดูล

รูปที่ 3.11 การติดตั้งชุดพัดลมระบายความร้อนรอบ โมดูลเซลล์ความร้อน

### 3.3 การสร้างโมดูลเซลล์ความร้อน

จากผลการออกแบบระบบต่าง ๆ ข้างต้นสามารถปรับแบบโครงสร้างของโมดูลเซลล์ความร้อนได้ดังในรูปที่ 3.12 เพื่อนำไปประกอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน โดยการประกอบระบบต่าง ๆ จะต้องคำนึงถึงเรื่อง การถ่ายเทความร้อน การระบายความร้อน การสูญเสียความร้อน และการขยายตัวของเซลล์ความร้อนเป็นสำคัญ โดยมีข้อสรุปดังนี้

ก. การติดตั้งเซลล์ความร้อนต้องใช้สารประสานแผ่นระบายความร้อน (Heat sink compound) เคลือบผนังเซลล์ เพื่อช่วยเพิ่มการนำความร้อนจากผนังเซลล์ ดังในรูปที่ 3.13 ก.

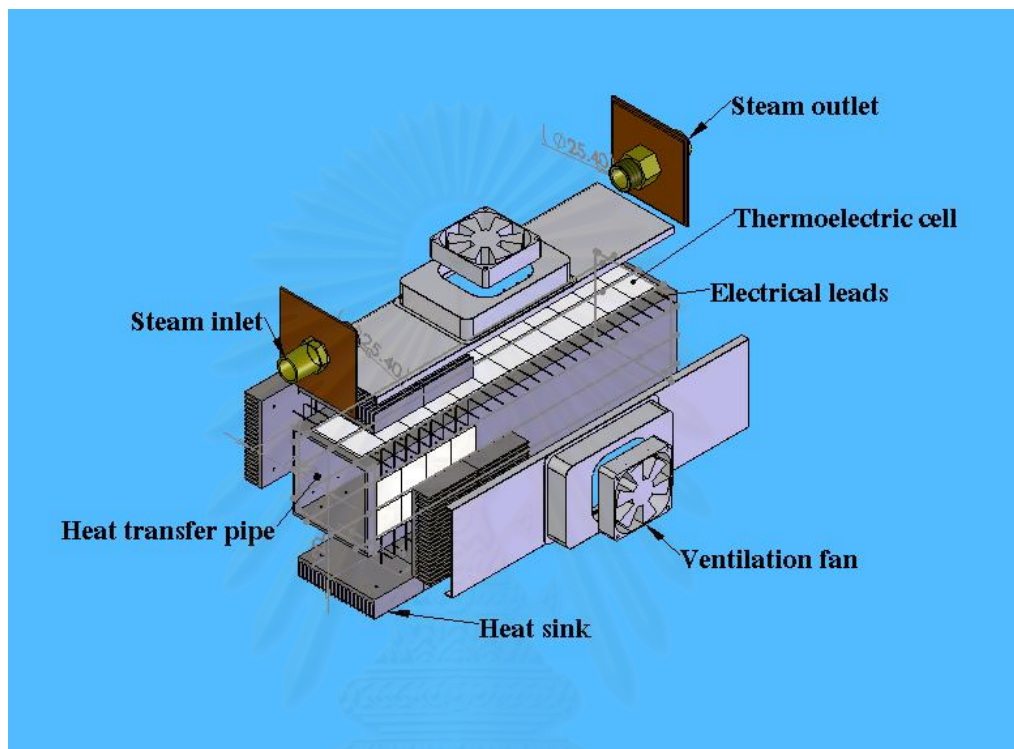
ข. การยึดกลุ่มเซลล์ต้องจัดสกรูยึด 4 มุม เพื่อกระจายแรงกดจากแผ่นระบายความร้อนให้มีความสม่ำเสมอ ดังในรูปที่ 3.13 ข. ในการยึดสกรูต้องระวังแรงกดที่มากเกินไปหรือขาดสมดุลจะทำให้เซลล์แตก

ค. สกรูยึดแผ่นระบายความร้อนต้องมีขนาดป้องกันไม่ให้ความร้อนจากผนังเซลล์ด้านร้อนถ่ายเทมายังแผ่นระบายความร้อนโดยตรง และสกรูควรใส่แหวนสปริงสำหรับการขยายตัวในแนวความหนาของเซลล์ความร้อนขณะทำงาน

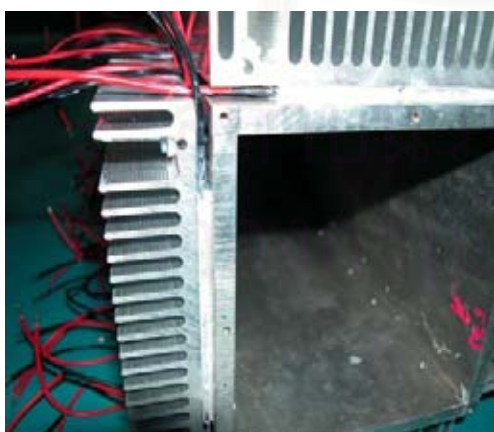


ง. ตามแนวตะเข็บของท่ออุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนต้องใส่สารประสาน (Gasket sealant) ให้เชื่อมสนิทเพื่อป้องกันไอน้ำรั่ว

จ. การเจาะทางระบายน้ำต้องตำแหน่งชิดผนังด้านล่างของโมดูลเพื่อป้องกันการรั่วของน้ำที่เกิดจากการควบแน่น



รูปที่ 3.12 แบบโครงสร้างส่วนประกอบของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น



ก. การประกอบเซลล์ความร้อน

ข. การยึดกลุ่มเซลล์ใต้แผ่นระบายความร้อน

รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์บนท่อถ่ายเทความร้อนและประกบด้วยแผ่นระบายความร้อน



คุณสมบัติทางกายภาพของโมดูลเซลล์ความร้อนขนาดแรงดันไฟฟ้า 200 VDC กำลังไฟฟ้า 12.5 W ที่พัฒนาขึ้นมีรายละเอียดดังนี้

ขนาดพื้นที่หน้าตัด	12.2 × 12.2	ซม. <sup>2</sup>
ความยาวของโมดูล	50	ซม.
น้ำหนักรวม	30	กก.
ขนาดหัวต่อท่อทางเข้าไอน้ำ	2.54	ซม.
ขนาดท่อระบายน้ำ	0.40	ซม.
จำนวนเซลล์ความร้อน	96	เซลล์



รูปที่ 3.14 โมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 200 V DC, 12.5 W ที่พัฒนาขึ้น

### 3.4 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดความร้อนเหลือทิ้งจำลองสำหรับการทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ จำเป็นต้องใช้แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจำลอง งานวิจัยนี้เลือกการผลิตความร้อนจากไอน้ำเดือดที่ความดันบรรยากาศป้อนให้ระบบกำเนิดไฟฟ้า โดยการผลิตไอน้ำใช้วิธีการต้มน้ำด้วยเตาถ่านหุงต้ม

การออกแบบชุดผลิตไอน้ำเดือดอาศัยข้อมูลจากการคำนวณในข้อ 3.2.3 ซึ่งโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 50 W ต้องการปริมาณความร้อน 7,862.8348 W ดังนั้นโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 12.5 W จะต้องการปริมาณความร้อน  $7,862 / 4 = 1,965$  W ในการทดลองเบื้องต้นได้ใช้เตาไฟฟ้าขนาด 2,000 W ผลิตไอน้ำจากน้ำ 2 ลิตรด้วยกาต้มน้ำขนาด 4 ลิตร 1 ชุด ป้อนให้โมดูลเซลล์ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.15 พบว่าปริมาณไอน้ำไม่เพียงพอ มีผลให้อุณหภูมิที่ผนังเซลล์ด้านร้อนปลายท่อทางออกไอน้ำต่ำประมาณ 60 °C จึงได้เพิ่มชุดผลิตไอน้ำอีก 1 ชุด ป้อนเข้าด้านตรงข้าม ดัง

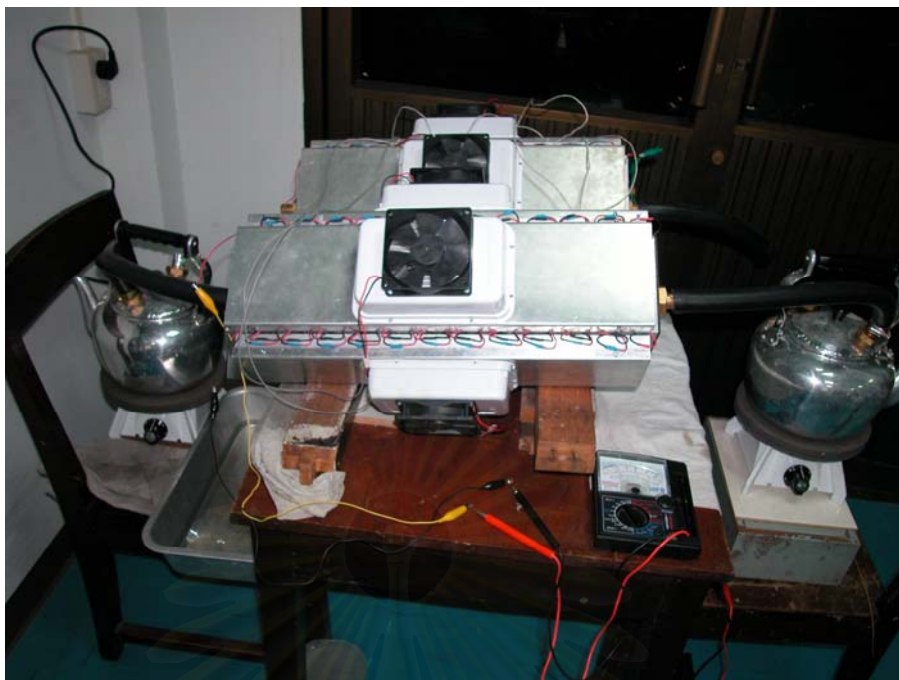
แสดงในรูปที่ 3.16 พบว่าอุณหภูมิที่ผนังเซลล์ด้านร้อนสูงถึง  $98\text{ }^{\circ}\text{C}$  และผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า  $12.5\text{ W}$  รวมกำลังไฟฟ้าที่ใช้ผลิตไอน้ำ  $4,000\text{ W}$  ประสิทธิภาพในการผลิตความร้อนประเมินได้เท่ากับ  $(1,965 / 4,000) \times 100 = 49.125\%$

จากข้อมูลเบื้องต้นนี้นำมาประเมินเพื่อออกแบบชุดผลิตไอน้ำจากการต้มน้ำด้วยเตาถ่านหุงต้ม โดยโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด  $2 \times 12.5 = 25\text{ W}$  ต้องการปริมาณความร้อน  $7,862 / 2 = 3,931\text{ W}$  และประสิทธิภาพในการผลิตความร้อนประมาณ  $30\%$  จะต้องใช้ปริมาณความร้อนจากเตาหุงต้ม  $13,103.33\text{ W}$  หรือ  $44,721.28$  บีทียู / ชั่วโมง ( $1\text{ บีทียู} / \text{ชั่วโมง} = 0.293\text{ วัตต์}$ ) เพื่อต้มน้ำ  $10.16$  ลิตร ด้วยถังบรรจุน้ำมันก๊าดขนาด  $20$  ลิตร โดยจัดระบบผลิตไอน้ำได้ดังในรูปที่ 3.17

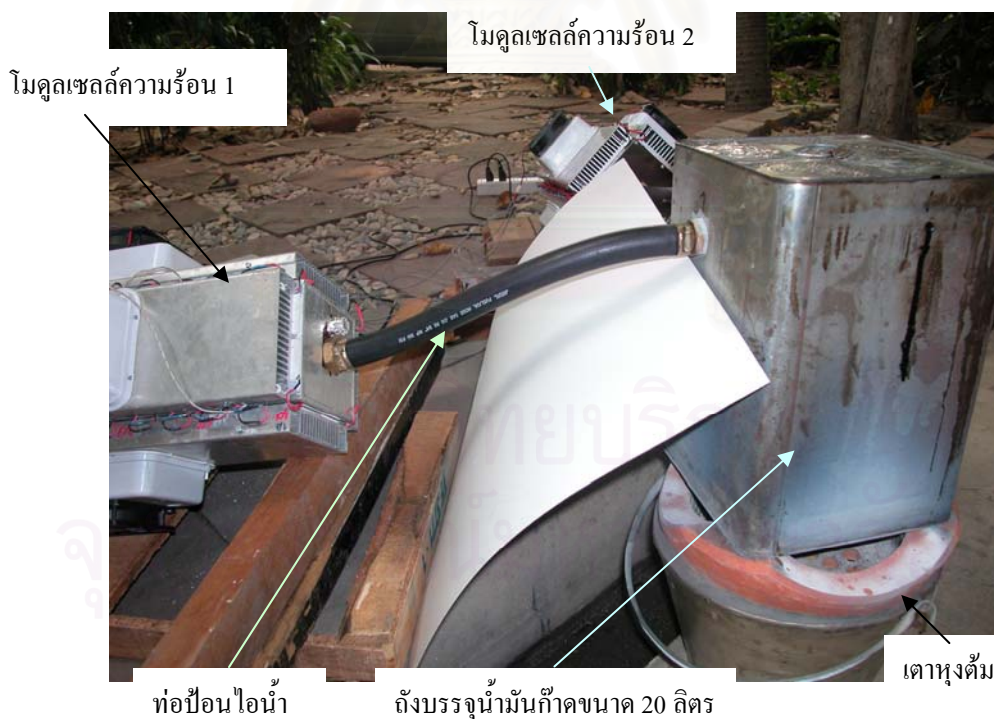


รูปที่ 3.15 การผลิตไอน้ำด้วยเตาไฟฟ้าต้มน้ำแทนความร้อนเหลือทิ้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



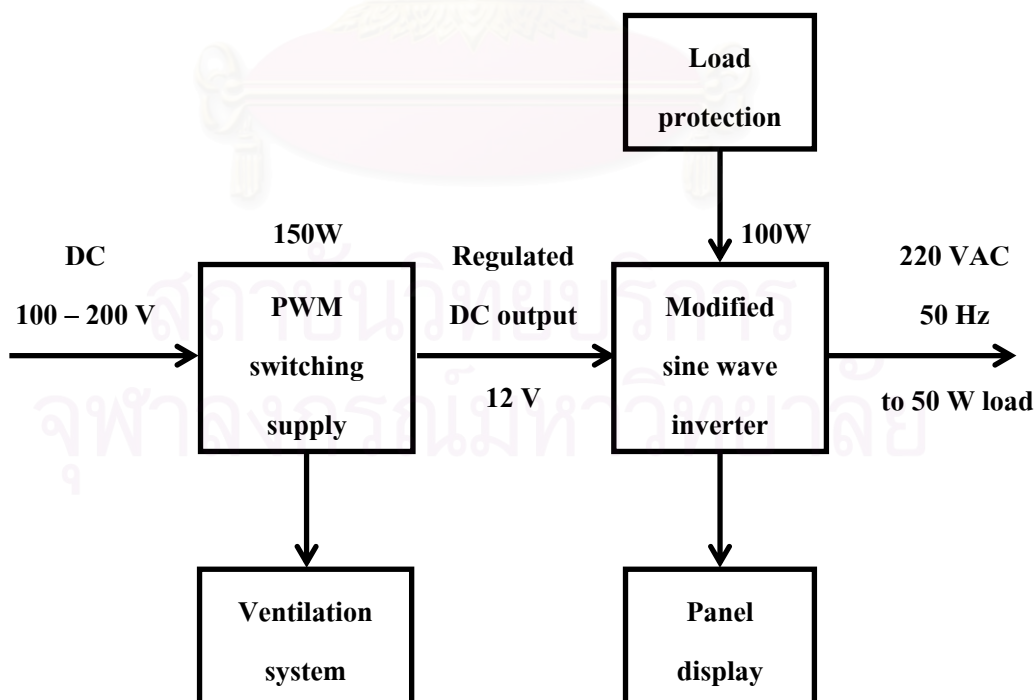
รูปที่ 3.16 การผลิตไอน้ำด้วยชุดเตาไฟฟ้าต้มน้ำ 2 ชุด



รูปที่ 3.17 ชุดผลิตไอน้ำที่พัฒนาขึ้นสำหรับจำลองแหล่งความร้อน

### 3.5 การพัฒนาระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

จากผลการคำนวณเพื่อออกแบบชุดโมดูลเซลล์ความร้อน จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าของโมดูลแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 100 และ 200 โวลต์ ขึ้นกับการเรียกใช้กำลังไฟฟ้าของโหลด ดังนั้นการออกแบบระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องจัดระบบให้สามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านขาเข้าของระบบแปลงผันไฟฟ้าให้คงที่ ด้วยเทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตชิงซิกนัลการปรับความกว้างพัลส์ (PWM) ก่อนที่จะทำการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ และเลือกรูปแบบการกำเนิดคลื่นด้วย modified sine เนื่องจากประหยัดและมีประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าสูงกว่าแบบรูปคลื่นไซน์สมบูรณ์ (pure sine) ดังนั้นระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกแบบขึ้นจึงมีแผนภาพการทำงานดังในรูปที่ 3.18 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำแบบสวิตชิงควบคุมแรงดันคงที่ด้วยเทคนิค PWM (pulse width modulation) และระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีวงจรถับทางออกแบบฟูลบริดจ์ (full bridge drive) มีระบบป้องกันการลัดวงจรหรือจ่ายกระแสเกิน พร้อมมิเตอร์แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากโมดูลเซลล์ความร้อนและมิเตอร์แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากอินเวอร์เตอร์ (Inverter) พร้อมชุดระบายความร้อนด้วยพัดลม โดยจัดระบบให้มีกำลังไฟฟ้าเพื่อไว้สองเท่าของกำลังผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.18 แผนภาพระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ



เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบขึ้นจากการออกแบบมี  
โครงสร้างดังในรูป 3.19 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เต็มที่ 100 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220  
โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.19 เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์  
ขนาดกำลัง 100 วัตต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### การดำเนินงานและผลการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษาคุณลักษณะของ TEC เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซลล์ความร้อนในการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W และประเมินราคาการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การทดสอบคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์
2. การทดสอบการทำงานของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น
3. การทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้น
4. ประเมินราคาการผลิตไฟฟ้าและต้นทุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### 4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์

การทดสอบเพื่อหาข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์รุ่น TEC1-12710 ในกระบวนการทำงานย้อนกลับ เพื่อนำมาดัดแปลงใช้เป็นเซลล์ความร้อน ด้วยเครื่องทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- ก. อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (TEC) รุ่น TEC1-12710
- ข. เครื่องทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น
- ค. ตัวต้านทานค่าต่าง ๆ ขนาด 0.5 W
- ง. ชุดสายวัดไฟฟ้า
- จ. สารประสานแผ่นระบายความร้อน
- ฉ. ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ ของ OMEGA รุ่น OMEGAETTE HHM93 จำนวน 1 ตัว

##### 4.1.2 ทดสอบคุณลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์

จัดระบบทดสอบตามรูปที่ 4.1 ใช้สารประสานแผ่นระบายความร้อนช่วยในการนำความร้อนบนผนังทั้งสองด้านของ TEC ก่อนติดตั้งบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบคุณลักษณะเซลล์ความร้อน ควบคุมแหล่งกำเนิดความร้อนให้ได้ความแตกต่างอุณหภูมิที่  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ แต่ละอุณหภูมิบันทึกค่า แรงดันวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร พร้อมทั้งวัดค่าความต้านทานภายในของเซลล์ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1

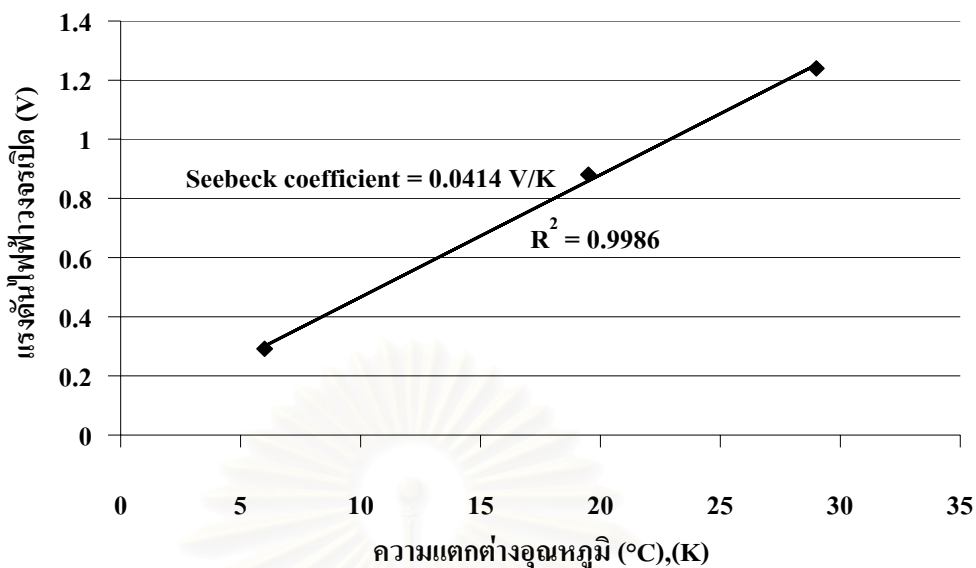


รูปที่ 4.1 แสดงการจัดระบบทดสอบคุณลักษณะของเซลล์ความร้อน

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 6 °C, 19 °C และ 29 °C ตามลำดับ

ความแตกต่างอุณหภูมิ (°C)	6	19	29
ความต้านทานภายในเซลล์ ( $\Omega/\text{cell}$ )	2.5	2.5	2.5
แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V/cell)	0.292	0.88	1.24
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A/cell)	0.13	0.34	0.44

จากผลทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์ความร้อนที่อุณหภูมิ 6 °C, 19 °C และ 29 °C ตามตารางที่ 4.1 พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นดังเส้นกราฟในรูปที่ 4.2 โดยมีค่าสหสัมพันธ์  $R^2 = 0.9986$  และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเฉลี่ย (Average Seebeck coefficient) ตามสมการที่ 2.3 ในบทที่ 2 จากเส้นกราฟได้เท่ากับ 0.0414V/K

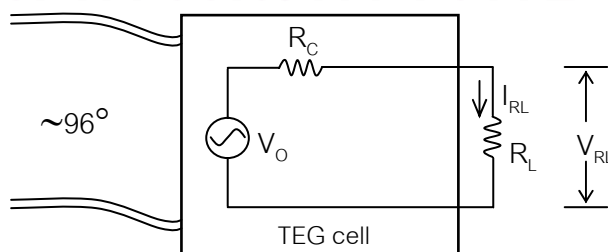


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่แปรเปลี่ยนตามความแตกต่างอุณหภูมิ

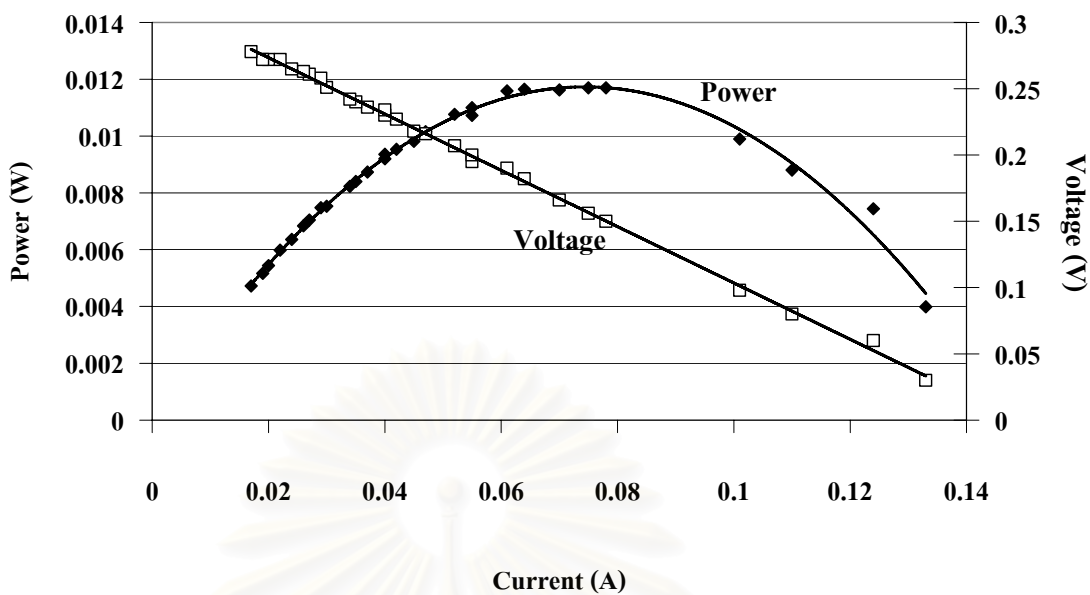
### 4.1.3 ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์

จากระบบทดสอบในข้อ 4.1.2 ทำการทดสอบความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยนำโหลดตัวต้านทานมาต่อกับเซลล์ความร้อน พร้อมกับควบคุมแหล่งกำเนิดความร้อนให้มีความแตกต่างอุณหภูมิ 6 °C, 19 °C และ 29 °C ตามลำดับ แต่ละอุณหภูมิแปรเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทานและบันทึกความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ดังในภาคผนวก ง. และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.4 ก., ข. และ ค.

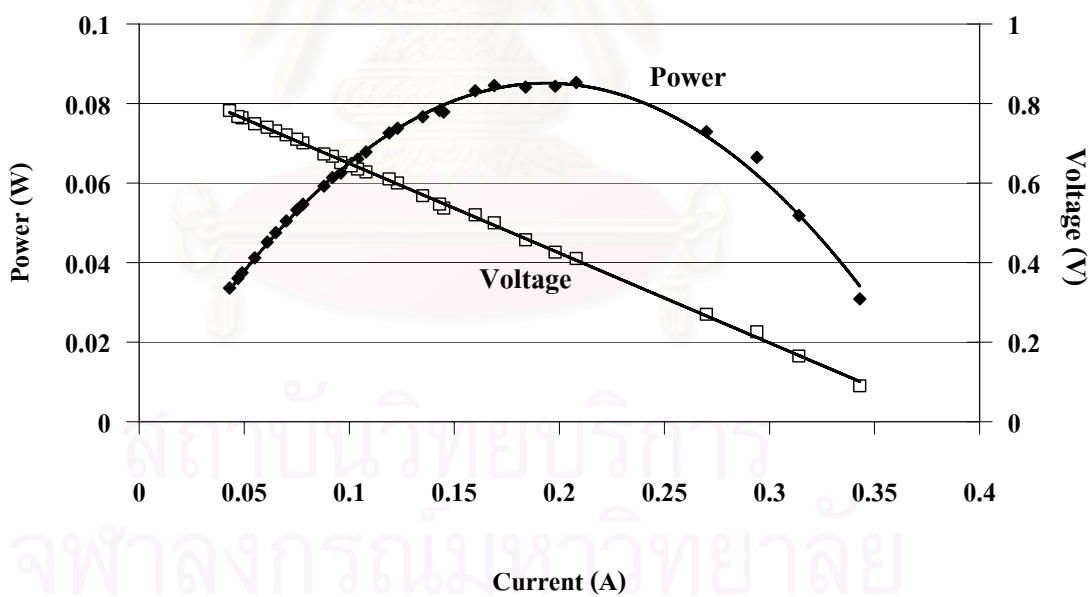
จากเส้นกราฟกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 4.4 ก., ข. และ ค. ค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อความต้านทานภายในเซลล์ ( $R_C$ ) เท่ากับความต้านทานโหลด ( $R_L$ ) ดังในรูปที่ 4.3 เรียกว่า “ภาวะแมชชิง (matching)” อ่านค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ได้ตามตารางที่ 4.2



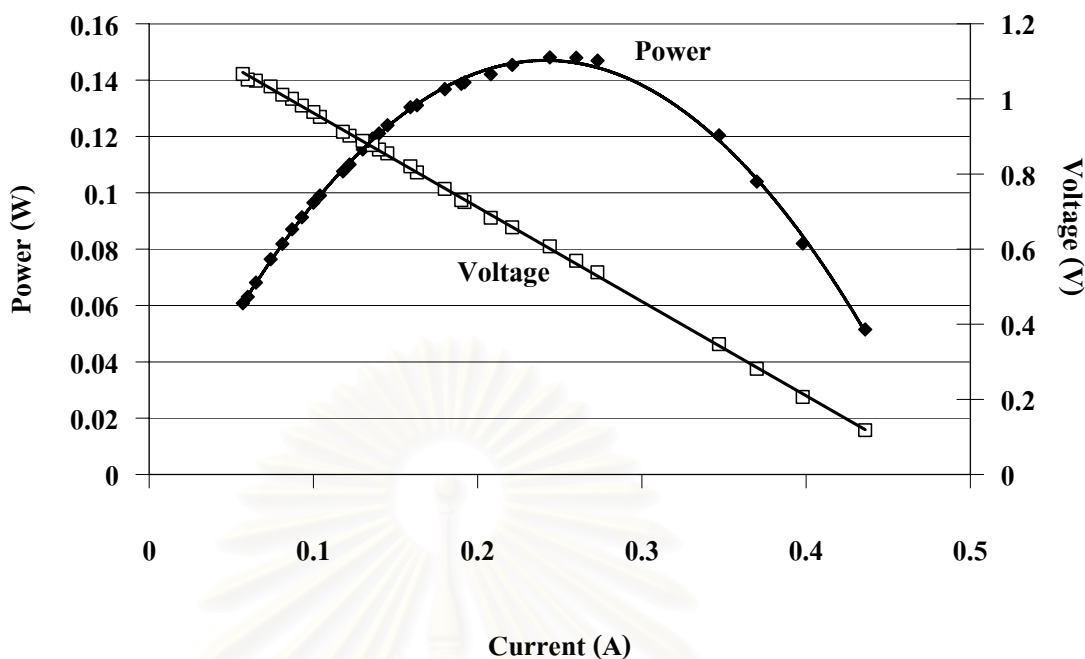
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการจ่ายไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน



ก. ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 6 °C



ข. ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 19 °C



ก. ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 29 °C

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) 6 °C, 19 °C และ 29 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 6 °C, 19 °C และ 29 °C

ความแตกต่างอุณหภูมิ (°C)	6	19	29
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ (W)	0.0114	0.0833	0.147
แรงดันไฟฟ้า (V)	0.1588	0.4476	0.6077
กระแสไฟฟ้า (A)	0.0713	0.1857	0.2413

#### 4.2 การทดสอบการทำงานของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น

##### 4.2.1 ทดสอบการระบายความร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน

การทดสอบการระบายความร้อนจากอุปกรณ์ระบายความร้อนเป็นการศึกษาผลการระบายความร้อนจากพื้นที่ผิวของแผ่นระบายความร้อน ด้วยวิธีธรรมชาติและการใช้พัดลมช่วยในการบังคับให้พาความร้อนจากผิวครีบของแผ่นระบายความร้อนเร็วขึ้น โดยได้จัดโครงสร้างของโมดูลเซลล์ความร้อน 2 รูปแบบ ดังในรูปที่ 4.5 ก. และ 4.5 ข. ตามลำดับ





ก. ระบายความร้อนตามธรรมชาติ



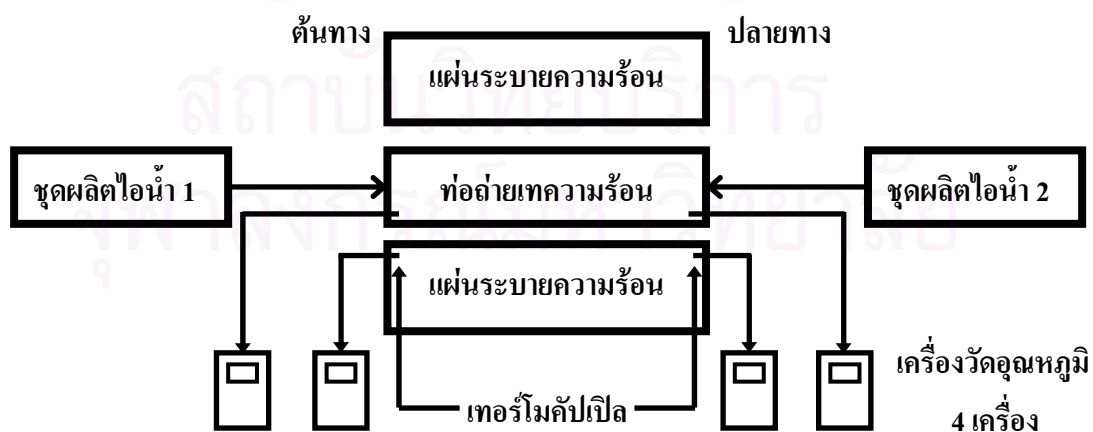
ข. ระบายความร้อนด้วยพัดลม

รูปที่ 4.5 ระบบระบายความร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน

#### 4.2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- ก. ชุดโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 12.5 W ที่พัฒนาขึ้น 2 รูปแบบ
- ข. ชุดผลิตไอน้ำด้วยเตาไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์ จำนวน 2 ชุด
- ค. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type k (chromel – alumel) จำนวน 4 ชุด
- ง. เครื่องวัดอุณหภูมิของ LINE SEIKI รุ่น TC - 1100 จำนวน 4 ชุด

#### 4.2.1.2 ทดสอบการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ



รูปที่ 4.6 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบการระบายความร้อน

จัดอุปกรณ์ทดสอบโดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนผนังด้านร้อนและด้านเย็นของ เซลล์ความร้อน ที่บริเวณต้นทางและปลายทางเข้าของไอน้ำทั้งสองทาง ดังแผนภาพระบบทดสอบ ในรูปที่ 4.6 จากนั้นป้อนไอน้ำเข้าระบบ โดยมีชุดระบายความร้อน ตามภาพในรูปที่ 4.5 ก. ทำการ วัดอุณหภูมิผนังเซลล์ทั้งสองด้าน ทุก ๆ 2 นาที และคำนวณความแตกต่างอุณหภูมิ ผลการทดสอบ เป็นไปตามตารางที่ 4.3 และกราฟแสดงความแตกต่างอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ ในรูปที่ 4.7

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของเส้นกราฟรูปที่ 4.7 พบผลดังนี้

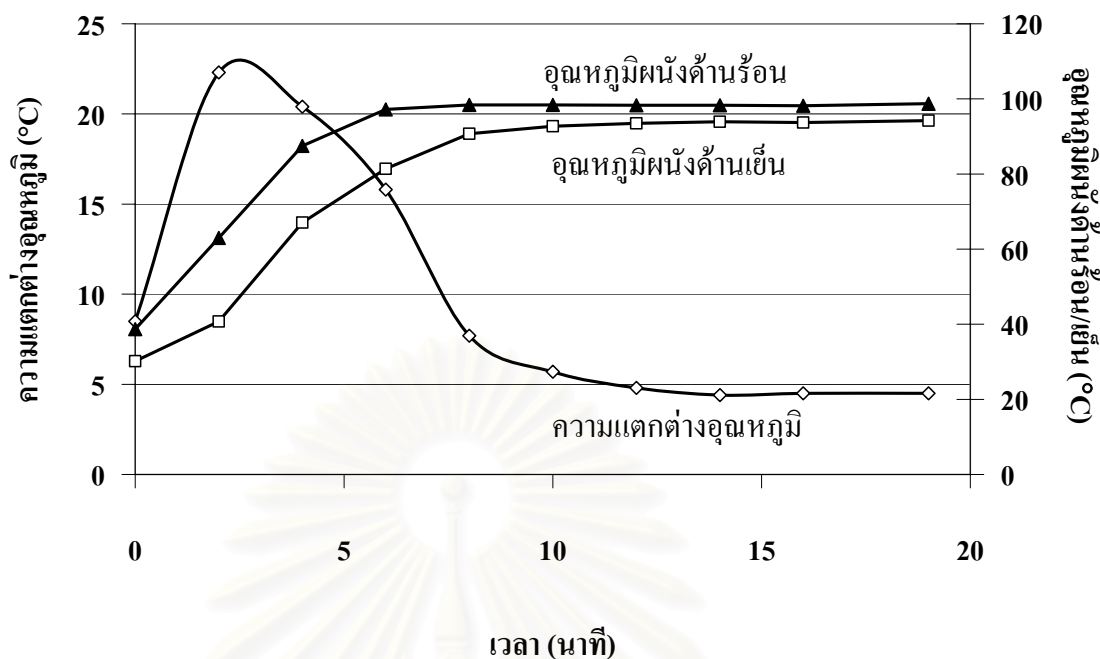
- ก. ความแตกต่างอุณหภูมิที่ผนังเซลล์จะมากที่สุดประมาณ 22.3 °C ใช้เวลาเพียง ประมาณ 2 นาที จากนั้นความแตกต่างอุณหภูมิจะลดลง เนื่องจากการระบาย ความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ ไม่สามารถทำได้ทัน จึงเกิดความร้อนสะสม
- ข. ประสิทธิภาพสูงสุดของการแปลงพลังงานความร้อนให้แก่เซลล์ความร้อน คำนวณได้จากขีดจำกัดประสิทธิภาพคาร์โนต์ [1]

$$\eta_c = \frac{(63 - 40.7)}{(273.2 + 63)} \times 100\% = 6.633\%$$

- ค. การรักษาระดับความแตกต่างอุณหภูมิของผนังเซลล์ด้านร้อนและด้านเย็น ให้ มากขึ้นและทำงานได้ต่อเนื่อง จำเป็นต้องใช้ระบบระบายความร้อนร่วมมา ช่วย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้พัดลมขับอากาศผ่านช่อง crib ระบายความร้อน

ตารางที่ 4.3 ผลของความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์เมื่อระบายความร้อนตามธรรมชาติ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิผนังด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิผนังด้านเย็น (°C)	ความแตกต่างอุณหภูมิ (°C)
0	38.7	30.2	8.5
2	63	40.7	22.3
4	87.5	67.1	20.4
6	97.2	81.4	15.8
8	98.4	90.7	7.7
10	98.4	92.7	5.7
12	98.3	93.5	4.8
14	98.3	93.9	4.4
16	98.2	93.7	4.5
19	98.7	94.2	4.5



รูปที่ 4.7 แสดงความแตกต่างอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อระบายความร้อนตามธรรมชาติ

#### 4.2.1.3 ทดสอบการระบายความร้อนแบบบังคับด้วยพัดลม

จัดอุปกรณ์ทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1.2 โดยติดตั้งชุดพัดลมระบายอากาศ ตามภาพในรูปที่ 4.5 ข. และป้อนไอน้ำเข้าระบบ ทำการวัดอุณหภูมิผนังเซลล์ทั้งสองด้าน ทุก ๆ 2 นาที และคำนวณความแตกต่างอุณหภูมิ ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.4 และกราฟแสดงความแตกต่างอุณหภูมิต่อเวลาที่ต่าง ๆ ในรูปที่ 4.8

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของเส้นกราฟรูปที่ 4.8 พบผลดังนี้

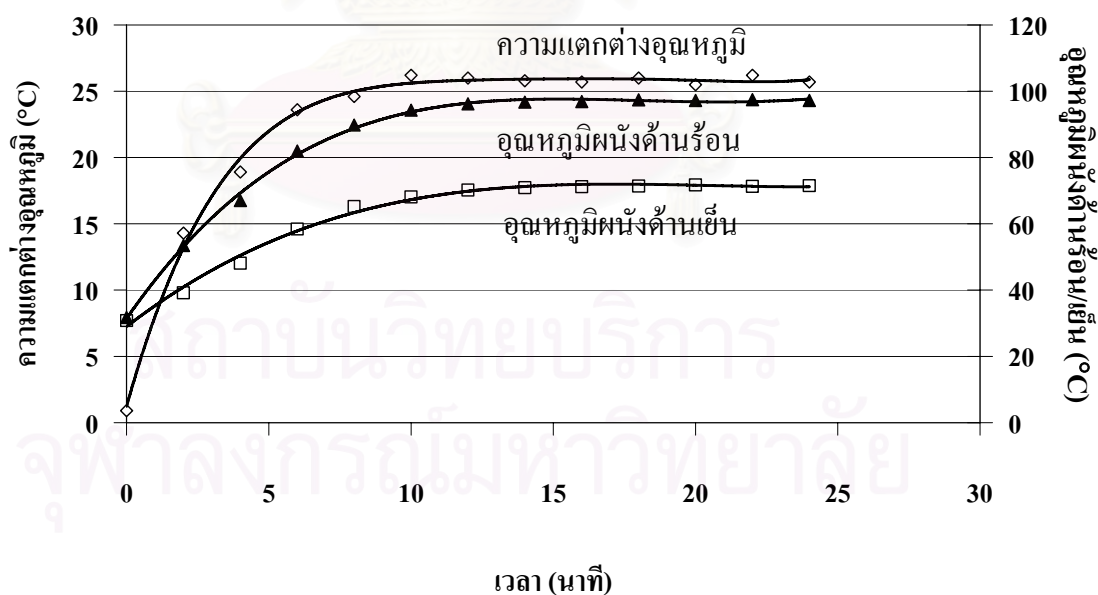
- ความแตกต่างอุณหภูมิที่ผนังเซลล์จะมากที่สุดประมาณ 26 °C ใช้เวลานานประมาณ 10 - 12 นาที จากนั้นความแตกต่างอุณหภูมิจะนิ่งที่สมดุลการระบายความร้อนสู่ภาวะแวดล้อม
- ประสิทธิภาพสูงสุดของการแปลงพลังงานความร้อนให้แก่เซลล์ความร้อนคำนวณได้จากขีดจำกัดประสิทธิภาพคาร์โนต์ [1]

$$\eta_c = \frac{(94.3 - 68.1)}{(273.2 + 94.3)} \times 100\% = 7.129\%$$

- การรักษาระดับความแตกต่างอุณหภูมิของผนังเซลล์ด้านร้อนและด้านเย็นให้คงที่ต่อเนื่องต้องใช้พลังงานจากภายนอกประมาณ 24 W

ตารางที่ 4.4 ผลของความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์เมื่อระบายความร้อนด้วยพัดลม

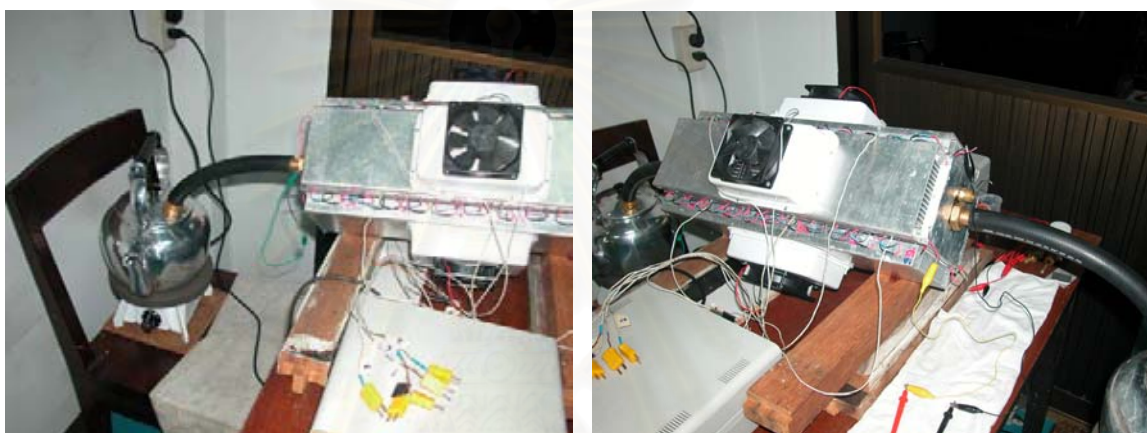
เวลา (นาที)	อุณหภูมิผนังด้านร้อน (°C)	อุณหภูมิผนังด้านเย็น (°C)	ความแตกต่างอุณหภูมิ (°C)
0	31.7	30.8	0.9
2	53.5	39.2	14.3
4	67	48.1	18.9
6	82	58.4	23.6
8	89.8	65.2	24.6
10	94.3	68.1	26.2
12	96.2	70.2	26
14	96.7	70.9	25.8
16	96.9	71.2	25.7
18	97.4	71.4	26
20	97.2	71.7	25.5
22	97.5	71.3	26.2
24	97.2	71.5	25.7



รูปที่ 4.8 แสดงความแตกต่างอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็น ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อระบายความร้อนด้วยพัดลม

#### 4.2.2 การทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิผนังเซลล์ความร้อน

การทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิผนังเซลล์ความร้อน เป็นการทดสอบหลักขะณะการกระจายความร้อนจากไอน้ำบริเวณผนังด้านในของท่ออุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน บนเงื่อนไขการระบายความร้อนด้วยพัดลม เพื่อศึกษาผลของสมดุลการกระจายความร้อนบริเวณผนังเซลล์ด้านร้อนและประเมินความต้องการปริมาณความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน ก่อนนำไปสู่การออกแบบแหล่งความร้อนสำหรับทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบ โดยการจำลองแหล่งความร้อนเบื้องต้นด้วยชุดผลิตไอน้ำด้วยกาต้มน้ำและจัดระบบทดสอบดังในรูปที่ 4.9



ก. ชุดผลิตไอน้ำป้อนเข้าระบบ 1 ชุด

ข. ชุดผลิตไอน้ำป้อนเข้าระบบ 2 ชุด

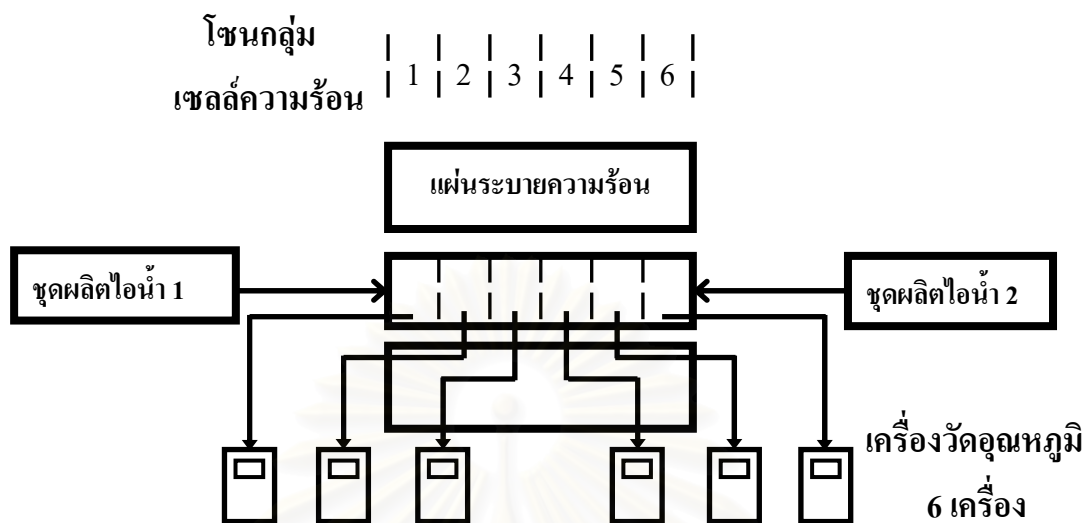
รูปที่ 4.9 การจัดระบบทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิผนังเซลล์

##### 4.2.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- ก. ชุดโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 12.5 W ที่พัฒนาขึ้น
- ข. ชุดพัดลมระบายความร้อนและแหล่งจ่ายไฟฟ้า
- ค. ชุดผลิตไอน้ำด้วยเตาไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์ จำนวน 2 ชุด
- ง. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type k (chromel – alumel) 6 ชุด
- จ. เครื่องวัดอุณหภูมิของ LINE SEIKI รุ่น TC - 1100 จำนวน 6 ตัว



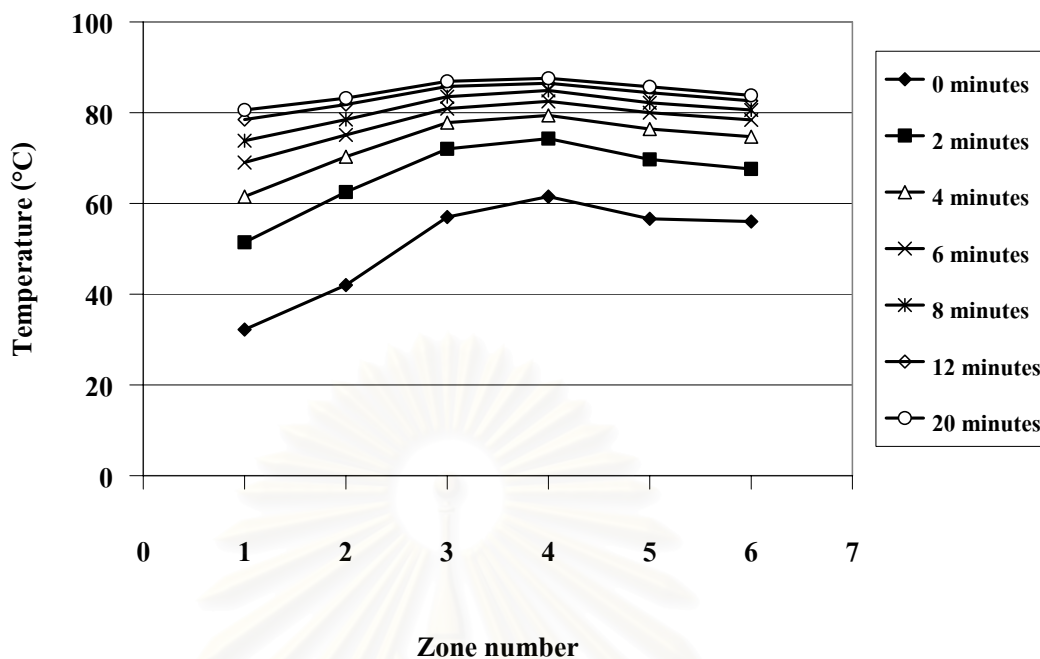
#### 4.2.2.2 ทดสอบการกระจายความร้อนที่ใช้ชุดผลิตไอน้ำชุดเดียว



รูปที่ 4.10 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบการกระจายความร้อน

จัดอุปกรณ์ทดสอบโดยติดตั้งชุดวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลที่ผนังด้านร้อนของเซลล์ความร้อนที่ตำแหน่งกึ่งกลางโซน (Zone) ของกลุ่มเซลล์ 6 โซน เพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิตลอดความยาวของโมดูลเซลล์ความร้อน ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 4.10 จากนั้นป้อนไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าระบบทางเดียว ตามภาพในรูปที่ 4.9 ก. เมื่อเริ่มป้อนไอน้ำเดือดเข้าระบบทำการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ทุก ๆ 2 นาที ได้ผลจากการทดสอบตามตารางที่ จ.1 ในภาคผนวก จ.และเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งโซนกลุ่มเซลล์ที่เวลาต่าง ๆ ในรูปที่ 4.11 จากการวิเคราะห์ข้อมูลของเส้นกราฟรูปที่ 4.11 พบผลดังนี้

- ก. อุณหภูมิที่ผิวผนังบริเวณกึ่งกลางโมดูลจะนิ่งที่ประมาณ  $87^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลานานประมาณ 20 นาที แต่อุณหภูมิที่ได้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ประเมินไว้ (ภาคผนวก ก.) แสดงถึงการผลิตปริมาณไอน้ำไม่เพียงพอจึงทำให้ปริมาณความร้อนไม่ถึงระดับที่ต้องการ
- ข. อุณหภูมิที่ตำแหน่งโซนกลุ่มเซลล์แตกต่างกัน  $6 - 7^{\circ}\text{C}$  โดยอุณหภูมิจะสูงเฉพาะบริเวณกลางโมดูลเซลล์ความร้อน แสดงถึงการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากแรงดันไอน้ำไม่สูงพอ



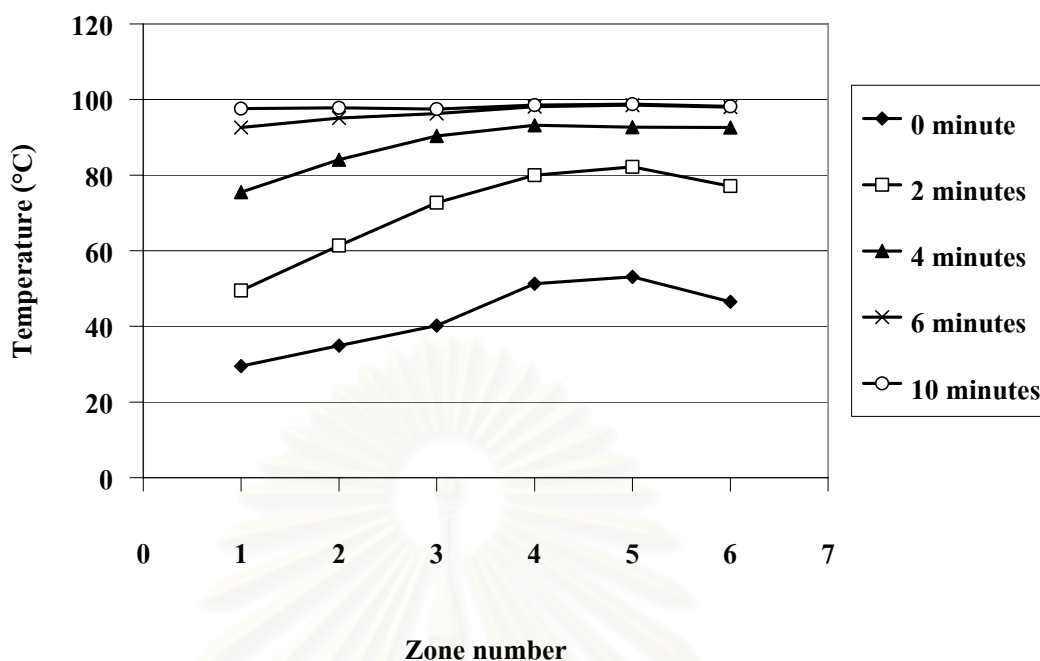
รูปที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อป้อนไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าทางเดียว

#### 4.2.2.3 ทดสอบการกระจายความร้อนที่ใช้ชุดผลิตไอน้ำสองชุด

จัดอุปกรณ์ทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 4.2.2.2 จากนั้นป้อนไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าระบบสองทาง ตามภาพในรูปที่ 4.9 ข. เมื่อเริ่มป้อนไอน้ำเดือดเข้าระบบทำการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ทุก ๆ 2 นาที ได้ผลจากการทดสอบตามตารางที่ จ.2 ในภาคผนวก จ. และเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งโซนกลุ่มเซลล์ที่เวลาต่าง ๆ ในรูปที่ 4.12

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของเส้นกราฟรูปที่ 4.12 จะพบผลดังนี้

- ก. อุณหภูมิที่ผิวผนังจะนิ่งที่ประมาณ  $98.5^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาเพียงประมาณ 10 นาที ขณะที่อุณหภูมิที่ได้ใกล้เคียงอุณหภูมิที่ประเมินไว้ แสดงถึงการผลิตปริมาณไอน้ำเพียงพอ จึงทำให้ปริมาณความร้อนใกล้เคียงระดับที่ต้องการ
- ข. อุณหภูมิที่ตำแหน่งโซนกลุ่มเซลล์ใกล้เคียงกัน ตลอดความยาวโมดูลเซลล์ ความร้อน แสดงถึงการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ
- ค. ในทางปฏิบัติเพื่อความสะดวกในการติดตั้งระบบผลิตไอน้ำเพื่อป้อนเข้าโมดูลเซลล์ความร้อน จะเลือกการป้อนไอน้ำเข้าโมดูลทางเดียวโดยเพิ่มปริมาณการผลิตไอน้ำและจัดแหล่งกำเนิดความร้อนตามประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ให้เทียบเท่าผลของการทดสอบนี้ ซึ่งมีค่าประมาณ 4,000 W ซึ่งในภาวะสมดุลความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 4.12 แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อป้อนไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าสู่สองทาง

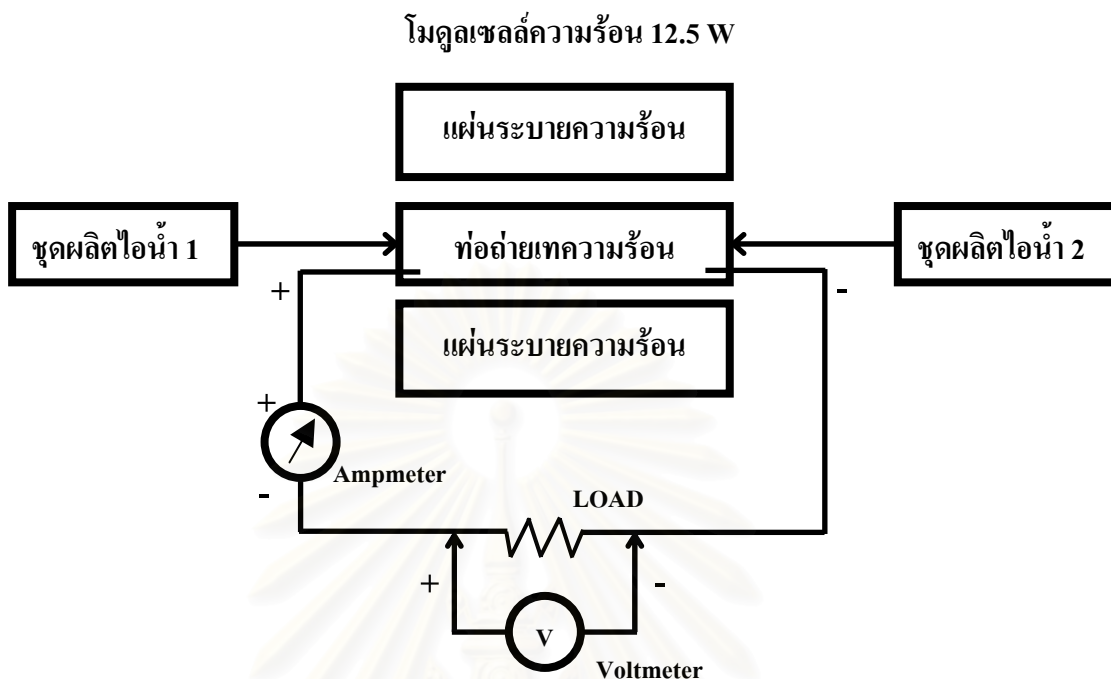
#### 4.2.3 ทดสอบการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน

การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนเป็นการทดสอบโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 12.5 W จำนวน 4 โมดูลที่จะนำมาประกอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาด 50 W โดยเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

##### 4.2.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- ก. ชุดโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 12.5 W ที่พัฒนาขึ้น
- ข. ชุดผลิตไอน้ำด้วยเตาไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์ จำนวน 2 ชุด
- ค. ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ ของ OMEGA รุ่น OMEGAETTE HHM93 จำนวน 1 ตัว
- ง. มัลติมิเตอร์ของ Sanwa รุ่น YX – 360 TRD จำนวน 1 ตัว
- จ. โหลดตัวต้านทานค่าต่าง ๆ ขนาด 15 W

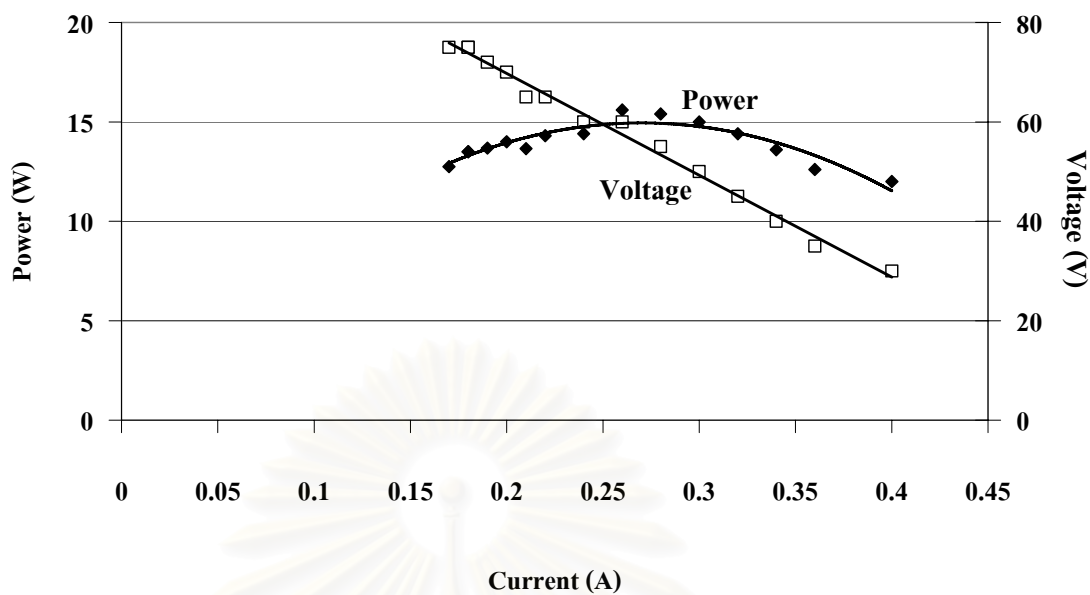
### 4.2.3.2 ทดสอบการผลิตไฟฟ้า



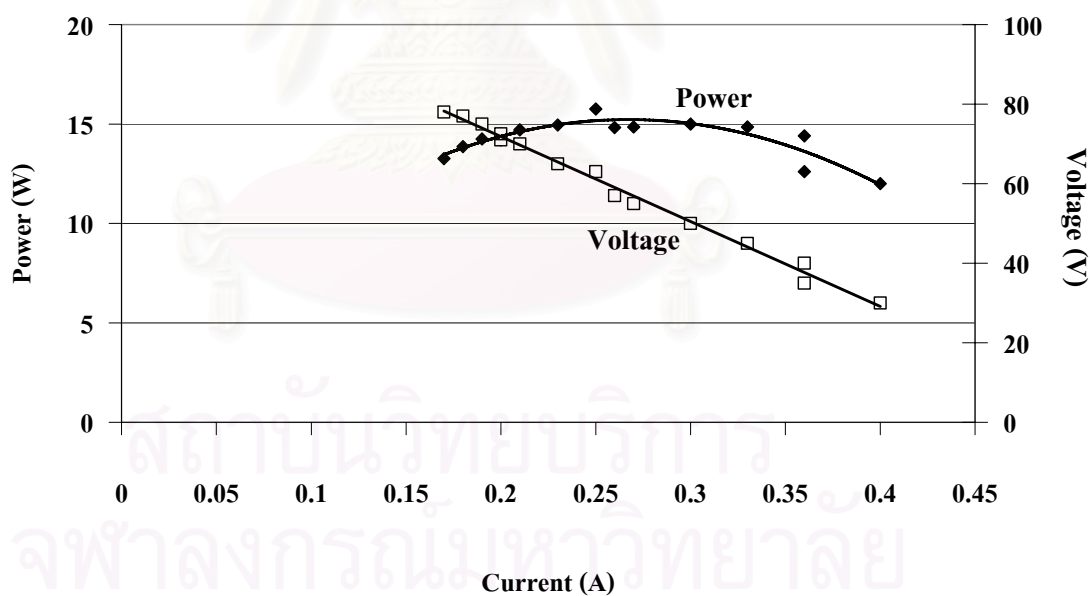
รูปที่ 4.13 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน

จัดระบบทดสอบตามแผนภาพรูปที่ 4.13 ใช้ชุดผลิตไอน้ำ 2 ชุดและระบายความร้อนด้วยพัดลม ป้อนไอน้ำเข้าระบบและรอให้ระบบเสถียรเป็นเวลา 10 – 12 นาที ( $\Delta T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) แต่ละโมดูลบันทึกค่าคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร รวมทั้งค่าความต้านทานภายในของเซลล์ เป็นต้น จากนั้นเลือกโมดูลที่ให้คุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดมาทดสอบ โดยการแปรเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทานและบันทึกความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ดังในภาคผนวก จ. และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.14 อ่านค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเส้นกราฟในรูปที่ 4.14 ได้ข้อมูลสรุปในตารางที่ 4.5

ผลการทดสอบพบว่า โมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 14 - 15 W ซึ่งมากกว่าที่ออกแบบไว้ คือ 12.5 W ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบนำข้อมูลตัวแปรทางความร้อนและทางไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนที่ตรวจวัดได้คำนวณค่าต่ำไปใช้คำนวณ



ก. โมดูลเซลล์ความร้อนที่ผลิตไฟฟ้าได้ค่าต่ำสุด



ข. โมดูลเซลล์ความร้อนที่ผลิตไฟฟ้าได้ค่าสูงสุด

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น



ตารางที่ 4.5 ข้อมูลลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน 4 โมดูล

ค่าปริมาณไฟฟ้า		ต่ำสุด	สูงสุด
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูล (W)		14.9454	15.2237
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด (V)		120	125
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)		0.67	0.64
ความต้านทานภายในของโมดูล ( $\Omega$ )		230	250

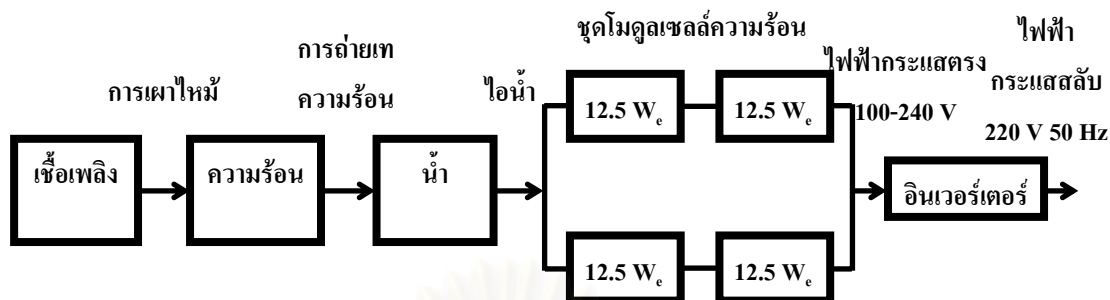
#### 4.3 การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การผลิตไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดโมดูลเซลล์ความร้อน และการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ จากผลการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่อุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับโหลดขนาดต่าง ๆ ในการทดสอบนี้ใช้แหล่งความร้อนจำลองจากการต้มน้ำด้วยเตาหุงต้ม และป้อนไอน้ำเดือดเข้าโมดูลเซลล์ความร้อนแทนการใช้ความร้อนเหลือทิ้ง โดยมีการทดสอบดังนี้

##### 4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

- ก. ชุดโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 12.5 W ที่พัฒนาขึ้นจำนวน 4 ชุด
- ข. ชุดผลิตไอน้ำด้วยเตาหุงต้มที่พัฒนาขึ้น
- ค. ชุดแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) ที่พัฒนาขึ้น
- ง. หลอดไฟชนิดจุดไส้ขนาด 220 VAC กำลังไฟฟ้า 5, 25, 40 และ 60 W
- จ. ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ ของ OMEGA รุ่น OMEGAETTE HHM93 จำนวน 2 ตัว
- ฉ. ถ่านหุงต้มและเตาเศรษฐกิจ 2 ชุด
- ช. แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับพัฒนาประสิทธิภาพความร้อน 1 ชุด
- ซ. ชุดสายไฟฟ้าและขั้วต่อไฟฟ้า 1 ชุด
- ฅ. เครื่องชั่งน้ำหนัก 1 เครื่อง
- ญ. ถ้วยตวงปริมาตรน้ำ 1 ชุด

### 4.3.2 ทดสอบชุดเซลล์ความร้อน



รูปที่ 4.15 แผนภาพระบบทดสอบการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับจากชุดโมดูลเซลล์ความร้อน

จัดระบบทดสอบตามแผนภาพรูปที่ 4.15 โดยนำโมดูลเซลล์ความร้อน 2 ชุดอันดับกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและนำโมดูลอันดับ 2 ชุด มาขนานกันเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ใช้พัดลมระบายความร้อน จากนั้นเริ่มต้นผลิตไอน้ำด้วยถังน้ำมันก๊าดขนาด 20 ลิตร 2 ใบ บรรจุน้ำไบละ 10 ลิตรใช้เตาถ่านต้มน้ำ รอสถานะน้ำเป็นไอน้ำเพื่อป้อนเข้าระบบและรอให้ระบบเสถียรใช้เวลา 30 นาที ( $\Delta T$  ประมาณ  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยการแปรเปลี่ยนโหลดซึ่งเป็นหลอดไฟฟ้าแบบจุดไส้ (Incandescent lamp) ขนาดต่าง ๆ และบันทึกความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันไฟฟ้า พร้อมทั้งคำนวณค่าควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางออกของระบบแปลงผันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.6

การทดสอบที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ได้ทำการบันทึกปริมาณไอน้ำและเชื้อเพลิงถ่านไม้ที่ใช้ต่อเวลาที่ทำการทดสอบ เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานความร้อนและราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในข้อ 4.4

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาด 50 W

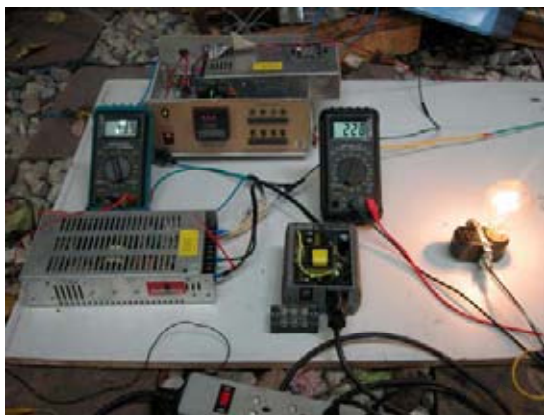
โหลด (W)	ไฟฟ้ากระแสตรง (V)	ไฟฟ้ากระแสสลับ (V)	AC REGULATION OF INVERTER (%)
5	199	225	2.27
10	195	221	0.45
15	190	219	-0.45
20	180	216	-1.82
25	171	211	-4.09
30	163	210	-4.55

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

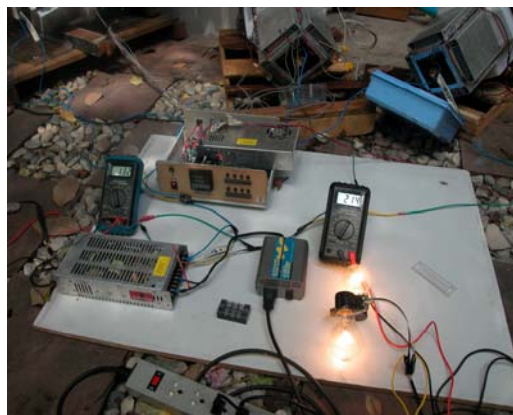
โหลด (W)	ไฟฟ้ากระแสตรง (V)	ไฟฟ้ากระแสสลับ (V)	AC REGULATION OF INVERTER (%)
35	155	209	-5.00
40	146	206	-6.36
45	135	205	-6.82
50	131	201	-8.64
60	< 130	fault alarm	



รูปที่ 4.16 การจัดอุปกรณ์ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาด 50 W



ก. ทดสอบโหลดหลอดไฟฟ้า 40 W



ข. ทดสอบโหลดหลอดไฟฟ้า 50 W

#### รูปที่ 4.17 การทดสอบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า

ผลการทดลองพบว่าในการผลิตไอน้ำนั้นเมื่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงลดลงระดับหนึ่ง ส่งผลให้แรงดันไอน้ำจากภาชนะต้มน้ำลดลงและกระทบถึงการกระจายความร้อนบนผนังด้านร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน หากแรงดันไอน้ำต่ำจนทำให้ความแตกต่างอุณหภูมิของเซลล์ความร้อน ( $\Delta T$ ) ลดลงต่ำกว่า  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะตกลงต่ำกว่า  $130\text{ V}$  ไม่สามารถขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะต้องควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงให้เกิดการผลิตปริมาณความร้อนอยู่ในระดับการผลิตไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการขับโหลด เพื่อกำหนดแรงดันไฟฟ้าอยู่ในย่านที่ระบบสวิตชิ่งจะสามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางออกให้คงที่ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ใช้งาน ซึ่งจากผลการทดสอบระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $220\text{ V} \pm 10\%$  โดยสามารถขับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับได้สูงสุด  $50\text{ W}$  เมื่อคำนวณประสิทธิภาพของชุดแปลงผันไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นจะได้

$$\text{ประสิทธิภาพชุดแปลงผันไฟฟ้า} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าทางออก}}{\text{กำลังไฟฟ้าทางเข้า}} = \frac{50W_{ac}}{60W_{dc}} \times 100\% = 83.33\%$$

#### 4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากเซลล์ความร้อน

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนนี้ เป็นการศึกษาเพื่อหาต้นทุนการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนและระบบส่งความร้อนจากแหล่งความร้อน สำหรับใช้กับความร้อนเกรดต่ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยทดสอบการผลิตไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าขนาด  $50\text{ W}$  ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางออก  $220\text{ V } 50\text{ Hz}$  รวมถึงหาประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า



ตลอดจนประเมินเป็นไปได้อีกในการพัฒนาเครื่องต้นแบบ โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ในประเทศเป็นหลัก

#### 4.4.1 การประเมินต้นทุนการผลิตชุดโมดูลเซลล์ความร้อน

กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนขึ้นอยู่กับจำนวนโมดูลเซลล์ความร้อนที่นำมาจัดวางจอร์อันดับและขนานกัน เพื่อให้ได้ขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามต้องการ ดังนั้นการประเมินต้นทุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จึงคิดจากราคาต่อหน่วยกำลังไฟฟ้า (บาท/วัตต์) จากชุดโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 12.5 วัตต์ ที่พัฒนาขึ้นและจากผลการทดสอบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ถึง 15 W โดยแจกแจงรายการวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้พร้อมราคาโดยไม่รวมค่าแรงงาน ดังนี้

วัสดุและอุปกรณ์	จำนวนเงิน
เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ 96 ตัว (300 x 96)	28,800 บาท
แผ่นระบายความร้อน 24 ตัว (240 x 24)	5,760 บาท
แผ่นอลูมิเนียมรีดเย็นผิวเรียบหนา 6 มม.	1,480 บาท
แผ่นเบคาไลท์หนา 6 มม.	20 บาท
แผ่นโครงอลูมิเนียมยึดพัดลม 4 แผ่น	240 บาท
โครงยึดพัดลมระบายอากาศ 4 ตัว	20 บาท
พัดลมระบายอากาศ 4 ตัว (102 x 4)	408 บาท
แหวนรองกันความร้อน 1 ชุด	60 บาท
สกรูและแหวนรอง 1 ชุด	50 บาท
ท่อยางทนความร้อน 1 เส้น	40 บาท
เข็มขัดรัดท่อ 1 ชุด	18 บาท
ซิลิโคนคอมปานด์ 1 หลอด	60 บาท
หัวต่อทองเหลือง 2 ตัว	394 บาท
อุปกรณ์เบ็ดเตล็ด	150 บาท
<b>รวมเป็นเงินทั้งสิ้น</b>	<b>37,500 บาท</b>

$$\text{ต้นทุนการผลิตโมดูล} = \frac{37,500}{15} = 2,500 \text{ บาท / วัตต์}$$



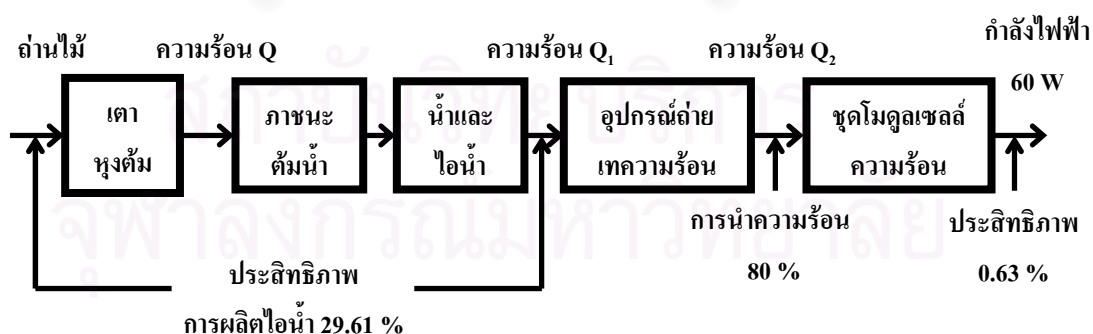
#### 4.4.2 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน

จากผลการศึกษาและพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนพบว่า แหล่งวัสดุและอุปกรณ์สำหรับประกอบส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจัดหาได้ ดังนี้

- ก. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชุดโมดูลเซลล์ความร้อนเกือบทั้งหมด เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำในประเทศ ยกเว้นเซลล์ความร้อนซึ่งมีมูลค่า 76 % ของราคาชุดโมดูลเซลล์ความร้อน
- ข. การดำเนินการประกอบชุดดังกล่าว สามารถใช้เครื่องมือกลในระดับห้องปฏิบัติการและแรงงานระดับช่างฝีมือสร้างประกอบได้
- ค. การประกอบระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิงที่มีกำลังไฟฟ้าเหมาะสมทำงานร่วมกับอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า (inverter) ที่ผลิตสำเร็จรูปประกอบเข้าด้วยกัน โดยเพื่อ กำลังไฟฟ้าให้สูงกว่าความต้องการ 20 % หรือออกแบบใหม่ทั้งหมดก็สามารถหาชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จากตลาดในประเทศได้

#### 4.4.3 การประเมินประสิทธิภาพและค่าไฟฟ้าต่อหน่วย

การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยใช้แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ของถ่านไม้ในเตาหุงต้ม ได้ปริมาณความร้อน ( $Q$ ) ไปต้มน้ำเดือดเป็นไอน้ำให้ปริมาณความร้อน ( $Q_1$ ) แก่อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนเพื่อนำปริมาณความร้อน ( $Q_2$ ) ไปยังผนังเซลล์ความร้อนเพื่อการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 4.18 ได้ข้อมูลในการประเมินประสิทธิภาพและค่าไฟฟ้าต่อหน่วยดังนี้



รูปที่ 4.18 แผนภาพการป้อนปริมาณความร้อนสู่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยชุดโมดูลเซลล์ความร้อน

### ก. ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า

ประเมินจากขั้นตอนการป้อนปริมาณความร้อนเข้าระบบตามแผนภาพรูปที่ 4.18 ด้วยการใช้ข้อมูลประสิทธิภาพของอุปกรณ์และกระบวนการถ่ายเทความร้อนประกอบการวิเคราะห์ ดังนี้

- ประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์เซลล์ความร้อน จากการคำนวณในข้อ 3.2.2 = 0.63 %
- ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง = 80 %
- ประสิทธิภาพของชุดผลิตไอน้ำ จากการคำนวณ (ภาคผนวก ช.) = 29.61 %

ดังนั้นประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าของระบบจะเท่ากับ

$$(0.0063 \times 0.8 \times 0.2961) \times 100 \% = 0.14923 \%$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ ประสิทธิภาพของระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 83.33 % และกำลังไฟฟ้ากระแสตรงมีค่า 60 W ดังนั้นปริมาณความร้อนจากการแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นปริมาณความร้อนเทียบเท่า โดยคิดที่ 1 Btu/hr = 0.293 W [20] การผลิตไฟฟ้า 60 วัตต์ จะเทียบเท่ากับปริมาณความร้อน  $\frac{60}{0.293} = 204.778$  Btu/hr เมื่อคำนวณความต้องการปริมาณความร้อนจากประสิทธิภาพการแปลงความร้อนแต่ละขั้นตอนจะได้ค่าปริมาณความร้อนที่ต้องป้อนให้ระบบ ดังนี้

$$\text{- ปริมาณความร้อน } (Q_2) = \frac{204.778}{0.0063} = 32,504.469 \text{ Btu/hr}$$

$$\text{- ปริมาณความร้อน } (Q_1) = \frac{32,504.469}{0.8} = 40,630.586 \text{ Btu/hr}$$

$$\text{- ปริมาณความร้อน } (Q) = \frac{40,630.586}{0.2961} = 137,219.14 \text{ Btu/hr}$$

นั่นคือปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่จะผลิตไฟฟ้า 60 W<sub>e</sub> ต้องการปริมาณความร้อนประมาณ 137,219 Btu/hr หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้าเทียบเท่า 40,205.21 W<sub>th</sub>

## ข. ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยจากต้นทุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ประเมินจากต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยโมดูลเซลล์ความร้อนโดยไม่เกิดค่าเชื้อเพลิงผลิตความร้อน เนื่องจากแหล่งความร้อนในสภาพใช้งานจริงเป็นแหล่งความร้อนเหลือทิ้งคิดระยะเวลาคุ้มทุน ทุก ๆ 5 ปี จาก 5 – 30 ปี ระยะเวลา 30 ปี เป็นอายุใช้งานมากที่สุดของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งแสดงในภาคผนวก ข. เมื่อทดลองแปรเปลี่ยนระยะเวลาคุ้มทุนของเซลล์ความร้อนที่ทำงานต่อเนื่องเพื่อประเมินค่าไฟฟ้าต่อหน่วย จะได้ข้อมูลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเมื่อแปรเปลี่ยนระยะเวลาคุ้มทุนของเซลล์ความร้อน

ระยะเวลาคุ้มทุน (year)	ชั่วโมงการผลิตไฟฟ้า (hour)	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)
30	262,800	9.51
25	219,000	11.41
20	175,200	14.27
15	131,400	19.03
10	87,600	28.54
5	43,800	57.07

จากข้อมูลการประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่ตัดแปลงจากเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ พบว่าขณะนี้ยังมีต้นทุนสูงอยู่ แต่ในอนาคตเชื่อว่าต้นทุนจะลดลง ระยะเวลาคุ้มทุนจะสั้นลงด้วย

### 4.4.4 การประเมินเปรียบเทียบต้นทุนเชื้อเพลิง

การประเมินต้นทุนเชื้อเพลิงในการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนเชื้อเพลิงอื่น แทนการใช้ความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง ได้แก่ ถ่านไม้และสารกัมมันตรังสี โดยอาศัยพลังงานจากเชื้อเพลิงดังกล่าวมาทำการต้มน้ำเป็นไอน้ำเดือดเพื่อป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้า จากข้อมูลการทดสอบร่วมกับการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและราคา สามารถประเมินต้นทุนเชื้อเพลิงในรูปค่าพลังงานต่อหน่วยไฟฟ้าได้ดังในภาคผนวก ฉ. และเปรียบเทียบค่าพลังงานต่อหน่วยไฟฟ้างดังในตารางที่ 4.8 โดยเงื่อนไขดังนี้

- ก. ต้นทุนประเมินตามอายุการใช้งานมากที่สุดของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
- ข. ในกรณีใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง ให้ประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ 29.61 % ราคาเชื้อเพลิง 10 บาท/กก. [19] ในอัตราคงที่ตลอดอายุการใช้งาน

- ค. ในกรณีใช้สารกัมมันตรังสีเป็นเชื้อเพลิง ประมาณค่าประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ 90 % ค่าเชื้อเพลิง 93,000 บาท/W<sub>th</sub> [15] เชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานตามอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
- ง. ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยคิดจากผลรวมของค่าพลังงานต่อหน่วยกับค่าไฟฟ้าต่อหน่วยจากต้นทุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 4.8 ต้นทุนพลังงานและค่าไฟฟ้าต่อหน่วยจากการผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงต่างกัน

เชื้อเพลิง ที่ใช้ผลิตไฟฟ้า	ค่าพลังงาน (บาท / kWhr)	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)
ถ่านไม้	2,181.74	2,191.25
สารกัมมันตรังสี (Pu-238)	78,006.09	78,015.60

เนื่องจากประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์ความร้อนต่ำ จึงต้องการเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าสูงมาก ทำให้ราคาต้นทุนพลังงานต่อหน่วยไฟฟ้ามีราคาสูงมาก โมดูลเซลล์ความร้อนจึงไม่เหมาะกับการใช้งานกับแหล่งความร้อนที่มีต้นทุนสูง

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการศึกษากระบวนการทำงานกลับทางของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลเตอร์ รุ่น TEC 1 - 12710 พบว่าสามารถนำมาใช้เป็นเซลล์ความร้อนซึ่งทนอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เกิน 120 °C และจากผลทดสอบคุณสมบัติทางเซลล์ไฟฟ้ามีลักษณะเฉพาะของเซลล์ดังนี้

ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ (°C)	6	19	29
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด (โวลต์)	0.292	0.88	1.24
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (แอมแปร์)	0.13	0.34	0.44
ความต้านทานภายใน (โอห์ม)	2.5	2.5	2.5
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์)	0.0117	0.0851	0.1592

5.1.2 ผลการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 50 วัตต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ พบว่าต้องจัดโครงสร้างเป็นโมดูลเซลล์ความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 12.5 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ จำนวน 4 ชุด โดยต่ออันดับกัน 2 ชุด เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าก่อนนำมาขนานกันเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ป้อนกำลังไฟฟ้าให้ระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ในการผลิตไฟฟ้าต้องการปริมาณความร้อน 26,837 บีทียู/ชั่วโมง หรือ 7,863 วัตต์ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า 0.63 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 จากการพัฒนาโมดูลเซลล์ความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 12.5 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลเตอร์มาดัดแปลง พบว่ามีราคาต้นทุน 2,500 บาท/วัตต์ โดยวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชุดโมดูลเซลล์ความร้อนที่ออกแบบขึ้นเกือบทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำในประเทศ ยกเว้นเซลล์ความร้อนซึ่งมีมูลค่า 76 % ของราคาชุดโมดูลเซลล์ความร้อน และผลการทดสอบสมรรถนะของโมดูลเซลล์ความร้อนพบว่ามีลักษณะเฉพาะดังนี้

#### ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด	120 – 125	โวลต์
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	0.64 – 0.67	แอมแปร์
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	14.94 – 15.22	วัตต์



ความต้านทานภายในโมดูล	230 – 250	โอห์ม
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า	0.375	เปอร์เซ็นต์
ระบายความร้อนด้วยพัดลม	24	วัตต์

#### ลักษณะเฉพาะทางกายภาพ

ขนาดพื้นที่หน้าตัด	12.2 × 12.2	ชม. <sup>2</sup>
ความยาวของโมดูล	50	ชม.
น้ำหนักรวม	30	กก.
ขนาดหัวต่อท่อทางเข้าไอน้ำ	2.54	ชม.
ขนาดท่อระบายน้ำ	0.40	ชม.
จำนวนเซลล์ความร้อน	96	เซลล์
อุณหภูมิแหล่งความร้อน	100	°C
ความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์เฉลี่ย	24 – 25	°C
อุณหภูมิที่ผนังเซลล์ด้านร้อน สูงสุด	96	°C
ต้องการปริมาณความร้อน	13,652 บีทียู/ชั่วโมง หรือ 4,000 วัตต์	

5.1.4 ผลทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น โดยแบ่งชุดโมดูลเซลล์ความร้อนเป็น 2 คู่ เพื่อความสะดวกในการติดตั้ง และใช้แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจำลองจากชุดผลิตไอน้ำด้วยถังบรรจุน้ำมันก๊าดขนาด 20 ลิตร 2 ใบ ได้ปริมาณความร้อน 137,219 บีทียู / ชั่วโมง ระบายความร้อนด้วยพัดลมจากแหล่งพลังงานภายนอก  $24 \times 4 = 96$  วัตต์ ได้กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตมาป้อนเข้าระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า

ก. กำลังไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดที่ผลิตได้ 60 วัตต์ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 0.14923 เปอร์เซ็นต์ ระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางออกคงที่ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเนื่องเมื่อควบคุมปริมาณความร้อนให้ชุดโมดูลเซลล์ความร้อน ผลิตแรงดันไฟฟ้าทางออกไม่ต่ำกว่า 130 โวลต์

ข. ปริมาณเชื้อเพลิงถ่านที่ใช้ 218.174 กก./kWhr ปริมาณไอน้ำที่ใช้ 296.29 ลิตร/kWhr และปริมาณน้ำจากการควบแน่นในโมดูลเซลล์ความร้อน 139.64 ลิตร/kWhr สามารถคืนกลับเข้าระบบผลิตไอน้ำใหม่

5.1.5 ผลการประเมินต้นทุนผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย โดยประเมินอายุการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน 30 ปี และแหล่งความร้อนไม่มีต้นทุนเนื่องจากพิจารณาที่แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง พบว่า มีราคาผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย 9.51 บาท/kWhr

5.1.6 ในกรณีที่ไม่ได้ใช้ความร้อนเหลือทิ้งเป็นแหล่งความร้อนของระบบ ได้วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบข้อมูลต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น โดยประเมินตามอายุการใช้งานและต้นทุนอุปกรณ์ระหว่างการใช้เชื้อเพลิงต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทป (Pu-238) กับ ถ่านไม้สำหรับหุงต้ม พบว่า ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของการใช้ถ่านไม้สำหรับหุงต้มและต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทป (Pu-238) มีราคา 2,191.25 และ 78,015.60 บาท/kWhr ตามลำดับ ราคาต้นทุนพลังงานต่อหน่วยไฟฟ้าสูงมาก ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น จึงเหมาะกับการใช้งานกับแหล่งความร้อนที่ไม่มีต้นทุนพลังงาน เช่น แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง แหล่งความร้อนที่ได้เปล่าจากท้องถิ่น แหล่งความร้อนที่ได้เปล่าได้พิภพ เป็นต้น

## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนจำเป็นต้องมีการจ่ายไฟฟ้าส่วนหนึ่งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาจ่ายให้กับพัดลม หรืออาจต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอกมาขับพัดลม ในการระบายความร้อนเพื่อรักษาความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนัง 2 ด้าน

5.2.2 การผลิตไอน้ำแทนความร้อนเหลือทิ้งในงานวิจัย ควรใช้ภาชนะต้มน้ำและเตาถ่านหุงต้มแยกเป็นชุดย่อย เนื่องจากประกอบเข้ากับชุดเซลล์ความร้อนได้สะดวก เคลื่อนย้ายได้ง่าย ซึ่งดีกว่าใช้ภาชนะต้มน้ำและเตาถ่านหุงต้มขนาดใหญ่ ที่เคลื่อนย้ายไม่สะดวก ราคาค่อนข้างแพง

5.2.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเป็นชุด โมดูลเซลล์ความร้อนและระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ส่วนใหญ่สามารถหาได้ภายในประเทศยกเว้นเซลล์ความร้อนที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ วัสดุบางอย่างสามารถเปลี่ยนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ เช่น การเปลี่ยนวัสดุถ่ายเทความร้อนหรือแผ่นระบายความร้อนจากอลูมิเนียมเป็น ทองแดงจะช่วยให้การนำความร้อนดีขึ้น ทนการกัดกร่อน แต่จะทำให้ชุดโมดูลเซลล์ความร้อนมีต้นทุน และน้ำหนักมากขึ้น

5.2.4 ปัจจุบันเซลล์ความร้อนหรืออุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ยังมีการนำมาใช้ในวงจำกัด จึงมีราคาแพง มีผลให้ต้นทุนชุด โมดูลเซลล์ความร้อนมีราคาสูงกว่าการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น แต่การผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีนี้เป็นการคืนกลับพลังงานความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ได้ง่าย

5.2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าในชนบทที่ห่างไกลสำหรับใช้ในครัวเรือนขนาดเล็ก โดยอาศัยแหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงที่มีอยู่ใน

ท้องถิ่น เช่น แกลบ ฟางข้าว ไม้ และชานอ้อย เป็นต้น นำมาต้มน้ำให้เป็นน้ำร้อนหรือไอน้ำเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนให้กับชุดโมดูลเซลล์ความร้อน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในงานวิจัยนี้ใช้การผลิตไอน้ำแทนความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิไม่เกิน  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งระหว่างการทดสอบระบบมีแนวคิดว่าการต้มน้ำจนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำใช้พลังงานความร้อนมากกว่าการต้มน้ำเพียงให้ เป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง จึงควรมีออกแบบระบบโมดูลเซลล์ความร้อนให้สามารถทำงานกับแหล่งความร้อนที่เป็นน้ำร้อน

5.3.2 การระบายความร้อนด้วยพัดลมช่วยระบายความร้อน ทำให้ต้องมีการจ่ายไฟฟ้าส่วนหนึ่งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้กับพัดลมหรือต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอกมาขับพัดลม ดังนั้นเพื่อปรับปรุงการระบายความร้อนที่ต้องสูญเสียพลังงานไฟฟ้าให้พัดลม อาจออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหรือน้ำมันไหลผ่านแทนการระบายความร้อนด้วยพัดลม ซึ่งหากลดอุณหภูมิผนังเซลล์ด้านเย็นได้ต่ำลงจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์ความร้อน

5.3.3 เซลล์ความร้อนหรืออุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกตัดแปลงที่ใช้ในงานวิจัย เป็นการกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ ถ้าต้องการผลิตไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงกว่านี้เพื่อใช้กับความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง จะต้องใช้ Thermoelectric generator (TEG) ซึ่งเป็นเซลล์ความร้อนที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยตรง

## รายการอ้างอิง

- [1] Hagelstein, Peter. L. Thermal to electric energy conversion. Research Laboratory of Electronics, MIT, USA.
- [2] Kambe, Mitsuru. A concept of 500 kWe thermoelectric power conversion system to make use of waste heat of PWR power plant. Nuclear power generation technology sector, Nuclear Technology Research Laboratory.
- [3] Bass, J.C., Elsner, N.B. and Leavitt, F.A. Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines. Hi-Z Technology Inc, 1992.
- [4] Yasuo, Tada. Thermoelectric Power Generation System using Exhaust Heat in an Incinerator. *Materia* 1999: 764-767.
- [5] Mozharivskiy, Yuriy. Thermoelectric phases. Canada: McMaster University.
- [6] Hendricks, T. and Choate, W.T. Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery. Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, 2006.
- [7] The science and materials behind thermoelectrics. Physical Review Letters 91 (2003): 148301.
- [8] Loffe, A.F. Poluprovodnikovye Termoelementy. Moskow-Leningrad, 1956.
- [9] Steve J. Noll. Peltier Photos, Drawings & Animations[online]. Available from: <http://www.peltier-info.com/photos.html>
- [10] Understanding Thermoelectric Cooling[online]. Available from: <http://www.activecool.com/technotes/thermoelectric.html>
- [11] Thermoelectric Technical Reference — Basic Principles of Thermoelectric Materials[online]. Available from: <http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef02.php>
- [12] Toshiba Giga Topaz thermoelectric module[online]. Available from: <http://museum.toshiba.co.jp/06energy/newtech141.html>
- [13] Model 8550 Thermoelectric generator[online]. Available from: [http://www.globalte.com/pdf/teg\\_8550\\_spec.pdf](http://www.globalte.com/pdf/teg_8550_spec.pdf)
- [14] Radioisotope thermoelectric generator[online]. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope\\_thermoelectric\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator)

- [15] What are the fuels for radioisotope thermoelectric generators[online]. Available from:  
<http://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/power.html>
- [16] สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และคณะ. รายงานฉบับสมบูรณ์ งานศึกษาวิเคราะห์ศักยภาพทางเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนเหลือทิ้งขนาด 100 วัตต์. ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ธันวาคม 2549.
- [17] Thermoelectric Technical Reference[online]. Available from:  
[http://www.ferrotec.com/Thermoelectric Technical Reference.htm](http://www.ferrotec.com/Thermoelectric%20Technical%20Reference.htm)
- [18] The Research Institute for Ubiquitous Energy Devices. Electric Power Generated from Waste Heat. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan, 2005.
- [19] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. สำนักถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี. ข้อมูลเกี่ยวกับการปั่นเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง. กรุงเทพฯ
- [20] Power Metric and Imperial Conversion Factors[online]. Available from:  
[http://www.usefulinformation.eu/c\\_factor/power.html](http://www.usefulinformation.eu/c_factor/power.html)
- [21] บริษัท ไทย – เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. Aluminium alloys. สมุทรปราการ
- [22] M.M. El-Wakil. Table A-4a Saturated steam properties, temperature table (SI units). Powerplant Technology. Mcgraw-hill International Editions.
- [23] Plutonium[online]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium>

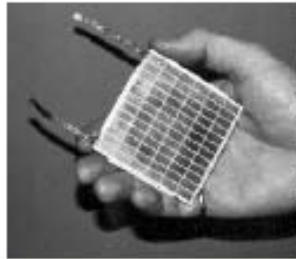




ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.



## HZ-20 Thermoelectric Module

Uses Bismuth Telluride Based Semiconductors

Solid State Conversion of Heat To Electricity

### Properties of the 19 Watt Module, HZ-20

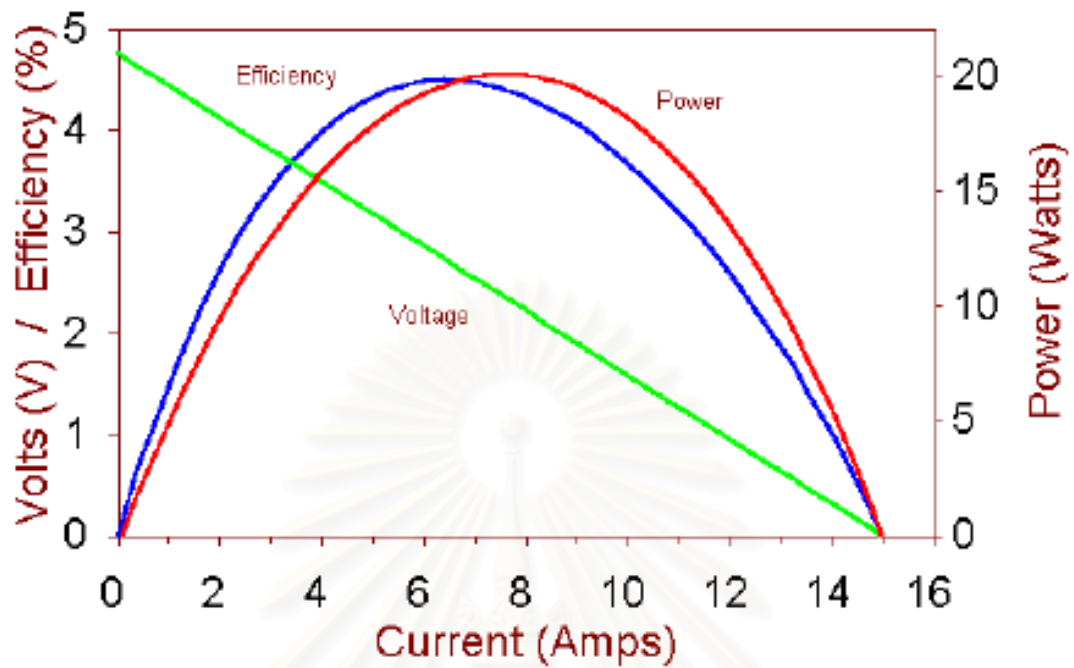
Physical Properties	Value	Tolerance
Width & Length	2.95" (7.5 cm)	±0.01 (0.25)
Thickness	0.2" (0.508)	±0.01 (0.25)
Special Order		±0.002 (0.05)
Weight	115 grams	±3 grams
Compressive Yield Stress	10 ksi (70 MPa)	minimum
Number of active couples	71 couples	-----
<b>Thermal Properties</b>		
Design Hot Side Temperature	230 C (450 F)	±10 (20)
Design Cold Side Temperature	30 C (85 F)	±5 (10)
Maximum Continuous Temperature	250 C (480 F)	-----
Minimum Continuous Temperature	none	-----
Maximum Intermittent Temperature	400 C (750 F)	-----
Thermal Conductivity*	0.024 W/cm*K	+0.001
Heat Flux*	9.54 W/sqcm	±0.5
<b>Electrical Properties (as a generator)*</b>		
Power**	19 Watts	minimum
Load Voltage	2.38 Volts	±0.1
Internal Resistance	0.3 Ohm	±0.05
Current	8 Amps	±1
Open Circuit Voltage	5.0 Volts	±0.3
Efficiency	4.5 %	minimum

\* At Design Temperatures

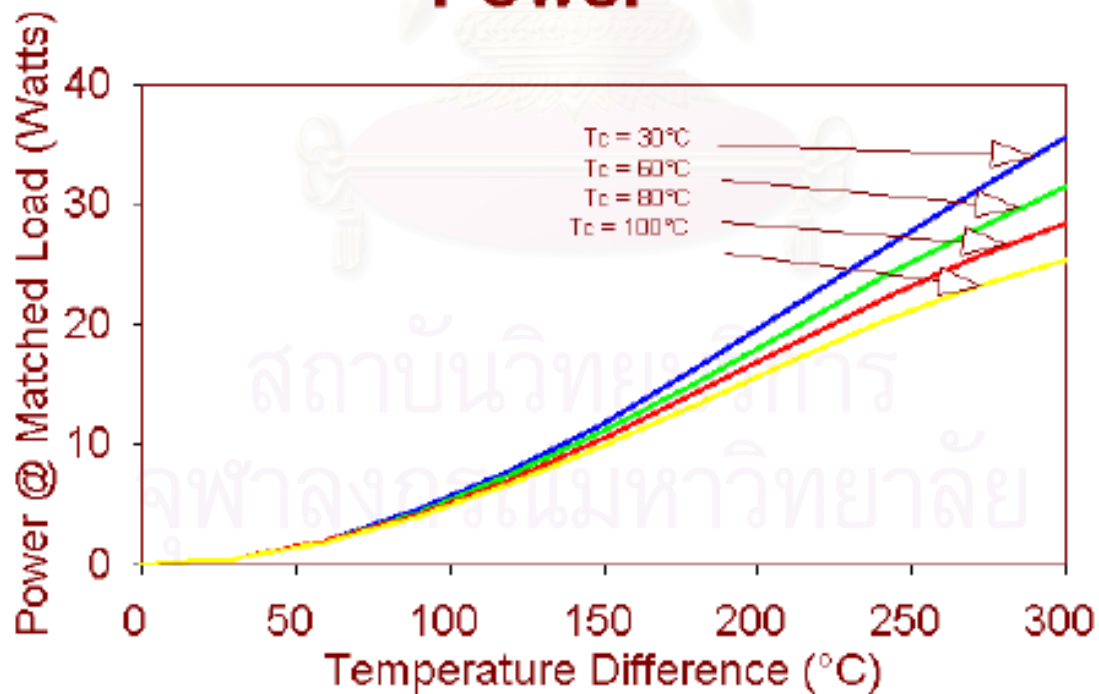
\*\* At Matched Load, refer to the graphs for properties at various operating temperatures and conditions.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

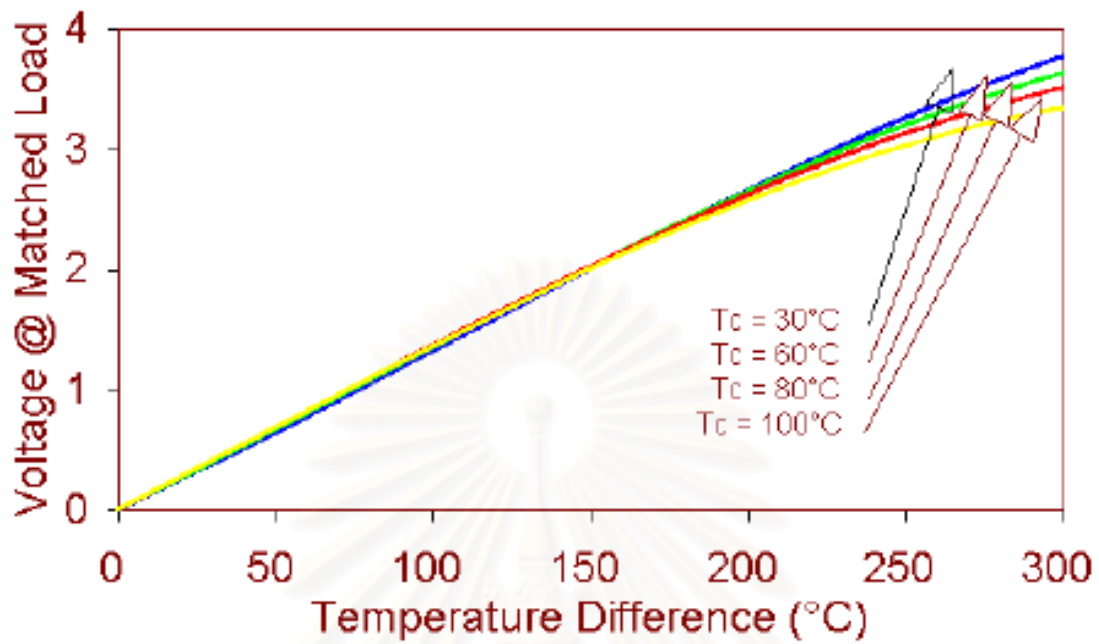
## Current - Voltage Curves



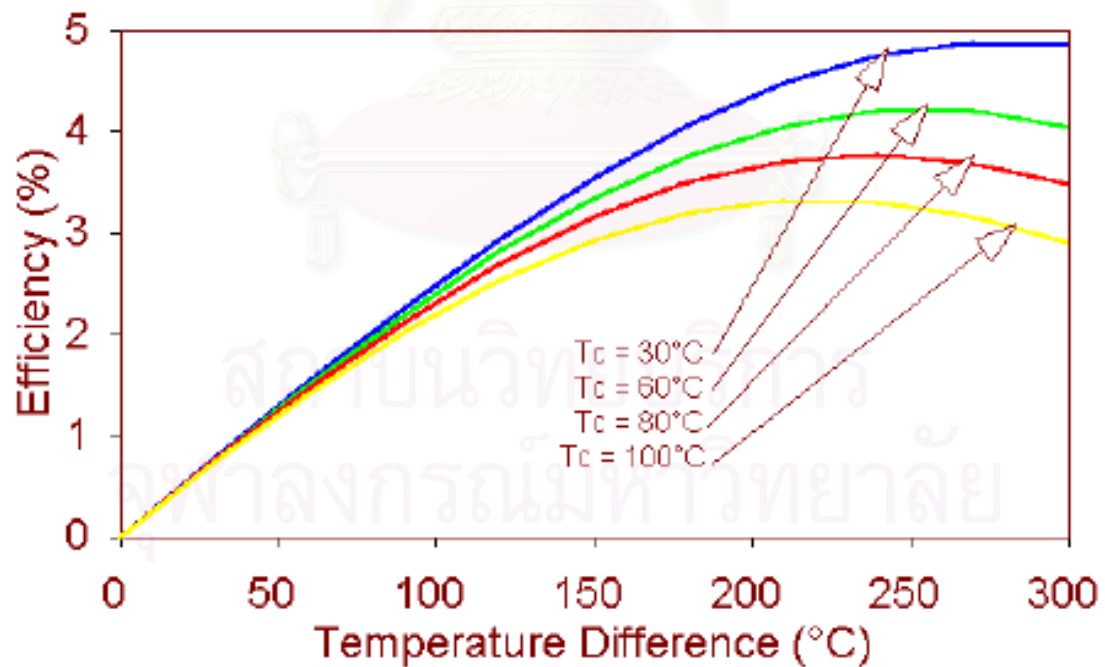
## Power



## Voltage



## Efficiency



ภาคผนวก ข.



Thermoelectric  
Cooler

TEC1-12710

Performance Specifications

Hot Side Temperature (°C)	25°C	50°C
Qmax (Watts)	85	96
Delta Tmax (°C)	66	75
I <sub>max</sub> (Amps)	10.5	10.5
V <sub>max</sub> (Volts)	15.2	17.4
Module Resistance (Ohms)	1.08	1.24



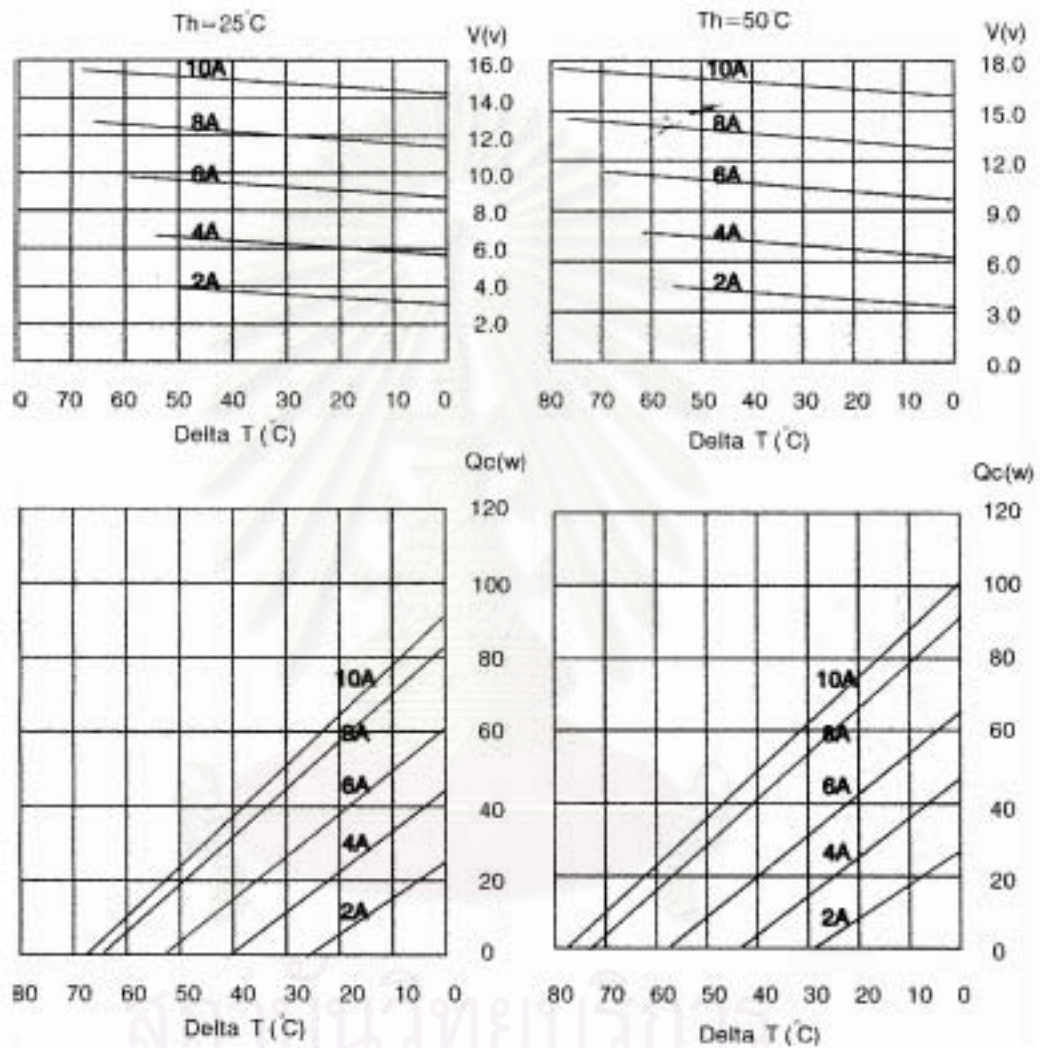
Performance curves on page 2

สถาบันทฤษฎีบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



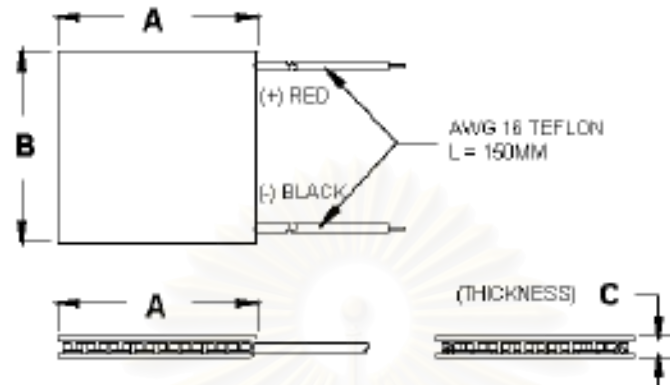


TEC1-12710





TEC1-12710



Ceramic Material: Alumina ( $Al_2O_3$ )  
Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

#### Size table:

A	B	C		
40	40	3.3		

#### Operating Tips

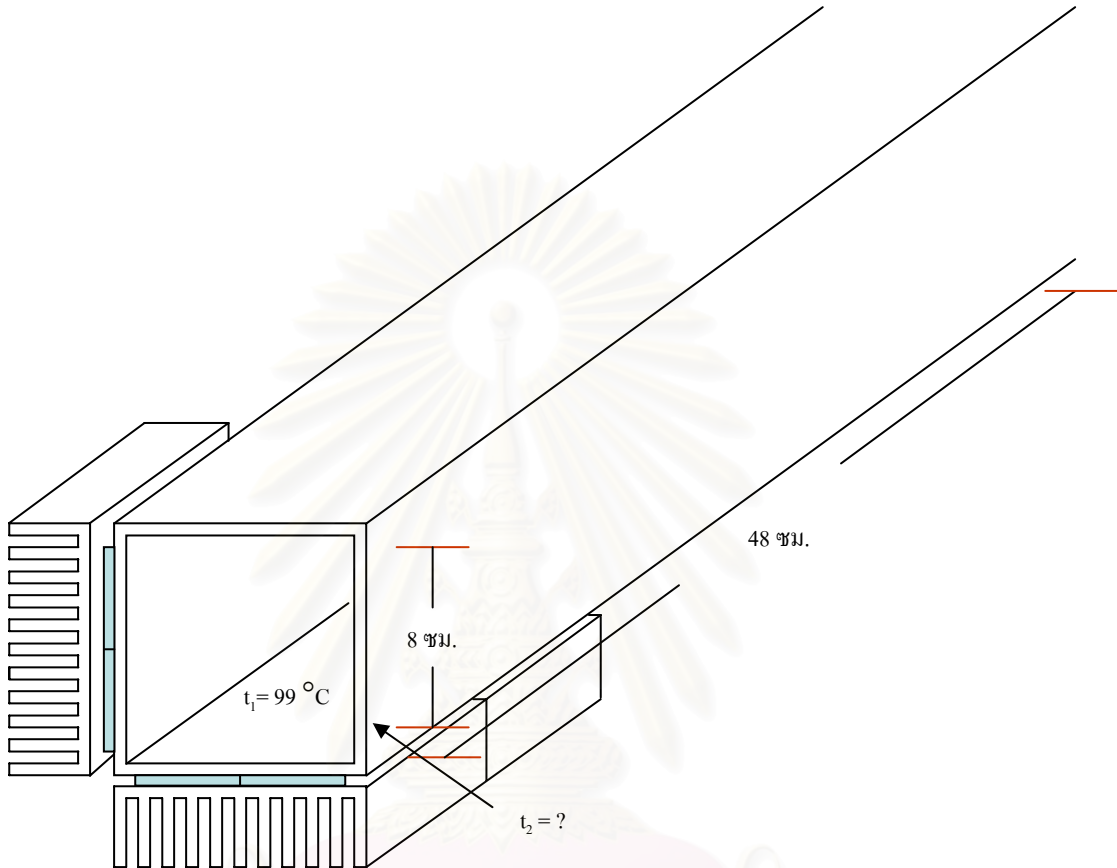
- Max. Operating Temperature: 138°C
- Do not exceed  $I_{max}$  or  $V_{max}$  when operating module.
- Life expectancy: 200,000 hours
- 
- Please consult HB for moisture protection options (sealing).
- Failure rate based on long time testings: 0.2%.

Copyright HB Corporation. HB reserves the right to change these specifications without notice.

Rev: 2.03

## ภาคผนวก ค.

## การประเมินอุณหภูมิมันงด้านร้อนที่ติดกับเซลล์ความร้อน



รูปที่ ค.1 แผนภาพแสดงอุณหภูมิมันงด้านร้อนและผนังด้านร้อนที่ติดเซลล์ความร้อน

จากการทดสอบ โดยใช้ไอน้ำแทนความร้อนเหลือทิ้ง เข้าสู่เซลล์ความร้อน และวัดอุณหภูมิก่อนเข้าและออกจากชุดเซลล์ความร้อน ได้อุณหภูมิจนโดยเฉลี่ย  $99\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $273.2 + 99 = 372.2\text{ K}$

ชุดผลิตไอน้ำ เฉพาะภาชนะต้มน้ำที่มีน้ำแล้ว ก่อนทดสอบ มีน้ำหนัก  $2.5\text{ kg}$  และหลังทดสอบ มีน้ำหนัก  $1.3\text{ kg}$  ใช้เวลาทดสอบ  $39\text{ นาที} = 2,340\text{ วินาที}$

ดังนั้น น้ำหนักที่หายไป เป็นของน้ำที่เปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ  $1.2\text{ kg}$  และเมื่อชั่งน้ำหนักของน้ำที่ควบแน่น ได้  $1\text{ kg}$  แสดงว่า น้ำที่ควบแน่นถ่ายเทความร้อนให้กับผนังด้านใน ซึ่งเปลี่ยนสถานะมาจากไอน้ำ

$$\text{ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L)} = 2.258 \times 10^6\text{ J/kg}$$

ดังนั้น พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทมายังผนังด้านใน

$$Q = mL$$

$$Q = (1 \text{ kg}) \times (2.258 \times 10^6 \text{ J/kg}) \\ = 2.258 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{และคิดเป็นกำลังงานได้ } \frac{2.258 \times 10^6}{2,340} = 964.957 \text{ W}$$

การถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำสู่ผนังด้านในและผนังด้านร้อนของชุดเซลล์ความร้อน เป็น การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำความร้อน ดังสมการ

$$Q_{\text{conduction}} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} \quad \text{W} \quad \dots\dots\dots \text{ ค.1}$$

โดยที่ $Q_{\text{conduction}}$	คือ	ค่าการนำความร้อนผ่านวัสดุ (W)
$k$	คือ	thermal conductivity ของวัสดุ (W/m·K)
$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ( $\text{m}^2$ )
$T_2 - T_1$	คือ	ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างพื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (K)
$\Delta x$	คือ	ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ (m)

วัสดุที่ใช้ทำท่อทรงกระบอกเหลี่ยม เป็น อลูมิเนียมผสม มีค่า  $k = 120 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  [21]

พื้นที่หน้าตัดที่มีการถ่ายเทความร้อนให้กับเซลล์ความร้อน 4 ด้านของท่อ

$$A = \frac{8}{100} \times \frac{48}{100} \times 4 = 0.1536 \text{ m}^2$$

$$\Delta x = \text{ความหนาแผ่นอลูมิเนียมผสม} = 4 \text{ mm} = 0.004 \text{ m}$$

ความร้อนที่ถ่ายเทจากไอน้ำไปยังอลูมิเนียมผสม = 964.957 W และ  $T_1 = 372.2 \text{ K}$

แทนค่าในสมการ ค.1

$$964.957 = -120 \times 0.1536 \times \frac{(T_2 - 372.2)}{0.004}$$

$$T_2 = 371.99 \text{ K}$$

$$t_2 = 98.79 \text{ }^\circ\text{C}$$

ดังนั้น อุณหภูมิที่ผนังด้านร้อนของเซลล์ความร้อน  $98.79 \text{ }^\circ\text{C}$

## ภาคผนวก ง.

ตารางที่ ง.1 ผลทดสอบคุณสมบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์ TEC 1-12710 ที่  $\Delta T$  เท่ากับ  $6^{\circ}\text{C}$

Electrical testing data for TEC1-12710-U HL 03/20/06

The data is obtained at  $T_h=36.8^{\circ}\text{C}$  and  $T_c=30.8^{\circ}\text{C}$

Load resistance ( $\Omega$ )	Output voltage (V)	Output current (A)	Output power (W)
open circuit	0.292	short circuit 0.13 A	-
0.25	0.03	0.133	0.00399
0.5	0.06	0.124	0.00744
0.75	0.08	0.11	0.0088
1	0.098	0.101	0.009898
2	0.15	0.078	0.0117
2.2	0.156	0.075	0.0117
2.5	0.166	0.07	0.01162
3	0.182	0.064	0.011648
3.3	0.19	0.061	0.01159
3.75	0.195	0.055	0.010725
4	0.2	0.055	0.011
4.3	0.207	0.052	0.010764
5	0.216	0.047	0.010152
5.3	0.218	0.045	0.00981
6	0.227	0.042	0.009534
6.3	0.23	0.04	0.0092
6.6	0.234	0.04	0.00936
7	0.236	0.037	0.008732
7.5	0.24	0.035	0.0084
8	0.242	0.034	0.008228
9.5	0.251	0.03	0.00753



ตารางที่ ง.1 (ต่อ)

Load resistance ( $\Omega$ )	Output voltage (V)	Output current (A)	Output power (W)
10	0.258	0.029	0.007482
11	0.261	0.027	0.007047
12	0.263	0.026	0.006838
13	0.265	0.024	0.00636
15	0.272	0.022	0.005984
17	0.272	0.02	0.00544
18	0.272	0.019	0.005168
20	0.278	0.017	0.004726

ตารางที่ ง.2 ผลทดสอบคุณสมบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์ TEC 1-12710 ที่  $\Delta T$  เท่ากับ 19 °C

Electrical testing data for TEC1-12710-U HL 03/20/06

The data is obtained at  $T_h=52.2$  °C and  $T_c=33.2$  °C

Load resistance ( $\Omega$ )	Output voltage (V)	Output current (A)	Output power (W)
open circuit	0.88	short circuit 0.34 A	-
0.25	0.09	0.343	0.03087
0.5	0.165	0.314	0.05181
0.75	0.226	0.294	0.066444
1	0.27	0.27	0.0729
2	0.41	0.208	0.08528
2.2	0.426	0.198	0.084348
2.5	0.457	0.184	0.084088
3	0.5	0.169	0.0845
3.3	0.52	0.16	0.0832
3.75	0.537	0.145	0.077865
4	0.547	0.143	0.078221
4.3	0.568	0.135	0.07668

ตารางที่ ง.2 (ต่อ)

Load resistance ( $\Omega$ )	Output voltage (V)	Output current (A)	Output power (W)
5	0.6	0.123	0.0738
5.3	0.61	0.119	0.07259
6	0.628	0.108	0.067824
6.3	0.635	0.104	0.06604
6.6	0.643	0.101	0.064943
7	0.651	0.096	0.062496
7.5	0.667	0.092	0.061364
8	0.673	0.088	0.059224
9.5	0.701	0.078	0.054678
10	0.71	0.075	0.05325
11	0.721	0.07	0.05047
12	0.731	0.065	0.047515
13	0.74	0.061	0.04514
15	0.749	0.055	0.041195
17	0.764	0.049	0.037436
18	0.767	0.047	0.036049
20	0.782	0.043	0.033626

ตารางที่ ง.3 ผลทดสอบคุณสมบัติการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์ TEC 1-12710 ที่  $\Delta T$  เท่ากับ  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

Electrical testing data for TEC1-12710-U HL 03/20/06

The data is obtained at  $T_h=65.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $T_c=36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

Load resistance ( $\Omega$ )	Output voltage (V)	Output current (A)	Output power (W)
open circuit	1.24	short circuit 0.44 A	-
0.25	0.118	0.436	0.05145
0.5	0.206	0.398	0.081988
0.75	0.281	0.37	0.10397

ตารางที่ ง.3 (ต่อ)

Load resistance ( $\Omega$ )	Output voltage (V)	Output current (A)	Output power (W)
1	0.347	0.347	0.120409
2	0.538	0.273	0.146874
2.2	0.569	0.26	0.14794
2.5	0.607	0.244	0.148108
3	0.658	0.221	0.145418
3.3	0.683	0.208	0.142064
3.75	0.725	0.192	0.1392
4	0.73	0.19	0.1387
4.3	0.76	0.18	0.1368
5	0.804	0.163	0.131052
5.3	0.82	0.159	0.13038
6	0.855	0.145	0.123975
6.3	0.865	0.14	0.1211
6.6	0.877	0.136	0.119272
7	0.888	0.13	0.11544
7.5	0.902	0.122	0.110044
8	0.912	0.118	0.107616
9.5	0.952	0.104	0.099008
10	0.965	0.1	0.0965
11	0.982	0.093	0.091326
12	1	0.087	0.087
13	1.011	0.081	0.081891
15	1.033	0.074	0.076442
17	1.048	0.065	0.06812
18	1.051	0.06	0.06306
20	1.066	0.057	0.060762

## ภาคผนวก จ.

ตารางที่ จ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งโซนกลุ่มเซลล์ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อป้อน  
ไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าระบบทางเดียว

โซนที่	1	2	3	4	5	6
เวลา (นาที)	อุณหภูมิผนังเซลล์ด้านร้อน (°C)					
0	32.2	42	57	61.5	56.6	56
2	51.4	62.5	72	74.3	69.7	67.6
4	61.5	70.3	77.8	79.4	76.4	74.7
6	69	75.1	80.9	82.5	80	78.4
8	73.8	78.5	83.5	84.9	82.2	80.6
10	77.1	80.4	84.8	85.9	83.8	81.8
12	78.5	81.8	85.8	86.5	84.4	82.6
14	79.3	82.5	86.1	87.1	85	83.1
16	80	82.7	86.3	87.4	85.1	83.4
18	80.3	83	86.8	87.4	85.3	83.5
20	80.6	83.2	86.9	87.6	85.7	83.8

ตารางที่ จ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งโซนกลุ่มเซลล์ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อป้อน  
ไอน้ำจากชุดผลิตไอน้ำเข้าระบบสองทาง

โซนที่	1	2	3	4	5	6
เวลา (นาที)	อุณหภูมิผนังเซลล์ด้านร้อน (°C)					
0	29.5	34.9	40.2	51.3	53.1	46.5
2	49.5	61.4	72.7	80	82.2	77.1
4	75.5	84.1	90.4	93.2	92.7	92.6
6	92.6	95.1	96.3	98.1	98.5	98
8	97.5	97.8	97.5	98.6	98.6	98.1
10	97.6	97.8	97.5	98.5	98.8	98.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ฉ.

ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ ฉ.1 โมดูลเซลล์ความร้อนที่ผลิตไฟฟ้าได้ค่าต่ำสุด

ความต้านทาน ( $\Omega$ )	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
open circuit	120	short circuit 0.67 A	
25	15	0.54	8.10
50	25	0.44	11
75	30	0.40	12
100	35	0.36	12.60
125	40	0.34	13.60
150	45	0.32	14.40
175	50	0.30	15
200	55	0.28	15.40
225	60	0.26	15.60
250	60	0.24	14.40
275	65	0.22	14.30
300	65	0.21	13.65
325	70	0.20	14
350	72	0.19	13.68
375	75	0.18	13.50
400	75	0.18	13.50
425	75	0.17	12.75

ตารางที่ ๓.2 โมดูลเซลล์ความร้อนที่ผลิตไฟฟ้าได้ค่าสูงสุด

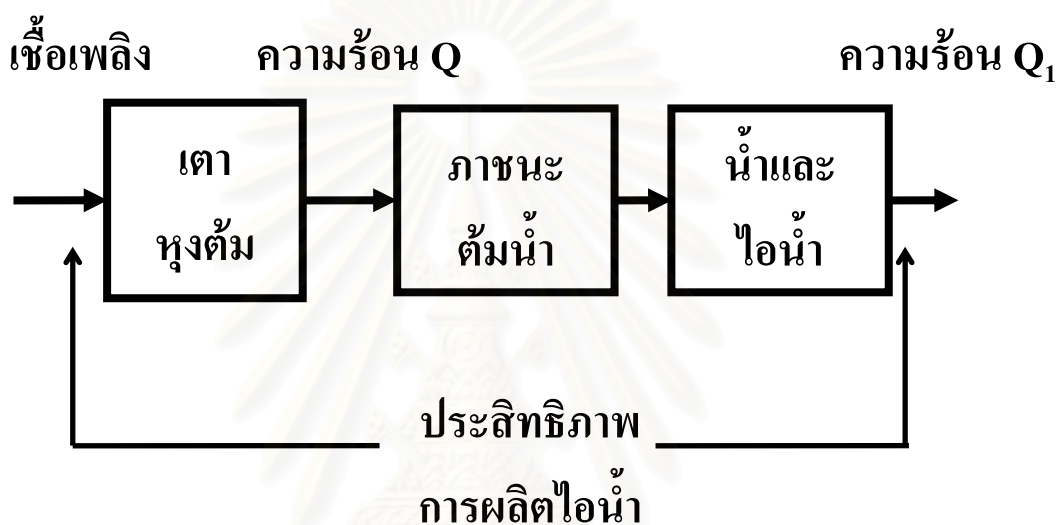
ความต้านทาน ( $\Omega$ )	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
open circuit	125	short circuit 0.64 A	
25	10	0.55	5.50
50	20	0.44	8.80
75	30	0.40	12
100	35	0.36	12.60
125	40	0.36	14.40
150	45	0.33	14.85
175	50	0.30	15
200	55	0.27	14.85
225	57	0.26	14.82
250	63	0.25	15.75
275	65	0.23	14.95
300	70	0.21	14.70
325	71	0.20	14.20
350	72.5	0.20	14.50
375	75	0.19	14.25
400	77	0.18	13.86
425	78	0.17	13.26

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช.

ประสิทธิภาพของชุดผลิตไอน้ำด้วยการต้มน้ำ

เมื่อภาชนะต้มน้ำได้รับความร้อนจากเชื้อเพลิง จะมีการสะสมความร้อนและถ่ายเทให้กับน้ำ จนกระทั่งน้ำเดือดที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังแผนภาพ รูปที่ ช.1



รูปที่ ช.1 แผนภาพการป้อนปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงจนกระทั่งได้ไอน้ำออกมา

ในการทดสอบ น้ำมีปริมาณ  $48\text{ ลิตร} = 48,000\text{ ซม.}^3$  น้ำมีอุณหภูมิ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความหนาแน่น  $995.7\text{ kg/m}^3$  [22] ดังนั้น จะมีน้ำหนัก

$$m = \rho V$$

$$m = 995.7 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3 \times 48,000\text{ cm}^3$$

$$m = 47,793.6\text{ g หรือ } 47.794\text{ kg}$$

หลังการทดสอบ น้ำมีปริมาณ  $8.5\text{ ลิตร} = 8,500\text{ ซม.}^3$  ดังนั้น ปริมาณน้ำ  $48,000 - 8,500 = 39,500\text{ ซม.}^3$  เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ และมีอุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความหนาแน่นไอน้ำที่  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$   $958.4\text{ kg/m}^3$  [22] ดังนั้น จะมีน้ำหนัก

$$m = 958.4 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3 \times 39,500\text{ cm}^3$$

$$m = 37,856.8\text{ g หรือ } 37.857\text{ kg}$$

เมื่อน้ำได้รับความร้อน จนเดือดที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  กลายเป็นไอน้ำ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้น ความร้อนที่ได้รับจากภาชนะต้มน้ำ

$$Q_1 = mC_p\Delta T + mL$$

จาก ค่าความจุความร้อนของน้ำ ( $C_p$ ) =  $4.19 \times 10^3$  J/kg·K

และ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $L$ ) =  $2.258 \times 10^6$  J/kg

แทนค่าในสมการ

$$Q = 47.794 \times 4.19 \times 10^3 \times (100 - 30) + (37.857 \times 2.258 \times 10^6)$$

$$Q_1 = 99.499 \text{ MJ}$$

เชื้อเพลิงที่ใช้ เป็นถ่านไม้ มีค่า Calorific value ( $C_v$ ) =  $2.8 \times 10^7$  J/kg ใช้ถ่าน 12 kg ในการให้ความร้อน ดังนั้น

$$Q = MC_v$$

$$= 12 \times 2.8 \times 10^7$$

$$Q = 336 \text{ MJ}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ประสิทธิภาพการต้มน้ำ} &= \frac{Q_1}{Q} \times 100\% \\ &= \frac{99.499}{336} \times 100\% \\ &= 29.61\% \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช.

การคำนวณค่าไฟฟ้าต่อหน่วยด้วยชุดโมดูลเซลล์ความร้อนที่ตัดแปลงมาจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก แปรผันไปตามอายุการใช้งาน

การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่ตัดแปลงจากเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์มีต้นทุน 2,500 บาท/วัตต์

ดังนั้นการผลิตไฟฟ้า 1 kW ต้องลงทุน  $3,000 \times 1,000 = 2,500,000$  บาท

อายุใช้งาน 30 ปี ทำงานต่อเนื่อง ผลิตไฟฟ้าได้  $30 \times 365 \times 24 = 262,800$  ชั่วโมง

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)} = \frac{\text{cost}}{\text{time}} = \frac{2,500,000}{262,800} = 9.51 \text{ บาท/kWhr}$$

อายุใช้งาน 25 ปี ทำงานต่อเนื่อง ผลิตไฟฟ้าได้  $25 \times 365 \times 24 = 219,000$  ชั่วโมง

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)} = \frac{\text{cost}}{\text{time}} = \frac{2,500,000}{219,000} = 11.41 \text{ บาท/kWhr}$$

อายุใช้งาน 20 ปี ทำงานต่อเนื่อง ผลิตไฟฟ้าได้  $20 \times 365 \times 24 = 175,200$  ชั่วโมง

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)} = \frac{\text{cost}}{\text{time}} = \frac{2,500,000}{175,200} = 14.27 \text{ บาท/kWhr}$$

อายุใช้งาน 15 ปี ทำงานต่อเนื่อง ผลิตไฟฟ้าได้  $15 \times 365 \times 24 = 131,400$  ชั่วโมง

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)} = \frac{\text{cost}}{\text{time}} = \frac{2,500,000}{131,400} = 19.03 \text{ บาท/kWhr}$$

อายุใช้งาน 10 ปี ทำงานต่อเนื่อง ผลิตไฟฟ้าได้  $10 \times 365 \times 24 = 87,600$  ชั่วโมง

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)} = \frac{\text{cost}}{\text{time}} = \frac{2,500,000}{87,600} = 28.54 \text{ บาท/kWhr}$$



อายุใช้งาน 5 ปี ทำงานต่อเนื่อง ผลิตไฟฟ้าได้  $5 \times 365 \times 24 = 43,800$  ชั่วโมง

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)} = \frac{\text{cost}}{\text{time}} = \frac{2,500,000}{43,800} = 57.07 \text{ บาท/kWhr}$$

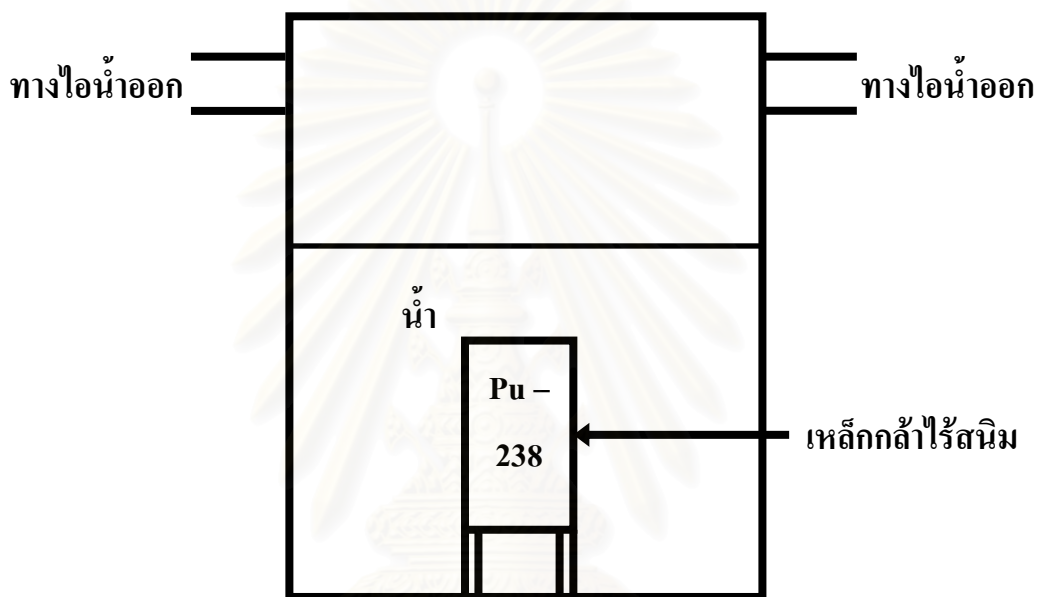


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ.

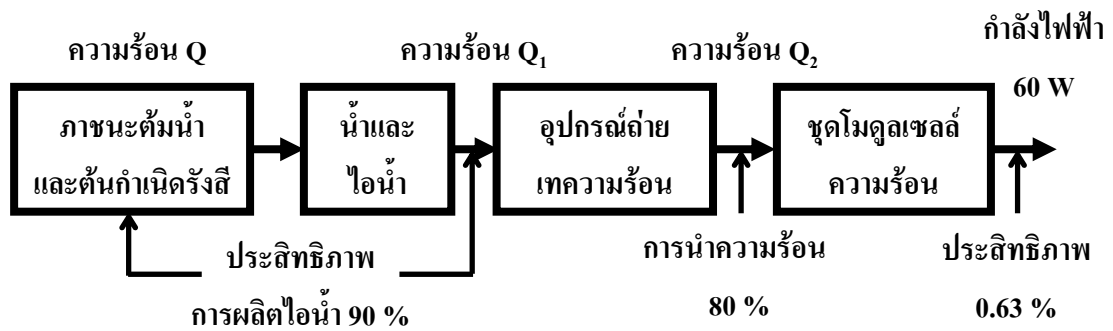
การประเมินต้นทุนเชื้อเพลิง

1. ถ้าใช้ต้นกำเนิดรังสี เช่น Pu – 238 เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยที่มีการหุ้มต้นกำเนิดรังสีด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีความหนา 1 มม. (Pu – 238 เป็นแหล่งกำเนิดอัลฟา [23]) ใส่ไว้ในภาชนะต้มน้ำตามรูป ฅ.1



รูปที่ ฅ.1 แนวคิดการวางต้นกำเนิดรังสีในภาชนะต้มน้ำ

Pu – 238 สลายตัวให้รังสีอัลฟา และเมื่อรังสีอัลฟาตกกระทบกับฝาด้านในของเหล็กกล้าไร้สนิม จะมีการถ่ายเทจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน รอบผนังด้านใน และถ่ายเทออกสู่ผนังด้านนอกที่ล้อมรอบด้วยน้ำ และเปลี่ยนสถานะให้น้ำกลายเป็นไอ เป็นแหล่งความร้อนให้กับชุดโมดูลเซลล์ความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้า ตามแผนภาพ รูปที่ ฅ.2



รูปที่ ๓.2 แผนภาพการป้อนปริมาณความร้อนสู่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยชุดโมดูลเซลล์ความร้อน

ดังนั้น การหาปริมาณความร้อนที่มาจากต้นกำเนิดแรงดันจากประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน สามารถทำได้ดังนี้  
ปริมาณความร้อนที่ใช้ผลิตไฟฟ้า 60 W<sub>e</sub>

$$\frac{60}{Q_2} = \frac{0.63}{100}$$

$$Q_2 = \frac{60 \times 100}{0.63} = 9,523.81 W_{th}$$

ปริมาณความร้อนมาจากไอน้ำที่ถ่ายเทบนผนังด้านในของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{80}{100}$$

$$Q_1 = \frac{100 \times Q_2}{80} = \frac{100 \times 9,523.81}{80} = 11,904.76 W_{th}$$

ระบบผลิตไอน้ำ ที่มีแหล่งความร้อนเป็นต้นกำเนิดแรงดัน ประเมินว่า มีประสิทธิภาพ 90 %  
ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่มาจากต้นกำเนิดแรงดัน จะได้

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{90}{100}$$

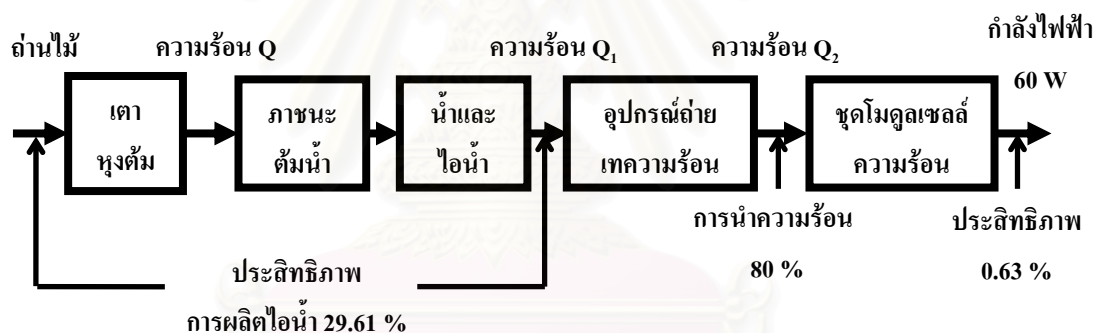
$$Q = \frac{100 \times Q_1}{90} = \frac{100 \times 11,904.76}{90} = 13,227.51 W_{th}$$

ต้องใช้ความร้อน  $13,227.51 W_{th}$  ถ่ายเทให้กับน้ำและทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอ จาก  
บทที่ 2 ในตารางที่ 2.1 Pu - 238 มีราคา 3,000 \$/W ในการประเมินราคาเบื้องต้น จะได้  $3,000 \$ \times$   
 $13,227.51 W_{th} = 39,682,539.7 \$$  เทียบเป็นเงินบาท ( $1 \$ = 31$  บาท) จะได้  $39,682,539.7 \$ \times 31$  บาท  
 $= 1.23 \times 10^9$  บาท ประเมินว่าเป็นต้นทุนสำหรับใช้งาน 30 ปี และผลิตไฟฟ้าได้ 60 W

ถ้าเป็นการประเมินในหน่วยพลังงานไฟฟ้า จะเป็นดังนี้

ผลิตไฟฟ้า	60	W	มีต้นทุน	$1.23 \times 10^9$	บาท
ผลิตไฟฟ้า	1,000	W	มีต้นทุน	$\frac{1.23 \times 10^9 \times 1,000}{60}$	
				$= 2.05 \times 10^{10}$	บาท
ใช้งาน 30 ปี คิดเป็น	$30 \times 365 \times 24$			$= 262,800$	ชั่วโมง
ดังนั้น ต้นทุนพลังงานต่อหน่วยไฟฟ้า				$= \frac{2.05 \times 10^{10}}{262,800}$	$= 78,006.09$ บาท/kWhr

2. ถ้าใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงในการกำเนิดความร้อน ดังแผนภาพรูปที่ ฅ.3



รูปที่ ฅ.3 แผนภาพการป้อนปริมาณความร้อนสู่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยชุด โมดูลเซลล์ความร้อน

จากการทดสอบด้วยชุด โมดูลเซลล์ความร้อน สามารถผลิตไฟฟ้า 50 Wac เวลาในการผลิต  
ไฟฟ้า 11 นาที และใช้ถ่าน 2 kg ถ้าเป็นการประเมินในหน่วยพลังงานไฟฟ้า จะได้  
 $\frac{50W}{1000W} \times \frac{11}{60} = 9.167 \times 10^{-3}$  kWhr

ถ้าประเมินเป็น 1 kWhr จะได้

ผลิตไฟฟ้า	$9.167 \times 10^{-3}$	kWhr	ใช้ถ่าน	2	kg
ผลิตไฟฟ้า	1	kWhr	ใช้ถ่าน	$\frac{2 \times 1}{9.167 \times 10^{-3}}$	$= 218.174$ kg

ราคาของถ่าน 10 บาท/กก. คิดเป็นราคาถ่านทั้งหมด  $= 218.174 \times 10 = 2,181.74$  บาท

ดังนั้น ต้นทุนพลังงานต่อหน่วยไฟฟ้า  $= 2,181.74$  บาท/kWhr

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไพบูลย์ โกวิทเจริญกุล เกิดวันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2523 ในกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปี พ.ศ. 2544 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญา มหาบัณฑิตที่สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย