

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ



นายธีรวัฒน์ อุทาพงษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

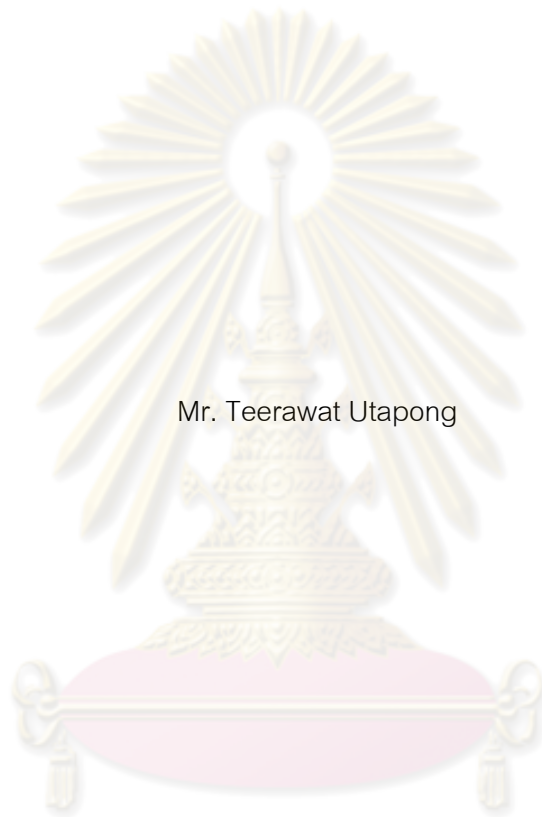
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF THERMOELECTRIC POWER GENERATOR
BASED ON LOW GRADE WASTED HEAT WITH WATERED HEAT EXCHANGER



Mr. Teerawat Utapong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้
ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อน
ด้วยน้ำ

โดย

นายธีรวัฒน์ อุทาพงษ์

สาขาวิชา

นิเวศวิทยาเทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์เดโช ทองอร่าม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆสิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ประสิทธิ์ สิริทิพย์รัศมี)

ธีรวัฒน์ อุทาพงษ์ : การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ.

(DEVELOPMENT OF THERMOELECTRIC POWER GENERATOR BASED ON LOW GRADE WASTED HEAT WITH WATERED HEAT EXCHANGER)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:

อ. เดโช ทองอร่าม, 86 หน้า.

ได้พัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ โดยใช้เซลล์ความร้อนซึ่งอาศัยกระบวนการทำงานย้อนกลับของอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 192 เซลล์ต่ออันดับกันบนแผงโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนทั้ง 2 ด้าน ด้านละ 96 เซลล์ประกบด้วยโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น ผลิตไฟฟ้าด้วยน้ำร้อนกึ่งเดือดและระบายความร้อนด้วยน้ำ โครงสร้างของระบบที่พัฒนาขึ้นมีขนาด 65 x 45 X 12 เซนติเมตร (กว้าง x สูง x หนา) และมีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม ในการทดสอบการทำงานของระบบใช้แหล่งความร้อนจากระบบผลิตน้ำร้อนไหลวนตามธรรมชาติจำลองขึ้นแทนแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง

จากการทดสอบผลิตไฟฟ้าโดยป้อนน้ำร้อนเข้าโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกเป็น 102 และ 98 องศาเซลเซียสตามลำดับ และป้อนน้ำประปาเข้าโมดูลระบายความร้อนด้วยอัตราไหล 18 ลิตร/นาที ที่อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออก 30 และ 38 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่าระบบสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดได้ 335 โวลต์และกระแสไฟฟ้าวงจรปิดได้ 0.75 แอมแปร์ จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 62 วัตต์ ไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถแปลงผันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ พร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยตรงไม่ต้องพึ่งพาแบตเตอรี่ในการกักเก็บพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมซึ่งระบายความร้อนด้วยพัดลมพบว่ามีประสิทธิภาพผลิตไฟฟ้าสูงกว่า 2 เท่า ทำให้ต้นทุนลดลงเป็น 1,289 บาท/วัตต์

ภาควิชา.....นิเวศวิทยาเทคโนโลยี....
สาขาวิชา.....นิเวศวิทยาเทคโนโลยี....
ปีการศึกษา..2553.....

ลายมือชื่อผู้คิด.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

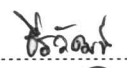
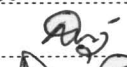
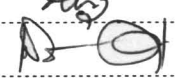
5070305321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : THERMOELECTRIC / LOW GRADE WASTED / HEAT EXCHANGER / THERMOSYPHON / POWER GENERATOR

TEERAWAT UTAPONG: DEVELOPMENT OF THERMOELECTRIC POWER GENERATOR BASED ON LOW GRADE WASTED HEAT WITH WATERED HEAT EXCHANGER. ADVISOR: ASST. PROF.SUVIT PUNNACHAIYA, CO-ADVISOR:DECHO THONG – ARAM, 86 pp.

A water cooled thermoelectric power generator based on low grade wasted heat was developed using the thermoelectric cooler (TEC) device in reverse operation as thermal cell. The 192 thermal cells in series connected were fixed on both sides of the heat exchanger module for hot side of thermal cell, 96 cells each, and sandwiched with the heat exchanger module for cold side of thermal cell. This power generator system was operated with 2 phases hot water heat source and water cooled. The developed system structure was 65cm x 45cm x 12cm in dimensions (WxHxd) and 60 kg in weight. For system operation testing, the reboiling-thermosyphon heat source was simulated as waste heat source.

Electricity generation was tested by fed in a hot water through the heat exchanger module with inlet and outlet temperature of 102 °C and 98 °C, respectively. Also fed in a tap water through the cooling module at flow rate of 18 l/min with inlet and outlet temperature of 30 °C and 38 °C, respectively. It was found that the open circuit voltage of 335 V and the short circuit of 0.75 A were generated with 62 W maximum loaded. The generated output could be directly converted into 220 VAC, 50 Hz without storage battery. In comparison of the previous developed air cooled system, an increasing of 2 times electricity generation efficiency and capital cost reduced to 1,289 Baht/W_e were found.

Department :	Nuclear Technology.....	Student's Signature	
Field of Study :	Nuclear Technology.....	Advisor's Signature	
Academic Year :	2010.....	Co-advisor's Signature	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์กิตติคุณ สุวรรณม์ แสงเพชร ที่ได้ช่วยชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาในทุกๆ ด้าน ให้ผ่านไปด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยีสำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ (NucMAT) ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดทดสอบในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ฝ่ายงานวิศวกรรม กลุ่มปฏิบัติการเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำหรับคำแนะนำและช่วยเหลือในการสร้างชิ้นงานจนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณสมชาย ทองเป้า นิสิตปริญญาเอก ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำเรื่องระบบแลกเปลี่ยนความร้อนและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิ

ขอขอบคุณ คุณบุญนาถ บัวมีศิลป์ ช่างกลภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือกล

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่เสียสละเวลาในการพิจารณาผลการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ทุกคนในครอบครัวอุทาพงษ์ สำหรับประสบการณ์ชีวิต ความรัก ความอบอุ่นและกำลังใจ ตลอดจนการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน

ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

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.....	3
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 ทฤษฎี.....	5
2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	5
2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect).....	5
2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect).....	5
2.2 การนำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้งาน.....	6
2.2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า.....	6
2.2.2 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำความเย็น.....	7
2.3 การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า.....	8
2.3.1 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน.....	8
2.4 ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	13
2.4.1 คุณสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริก.....	13
2.4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก.....	14
2.5 แหล่งกำเนิดความร้อนเหลือทิ้ง.....	14
2.6 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ในโมดูลเซลล์ความร้อน.....	15
2.6.1 รูปแบบของการถ่ายเทความร้อน.....	16

บทที่	หน้า
2.6.2	การแพร่กระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน 17
2.6.3	การถ่ายเทความร้อนของวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน..... 20
2.6.4	ระบบน้ำร้อนไหลเวียน 22
3	การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน 25
3.1	การออกแบบโครงสร้างของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน..... 25
3.1.1	โครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน..... 26
3.1.2	การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน..... 27
3.2	การออกแบบและสร้างแผงเซลล์ความร้อน..... 28
3.2.1	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก..... 28
3.2.2	การหาจำนวนเซลล์ความร้อนในการกำเนิดไฟฟ้า..... 29
3.2.3	การประเมินกำลังไฟฟ้าของโมดูลผลิตไฟฟ้า..... 31
3.3	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน..... 33
3.3.1	การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน 33
3.3.2	การประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน..... 34
3.4	การออกแบบและสร้างระบบแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น..... 35
3.4.1	การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น..... 35
3.4.2	การประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น..... 37
3.5	การออกแบบและสร้างระบบผลิตความร้อนสำหรับทดสอบ..... 38
3.5.1	การออกแบบอุปกรณ์ผลิตความร้อนสำหรับทดสอบ..... 39
3.5.2	การประกอบอุปกรณ์ผลิตความร้อนสำหรับทดสอบ..... 43
3.6	การประกอบและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน 45
3.6.1	การประกอบโมดูลผลิตไฟฟ้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น..... 45
3.6.2	การติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน 47
3.6.3	การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น..... 48
4	การดำเนินงานและผลการวิจัย..... 50
4.1	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า..... 50

บทที่	หน้า
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า.....	50
4.1.2 การทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า.....	51
4.2 การทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน.....	53
4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อน.....	53
4.2.2 การทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังด้านร้อน.....	54
4.3 การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อน.....	56
4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อน.....	56
4.3.2 วิธีการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อน.....	56
4.4 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	59
4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบสมรรถนะของเครื่อง.....	59
4.4.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่อง.....	59
4.5 การประเมินราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน.....	62
4.5.1 การคำนวณประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า.....	62
4.5.2 การคำนวณต้นทุนต่อวัตต์.....	63
4.5.3 การคำนวณราคาไฟฟ้าต่อหน่วย.....	64
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	66
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	81
ภาคผนวก ง.....	82
ภาคผนวก จ.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (Specification) ของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลเตอร์ รุ่น TEC1-12710 สำหรับการผลิตไฟฟ้า.....	29
4.1	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนเมื่อระบายความร้อนด้วยพัดลมและระบายความร้อนด้วยน้ำ.....	53
4.2	ผลการทดสอบพารามิเตอร์ในการผลิตน้ำร้อนของระบบผลิตน้ำร้อน.....	58
4.3	ข้อมูลลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	61
4.4	ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ.....	61
4.5	เปรียบเทียบผลการประเมินราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน.....	64

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	Seebeck effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ	6
2.2	Peltier effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ	6
2.3	แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเนอรรีเรเตอร์	7
2.4	เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเนอรรีเรเตอร์ใช้ความร้อนจากไอโซโทปรังสี	7
2.5	แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์.....	8
2.6	วงจรไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน 1 เซลล์	9
2.7	การจัดวงจรแบบผสมเพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้าในโมดูลเซลล์ความร้อน..	11
2.8	การแพร่กระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	18
2.9	การแพร่กระจายอุณหภูมิของการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน	19
2.10	การแพร่กระจายอุณหภูมิชนิดของไหลสวนทางกัน	20
2.11	การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุ 1 แผ่น	21
2.12	แผนภาพระบบเทอร์โมไซฟอนแบบของไหลหมุนเวียนตีน้ำใหม่	24
3.1	แผนภาพโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน	27
3.2	ลักษณะการจัดเรียงของเซลล์ความร้อน.....	31
3.3	แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน...	34
3.4	โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน.....	35
3.5	แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น....	37
3.6	โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น.....	38
3.7	โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน.....	39
3.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ได้รับความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ของน้ำ.....	41
3.9	ฮีตเตอร์ขนาด 3,000 W ที่ติดตั้งเพิ่มภายในหม้อต้ม.....	43
3.10	การดัดแปลงหม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำร้อน.....	44
3.11	โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้น.....	44
3.12	การจัดเรียงเซลล์ความร้อนต่อแบบอนุกรมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน....	46
3.13	โมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบสมบูรณ์บนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับ ผนังด้านเย็น.....	46

ภาพที่		หน้า
3.14	แผนภาพการติดตั้งระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติแบบเทอร์โมไซฟอน.....	47
3.15	ระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในรูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบขึ้น	48
3.16	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น.....	49
4.1	แผนภาพการจัดระบบทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า.....	51
4.2	การจัดระบบทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า.....	52
4.3	กราฟคุณลักษณะ P-V-I ของโมดูลผลิตไฟฟ้า TEC 1-12710 จำนวน 24 เซลล์..	52
4.4	การจัดระบบการตอบสนองการกระจายอุณหภูมิบนผิวด้านร้อน.....	54
4.5	กราฟแสดงการตอบสนองและการกระจายอุณหภูมิบนผนังด้านร้อน	55
4.6	แผนภาพการจัดระบบเพื่อทดสอบผลิตน้ำร้อน.....	57
4.7	การจัดระบบทดสอบผลิตน้ำร้อน.....	57
4.8	กราฟแสดงอุณหภูมิการผลิตน้ำร้อนไหลเวียนระบบปิด.....	58
4.9	แผนภาพการจัดระบบทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า.....	60
4.10	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	60
4.11	แผนภาพแสดงการประเมินประสิทธิภาพของระบบ.....	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน (Thermoelectric cell) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งของการแปรรูปพลังงานเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ ซึ่งต้องพึ่งพาฤดูกาลที่ไม่แน่นอนและจำเป็นต้องพึ่งแบตเตอรี่เพื่อใช้สะสมพลังงาน สำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนสามารถหาแหล่งพลังงานความร้อนป้อนเข้าระบบได้ต่อเนื่อง [1] ในชีวิตประจำวันจะเห็นว่ามีแหล่งความร้อนที่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ในการนำพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงต้นกำลังไปใช้ จำเป็นต้องมีการระบายความร้อนส่วนที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ออกทิ้งผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อรักษาให้ระบบทำงานได้ต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) จากระบบขึ้น ฉะนั้นในแง่การอนุรักษ์พลังงานและสร้างพลังงานทดแทน การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งด้วยเซลล์ความร้อนเพื่อการคืนกลับพลังงานที่สูญเสียไปจึงเป็นที่สนใจของกลุ่มวิจัยด้านพลังงานทดแทน เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนมีข้อได้เปรียบที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องไม่ต้องพึ่งพาฤดูกาลและสามารถออกแบบระบบควบคุมการป้อนพลังงานความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้สามารถแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยตรงไม่ต้องการแบตเตอรี่สำหรับสะสมพลังงาน นอกจากนี้แหล่งความร้อนยังสามารถเลือกได้หลากหลาย โดยเฉพาะแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำที่มีอุณหภูมิระหว่าง 70-100 °C [2] ได้แก่ ความร้อนจากการระบายความร้อนของสารกัมมันตรังสีความแรงรังสีสูงหรือแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วในระยะเวลาลดความแรงรังสี (Cool Down Period) [3] การระบายความร้อนในกระบวนการทางอุตสาหกรรม การระบายความร้อนแหล่งสันดาปขนาดใหญ่และระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ เป็นต้น ปัจจัยสำคัญของการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน คือ ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบที่สมดุลทั้งการนำความร้อนจากแหล่งความร้อนเข้าในระบบและการระบายความร้อนออกจากเพื่อให้ได้ความแตกต่างอุณหภูมิของผนังเซลล์ความร้อนเต็มพิกัดโดยใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบไปช่วยน้อยที่สุด

ได้มีการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งด้วยเซลล์ความร้อนซึ่งดัดแปลงจากอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Cooler) [4] ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 60 W และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงได้ต่อเนื่อง ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จากการศึกษาพบว่า มีข้อเสนอแนะในปัญหาการระบายความร้อนจากผนัง

ด้านเย็นของเซลล์ความร้อน ทำให้ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เต็มกำลังของเซลล์ความร้อนและยังใช้การระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ จึงทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกช่วยในการระบายอากาศ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องของงานวิจัยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการติดตั้งเซลล์ความร้อนและออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากความร้อนเหลือทิ้งที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อส่งถ่ายความร้อนจากแหล่งความร้อนด้วยน้ำให้ผนังด้านร้อนของเซลล์ความร้อนในระบบปิดและระบายความร้อนให้ผนังด้านเย็นของเซลล์ด้วยน้ำโดยลดการใช้พลังงานจากภายนอกในการช่วยระบายความร้อน [5]

นอกจากนี้ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน ยังสามารถนำน้ำร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ การต้มน้ำด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงอื่น ๆ มาประยุกต์ใช้ในระบบได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 100 วัตต์ พร้อมชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ

2. ประกอบระบบและทดสอบผลการผลิตไฟฟ้าโดยใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งความร้อน

3. เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ใหม่กับงานวิจัยที่พัฒนาไว้เดิม ได้แก่ กำลังการผลิตไฟฟ้า ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ทดลองหาปริมาณและอัตราไหลของน้ำที่พเหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ โดยอ้างอิงข้อมูลกับระบบผลิตที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ

3. ออกแบบและสร้างระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger system) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 100 วัตต์
4. ประกอบระบบและทดสอบผลการผลิตไฟฟ้าโดยใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งความร้อน
5. เปรียบเทียบข้อมูลของระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานเหลือทิ้งด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ จากงานวิจัยเดิม
6. สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้ต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี พ.ศ. 2531 Gary Moore และ Wade Peterson ได้ทำวิจัยเรื่อง Solar PV - Thermoelectric Generator Hybrid System เป็นการนำเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เพื่อผลิตไฟฟ้า เนื่องจากแสงจากดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาไม่สม่ำเสมอและมีช่วงเวลาจำกัด พลังงานจากแสงอาทิตย์จึงไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่อเนื่องเพียงพอ จึงต้องใช้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ขนาด 108 วัตต์ 2 ชุด เข้าช่วยเสริมสมรรถนะในการจ่ายกำลังไฟฟ้า 160 วัตต์ได้ต่อเนื่อง ในช่วงเวลาที่เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสามารถและความแน่นอนของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ โดยมีการนำระบบไปทดสอบใช้งานทางตอนเหนือของประเทศแคนาดา แต่ยังมีปัญหาด้านราคาที่ยังค่อนข้างสูง

2. ปี พ.ศ. 2547 R.Y. Nuwayhid และ R. Hamade ได้ทำวิจัยเรื่อง Design and Testing of a Locally Made Loop-Type Thermosyphonic Heat Sink for Stove-Top Thermoelectric Generators โดยออกแบบระบบระบายความร้อนผนังด้านเย็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเทคนิคเทอร์โมไซฟอน ใช้น้ำเป็นสารระบายความร้อนไหลผ่านท่อความร้อน (Thermosyphonic Heat Pipes :THP) ซึ่งประหยัดกว่าการใช้สารทำความเย็น (R-22) และเป็นระบบไม่ซับซ้อน ผลการทดสอบพบว่าระบบให้สมรรถนะการทำงานสูง ประสิทธิภาพของเครื่องจะขึ้นกับระบบระบายความร้อนด้านเย็น

3. ปี 2553 J. Kevin, M. Drew และ V.Jeremy ได้ทำวิจัยเรื่อง Thermolectric Generator Final Report การผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ มีแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 100 - 500 องศาเซลเซียส แลกเปลี่ยนความร้อนให้กับระบบไหลเวียนธรรมชาติแบบเทอร์โมไซฟอน มีแรงดันในระบบ 1 psi (6.9kPa) เพื่อนำความร้อนดังกล่าวถ่ายเทความร้อนให้กับผนังด้านร้อนของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 95-100 องศาเซลเซียส และระบายความร้อนให้กับผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ด้วยพัดลมเป่าผ่านร่องครีป สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 14.6 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 0.6 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้า 8.76 วัตต์ จ่ายให้กับแบตเตอรี่เพื่อสะสมพลังงาน ก่อนที่จะแปลงผันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 120 โวลต์ 60 เฮิร์ตซ์ กระแสไฟฟ้าสลับมากกว่า 1.5 แอมแปร์

4. ปี พ.ศ. 2553 สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, ไพบุญย์ โกวิทเจริญกุล และเดโช ทองอร่าม ได้ทำการวิจัยเรื่อง Development Of Low Grad Waste Heat Thermolectric Power Generator โดยอาศัยกระบวนการย้อนกลับการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์มาใช้เป็นเซลล์ความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำอุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ระบายความร้อนด้วยพัดลม จากผลทดลองป้อนไอน้ำเข้าระบบพบว่า สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดได้ขนาด 250 โวลต์ และกระแสลัดวงจร 1.2 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสามารถแปลงผันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ได้โดยตรง ไม่ต้องพึ่งการประจุแบตเตอรี่และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดแบบตัวต้านทานได้มากกว่า 50 วัตต์ แต่ยังคงมีความต้องการระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้เซลล์ความร้อนทำงานได้เต็มกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

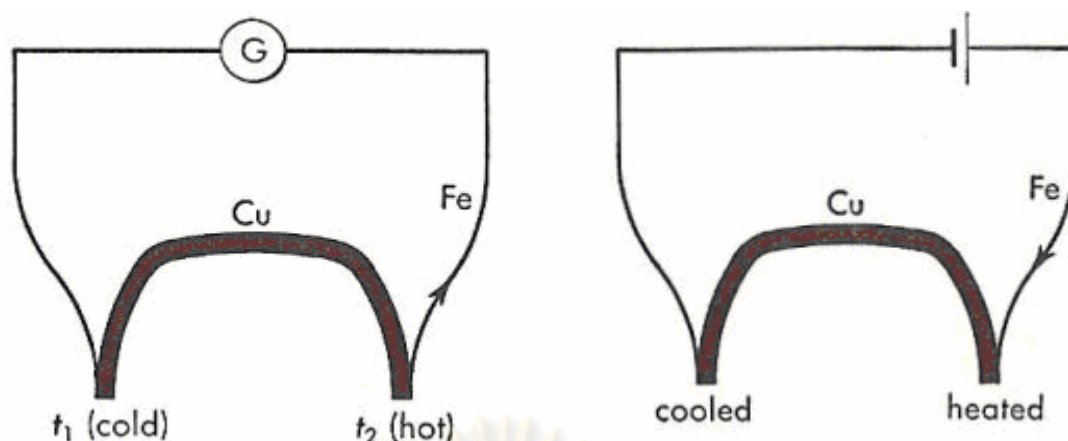
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric device) [6] เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้จากผลต่างของอุณหภูมิตามปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect) และในทางตรงกันข้าม หากป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ก็จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิที่ตัวอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) อาจเรียกอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ (Thermoelectric Cell), เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module) หรือ เซลล์ความร้อน ก็ได้

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

ปี ค.ศ. 1821 Thomas Johann Seebeck ได้พบว่า หากให้อุณหภูมิต่างกันที่รอยต่อของโลหะ 2 ชนิด (T_1 และ T_2) จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายโลหะทั้งสองขึ้น จากผลของความแตกต่างปริมาณประจุ ดังในรูปที่ 2.1 ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิที่รอยต่อโลหะทั้งสอง เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า Seebeck Effect ซึ่งหลักการนี้ถูกนำมาใช้เป็นรอยต่อเทอร์โมคัปเปิลสำหรับงานวัดอุณหภูมิในปัจจุบัน และมีการพัฒนาอุปกรณ์จากปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นเซลล์ความร้อน

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ปี ค.ศ. 1834 Jean Peltier ได้ทำการทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในรอยต่อโลหะ 2 ชนิดที่เชื่อมต่อกัน ดังในรูปที่ 2.2 ผลที่เกิดขึ้น คือ รอยต่อระหว่างโลหะด้านหนึ่งจะร้อนขึ้น ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเย็นลง อันเป็นกระบวนการเชิงอุณหพลศาสตร์ของพาหะประจุที่เคลื่อนที่พร้อมนำความร้อนจากด้านเย็นไปยังด้านร้อนของรอยต่อโอห์มมิก เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า Peltier Effect ซึ่งมีลักษณะเป็นกระบวนการย้อนกลับของปรากฏการณ์ซีเบ็ค



รูปที่ 2.1 Seebeck effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ

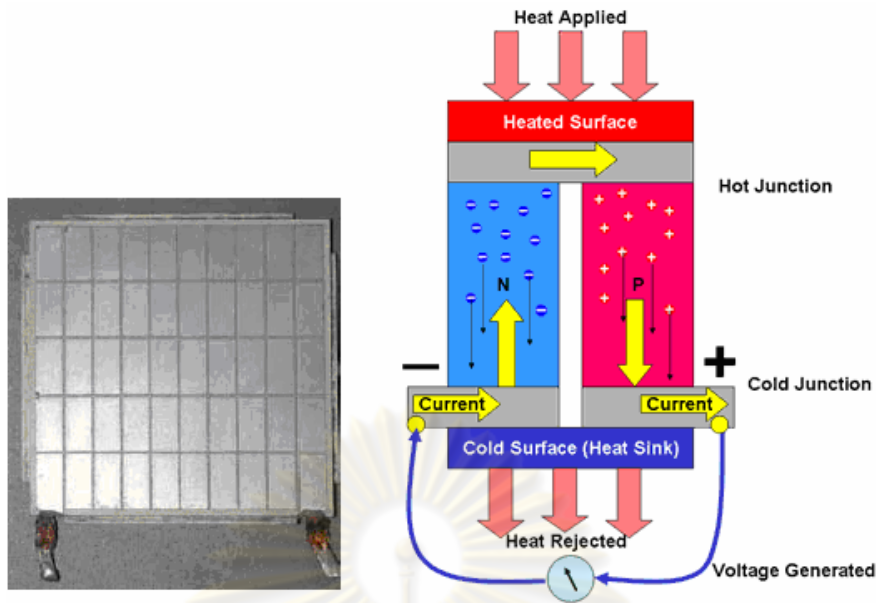
รูปที่ 2.2 Peltier effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ

2.2 การนำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้งาน

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้น ได้มีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำและสร้างรอยต่อโอห์มมิก (Ohmic junction) ขึ้นแทนรอยต่อเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ของโลหะสองชนิด ทำให้ได้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสูงขึ้น ปัจจุบันมีการผลิตในรูปรอยต่อขนาดเล็กหลายรอยต่อบนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อนำไปใช้งานได้ 2 ลักษณะ คือ เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนและเป็นอุปกรณ์ทำความเย็น

2.2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ออกแบบมาเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะ แสดงในรูปที่ 2.3 ก จะให้กำลังไฟฟ้าต่อเซลล์สูงมากกว่า 10 W และทำงานที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 250 – 500 °C เรียกอุปกรณ์นี้ว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator :TEG)” จากพฤติกรรมรอยต่อโอห์มมิกของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อมีความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างรอยต่อด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริเมนต์ ตามปรากฏการณ์ (Seebeck effect) จะมีผลให้กลุ่มอิเล็กตรอนในวัสดุด้านร้อนมีพลังงานจลน์สูงกว่าวัสดุด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า เกิดความต่างปริมาณของประจุไฟฟ้าและกำเนิดไฟฟ้าขึ้นที่ปลายขั้วต่อของอุปกรณ์พร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลด (Load) ได้ ดังแผนภาพในรูปที่ 2.3 ข ในพื้นที่ซึ่งมีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำ การผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจะให้ประสิทธิภาพค่อนข้างสูง โดยสามารถใช้ไอโซโทปรังสีเป็นแหล่งความร้อนและระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยตรง ดังตัวอย่างเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ในรูปที่ 2.4 ที่ใช้ความร้อนจากไอโซโทปรังสี (Radioisotope thermoelectric generator, RTG) [7] มีขนาด 240 W น้ำหนัก 5 kg ใช้ต้นกำเนิดรังสี Sr-90 ความแรงแรังสี 40 kCi



ก.รูปร่างของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ข.โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์
รูปที่ 2.3 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์



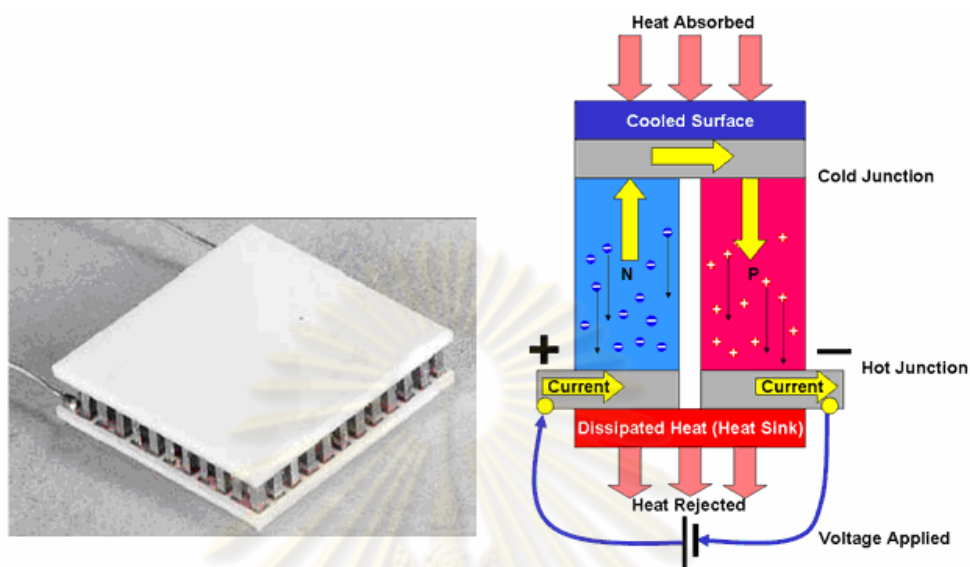
Dimensions of the cylinder	10 by 10 centimetres
Weight	5 kilograms
Capacity	240 watts
Concentration of strontium 90	1,500 TBq, or 40,000 curies
Temperature on the surface, centigrade	300-400 degrees
Exposition dose rate at the distance of 0,02 to 0,5 metres	28-10 Swh

รูปที่ 2.4 เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ใช้ความร้อนจากไอโซโทปรังสี

2.2.2 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำความเย็น

เทอร์โมอิเล็กทริกที่ออกแบบมาเพื่อทำความเย็นโดยเฉพาะ แสดงในรูปที่ 2.5 ก ผนังด้านเย็นสามารถดูดกลืนปริมาณความร้อนได้ตั้งแต่ 10 – 130 W/Cell ขึ้นกับขนาดของอุปกรณ์ ผนังด้านร้อนทนอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เกิน 140 °C มักเรียกอุปกรณ์นี้ว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric Cooler :TEC)” หรือ เพลเทียร์คูลเลอร์ การทำความเย็นสามารถทำได้โดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบริเวณรอยต่อโอห์มมิกของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนความร้อนของกลุ่มอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากรอยต่อผนังด้านเย็น ผ่านเทอร์โม อิเลเมนต์และนำไปปลดปล่อยที่รอยต่อผนังด้านร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ

ส่งผลให้ผนังรอยต่อด้านเย็นมีอุณหภูมิลดต่ำลง อุณหภูมิของความเย็นจะขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและการระบายความร้อนที่รอยต่อผนังด้านร้อนออก ดังรูปที่ 2.5 ข



ก รูปร่างของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

ข โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

รูปที่ 2.5 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

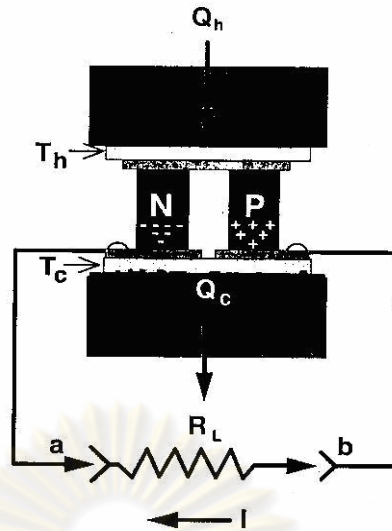
2.3 การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

จากที่กล่าวข้างต้นแล้วว่าอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ถูกออกแบบมาเพื่อการทำความเย็น แต่ในทางปฏิบัติสามารถที่จะนำเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยอาศัยกระบวนการย้อนกลับการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ซึ่งจะเหมาะกับแหล่งความร้อนประเภทเกรดต่ำ (Low grade waste heat) เนื่องจากข้อจำกัดด้านการทนอุณหภูมิของเซลล์

2.3.1 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน

ในกระบวนการย้อนกลับสามารถใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ ก่อให้เกิดบริเวณต่างปริมาณประจุไฟฟ้าและเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

การวิเคราะห์ปริมาณไฟฟ้าเพื่อออกแบบโมดูลผลิตไฟฟ้าสามารถประยุกต์สมการของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ [8] ตามวงจรรูปที่ 2.6 ดังนี้



รูปที่ 2.6 วงจรไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน 1 เซลล์ เมื่อ $T_h > T_c$

ในสภาวะที่ไม่มีการใส่โหลด (Load) เป็นวงจรเปิด ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ระหว่าง a และ b

จะได้
$$V = S \times \Delta T \quad \dots\dots\dots 2.1$$

- เมื่อ V เป็น ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจากเซลล์ความร้อน (V)
- S เป็น ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (V/K)
- ΔT เป็น ค่าผลต่างอุณหภูมิของเซลล์ความร้อน (K) ซึ่ง $\Delta T = T_h - T_c$

เมื่อมีการใส่โหลดให้กับเซลล์ความร้อน ค่าความต่างศักย์จะเป็นไปตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยเกิดภาวะการแบ่งแรงดันไฟฟ้าระหว่างความต้านทานภายในและโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่า

$$I = \frac{S \times \Delta T}{R_c + R_L} \quad \dots\dots\dots 2.2$$

- เมื่อ I เป็น ค่ากระแสที่เกิดขึ้น (A)
- R_c เป็น ค่าเฉลี่ยความต้านทานภายในของเซลล์ความร้อน (Ω)
- R_L เป็น ค่าความต้านทานโหลด (Ω)

เซลล์ความร้อนจะจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อค่าความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายในของเซลล์ความร้อน โดยแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

ความร้อนทั้งหมดที่ต้องให้กับเซลล์ความร้อน จะหาได้จาก

$$Q_h = (S \times T_h \times I) - (0.5 \times I^2 \times R_C) + (K_C \times \Delta T) \quad \dots\dots\dots 2.3$$

- เมื่อ Q_h เป็น ค่าความร้อนที่รับเข้ามา (W)
 K_C เป็น ค่าการนำความร้อนของเซลล์ความร้อน (W/K)
 T_h เป็น อุณหภูมิด้านร้อนของเซลล์ความร้อน (K)

ขณะที่ประสิทธิภาพของเซลล์ความร้อน (E_g) หาได้จาก

$$E_g = \frac{V \times I}{Q_h} \times 100\% \quad \dots\dots\dots 2.4$$

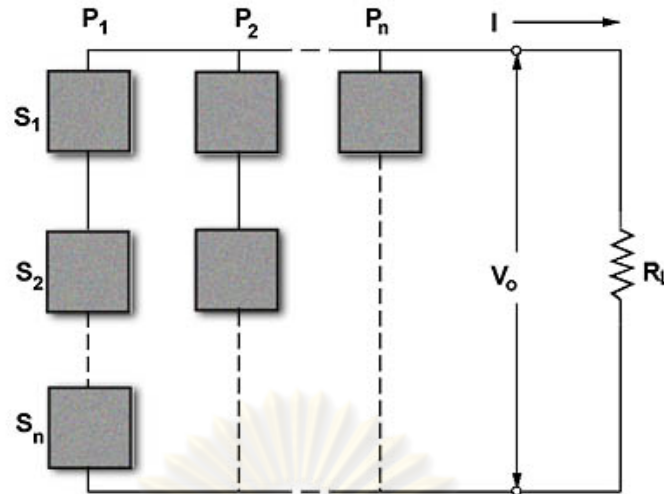
สำหรับโมดูลเซลล์ความร้อนที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง จะต้องใช้เซลล์ความร้อนมากกว่า 1 เซลล์ ต่ออันดับเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการและต่อขนานกันในการเพิ่มกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สมการของแรงดันไฟฟ้า จะได้

$$V_o = S_M \times \Delta T = I \times (R_M + R_L) \quad \dots\dots\dots 2.5$$

- เมื่อ V_o เป็น ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น (V)
 S_M เป็น ค่าเฉลี่ยโมดูลสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (V/K)
 R_M เป็น ค่าเฉลี่ยโมดูลความต้านทาน (Ω)

กำลัง (P_o) ที่ได้จากโมดูลเซลล์ความร้อน

$$P_o = R_L \times \left[\frac{S_M \times \Delta T}{R_M + R_L} \right]^2 \quad \dots\dots\dots 2.6$$



รูปที่ 2.7 การจัดวงจรแบบผสมเพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้าในโมดูลเซลล์ความร้อน

ในการคำนวณหาจำนวนเซลล์ความร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน เริ่มจากการพิจารณา กำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และการจัดเรียงเซลล์ความร้อนทั้งอันดับและขนานกัน โดยจำนวนเซลล์ความร้อนหาได้จาก

$$N_T = N_S \times N_P \quad \dots\dots\dots 2.7$$

โดยที่ N_T เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนทั้งหมด

N_S เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนต่ออันดับกัน

N_P เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนต่อขนานกัน

จากวงจรรูปที่ 2.7 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดชนิดตัวต้านทาน จะมีค่าดังนี้

$$I = \frac{N_S \times S_M \times \Delta T}{\left(\frac{N_S \times R_M}{N_P} \right) + R_L} \quad \dots\dots\dots 2.8$$

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากชุดเซลล์ความร้อน ตามกฎของโอห์มจะมีค่าเป็น

$$V_o = \left[\frac{N_s \times S_M \times \Delta T}{\left(\frac{N_s \times R_M}{N_p} \right) + R_L} \right] \times R_L \quad \dots\dots\dots 2.9$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากโมดูลเซลล์ความร้อน จึงหาได้จาก

$$P_o = V_o \times I = \frac{N_T \times (S_M \times \Delta T)^2}{4 \times R_M} \quad \dots\dots\dots 2.10$$

ปริมาณความร้อนที่ชุดเซลล์ความร้อนทั้งหมดต้องการใช้ในการกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีค่า

$$Q_h = N_T \times \left[\frac{S_M \times T_h \times I}{N_p} - 0.5 \times R_M \times \left(\frac{I}{N_p} \right)^2 + K_M \times \Delta T \right] \quad \dots\dots\dots 2.11$$

และประสิทธิภาพของชุดเซลล์ความร้อนจะคำนวณได้จาก

$$E_g = \frac{P_o}{Q_h} \times 100\% \quad \dots\dots\dots 2.12$$

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

$$R_{GEN} = \frac{N_s \times R_M}{N_p} \quad \dots\dots\dots 2.13$$

ค่า S_M , R_M และความนำความร้อน (K_M) ในบางกรณีอาจกำหนดจากคุณสมบัติเฉลี่ยของผนังด้านร้อนและด้านเย็นของชุดเซลล์ความร้อน

$$T_{avg} = \frac{T_h + T_c}{2} \quad \dots\dots\dots 2.14$$

2.4 ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน จากสมการที่ 2.12 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และความร้อนที่จ่ายให้ระบบ การที่จะผลิตไฟฟ้าได้ประสิทธิภาพสูงนั้นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกต้องประกอบด้วยเทอร์โมอิลเมนต์ (Thermo-element) ที่มีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี

2.4.1 คุณสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิลเมนต์

วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิลเมนต์ในเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตไฟฟ้าจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

- 1) มีสภาพนำไฟฟ้าสูงแต่เกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า)
- 2) มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุ
- 3) สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้มากที่สุด

คุณสมบัติทั้ง 3 ประการ มีความสัมพันธ์กันทางฟิสิกส์ สำหรับใช้บ่งชี้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ (Z) ตามสมการที่ 2.15 [4] ดังนี้

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \dots\dots\dots 2.15$$

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

σ คือ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (Ampere/Volt·meter)

และ λ คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ (Watt/meter·Kelvin)

เนื่องจาก Z มีหน่วยต่ออุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติเพื่อให้ค่าบ่งชี้เปรียบเทียบกันได้ง่ายควร จะไม่มีหน่วย ค่า Z จึงคูณด้วย T โดยที่ T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขณะทำงาน และค่า ZT จะเรียกว่าค่า figure-of-merit ซึ่งเป็นการใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด หรือการทำความเย็นสูงสุดของวัสดุที่ใช้ผลิตเทอร์โมอิลเมนต์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหลักของอุปกรณ์เทอร์

โมอิลึกทริก วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิลิเมนต์ที่ดีจะต้องนำไฟฟ้าดีและเป็นฉนวนความร้อนที่ดีในเวลาเดียวกัน

2.4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิลึกทริก

ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์เทอร์โมอิลึกทริกประเภทเซลล์ความร้อนในการผลิตไฟฟ้าขณะที่มีผลต่างอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์เทอร์โมอิลึกทริก (η_{\max}) เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการ 2.16

$$\eta_{\max} = \left[\frac{T_h - T_c}{T_h} \right] \cdot \left[\frac{\left(1 + Z^* \bar{T} \right)^{0.5} - 1}{\left(1 + Z^* \bar{T} \right)^{0.5} + 1} \right] \dots\dots\dots 2.16$$

Z^* คือ ค่า Z ของคู่อิเล็กทริก P type – N type ที่ดีที่สุด (V/K)

T_h และ T_c คือ อุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (K)

\bar{T} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็น (K)

จากสมการจะเห็นว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าทำได้โดยเลือกคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิลึกทริกที่มีค่า ZT มากกว่า 1 ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มากกว่า 5 % [4] แต่ค่อนข้างหายาก เนื่องจากสิ่งที่กล่าวถึงเป็นข้อจำกัดของเซลล์ความร้อนที่ผลิตมาในเชิงพาณิชย์ จึงไม่สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิลึกทริกได้ ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจึงปรับแก้ได้ที่แตกต่างกันโดยอุณหภูมิขณะทำงาน โดยการจ่ายความร้อนที่ผนังด้านร้อนและระบายความร้อนออกจากผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิลึกทริกให้มีความแตกต่างอุณหภูมิได้มากที่สุด

2.5 แหล่งกำเนิดความร้อนเหลือทิ้ง

ความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat) เป็นความร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อนเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของจักรกลหรือแหล่งผลิตความร้อนหลักขนาดใหญ่ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมออกที่สู่สิ่งแวดล้อม เช่น การเผาไหม้ การผลิตไอน้ำ การหลอมวัสดุและการแปรรูป

วัสดุ เป็นต้น ความร้อนที่ระบายออกจากระบบนี้หากไม่นำมาใช้ประโยชน์จะมีสภาพเป็นความร้อนเหลือทิ้งและบางระบบยังจำเป็นต้องลดอุณหภูมิด้วยการใช้ระบบหล่อเย็นช่วยลดพลังงาน

เมื่อพิจารณาในเชิงการใช้ประโยชน์ พลังงานเหลือทิ้งส่วนนี้จะมีสภาพเป็นแหล่งความร้อนที่ให้ปริมาณความร้อนต่อเนื้อที่ที่ระบบทำงานอยู่ ความร้อนเหลือทิ้งโดยทั่วไปจะแบ่งตามเกรดเป็น 3 ช่วง คือ ความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูงมีอุณหภูมิระหว่าง $600 - 1600^{\circ}\text{C}$ ความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลางมีอุณหภูมิระหว่าง $200 - 500^{\circ}\text{C}$ และความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำอุณหภูมิระหว่าง $60 - 150^{\circ}\text{C}$ แหล่งความร้อนเหลือทิ้งที่น่าสนใจ ได้แก่ ความร้อนเหลือทิ้งจากระบบระบายความร้อน และความร้อนจากพลังงานทดแทนตามธรรมชาติ ดังนี้

1. แหล่งความร้อนจากการระบายความร้อน ได้แก่ การระบายความร้อนจากระบบหล่อเย็นสารกัมมันตรังสีความแรงรังสีสูงหรือแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วในระยะเวลาลดความแรงรังสี (Cool down period) การระบายความร้อนในกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการระบายความร้อนจากแหล่งสันดาปขนาดใหญ่

2. แหล่งความร้อนจากพลังงานทดแทน ได้แก่ ความร้อนจากน้ำร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ การต้มน้ำด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงอื่น ๆ ในการแปรรูปผลผลิตการเกษตร

การคืนกลับความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat recovery) โดยการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกแทนการทิ้งเปล่า ช่วยประหยัดการใช้ไฟฟ้าจากระบบหลักและช่วยลดขนาดระบบระบายความร้อน อย่างไรก็ตามการพัฒนาแหล่งความร้อนเหลือทิ้งให้มีระดับอุณหภูมิเหมาะกับการใช้งานต้องการอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน และกระบวนการควบคุมการไหลเวียนของของไหลพาความร้อนเข้าและออกจากระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อการถ่ายโอนความร้อนที่ผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของโมดูลเซลล์ความร้อนซึ่งสามารถจัดการได้ทั้งระบบปิดสนิทและระบบเปิดที่มีอ่างสำรองน้ำ

2.6 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ในโมดูลเซลล์ความร้อน

ในศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน (Thermal energy) ระบบการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ การออกแบบระบบถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งจะต้องคำนึงถึงในลำดับแรกและรวมไปถึงต้นทุนของวัสดุที่ทำมาออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน นั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังด้านร้อนและออกจากผนังด้านเย็นของเซลล์เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้กับผนังเซลล์ด้านร้อนและการระบาย

ความร้อนนอกจากผนังเซลล์ด้านเย็นที่ดี จะทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิมากขึ้นเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การประยุกต์ใช้กระบวนการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติ (Natural flow) ในส่วนของการถ่ายเทความร้อนภายในระบบเพื่อช่วยในการลดใช้พลังงานภายนอกมาบังคับจะต้องพิจารณาควบคู่กัน กระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างของไหลใช้งาน (Working Fluid) 2 ส่วน โดยมีตัวกลางหรือวัสดุระหว่างพื้นที่บริเวณผนังเซลล์ความร้อนที่มีการสัมผัสซึ่งกันและกัน จากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เป็นการถ่ายเทความร้อนจากผลต่างของอุณหภูมิที่เรียกว่า "แรงขับเคลื่อน" (Driving Force) ด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ในทางปฏิบัติแล้วส่วนใหญ่จะอาศัยการนำความร้อนและพาความร้อนเป็นหลัก ส่วนการแผ่รังสีความร้อนจะเกิดบริเวณผนังด้านนอกโมดูลในการถ่ายเทความร้อน ผู้บรรยายท่านนั้น กระบวนการถ่ายเทความร้อนในตัวกลางดังกล่าวจะมีแรงพยายามต้านทานการถ่ายเทความร้อนเสมอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการถ่ายเทความร้อนแต่ละรูปแบบด้วย อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถสรุปเป็นสมการได้ 2.17 ดังนี้

$$\text{อัตราการถ่ายเทความร้อน} = \text{แรงขับเคลื่อน} / \text{ความต้านทาน} \dots\dots\dots 2.17$$

2.6.1 รูปแบบของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิสามารถแบ่งตามลักษณะการส่งถ่ายความร้อนผ่านตัวกลางต่างๆ ได้ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ดังนี้ [9]

ก. การนำความร้อน (Heat Conduction) คือ การถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคบริเวณผิวสัมผัสที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยตัวกลางมีสถานะเป็นของแข็งอยู่กับที่เป็นตัวนำความร้อน ส่วนมากตัวกลางจะเป็นวัสดุจำพวกโลหะ การถ่ายเทความร้อนรูปแบบนี้จะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบถ่ายเทความร้อนสู่ผนังด้านร้อนและการระบายความร้อนจากผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ปริมาณการถ่ายเทความร้อนตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ "Fourier's law of conduction" เป็นไปตามสมการ 2.18 ดังนี้

$$q = -kA \frac{\Delta t}{\Delta x} \dots\dots\dots 2.18$$

เมื่อ q = ปริมาณการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งหน่วยมวล
 k = ค่าสภาพการนำความร้อน
 A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิ

Δx = ระยะห่างระหว่างสองบริเวณที่อุณหภูมิต่างกัน

ข. การพาความร้อน (Heat Convection) คือ การถ่ายเทความร้อนที่มีวัสดุตัวกลางเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการพาความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า วัสดุตัวกลางจะมีสถานะเป็นของเหลว หรือก๊าซ อาจเรียกวัดวัสดุตัวกลางนี้ว่า "ของไหลใช้งาน" (Working fluid) แบ่งลักษณะการพาความร้อนเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อม ๆ กับทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนบริเวณพื้นที่สัมผัส โดยต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการเคลื่อนที่ เช่น ระบบสูบของไหล (Pump) และการขับอากาศจากพัดลม เป็นต้น ในระบบนี้ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอกช่วยมาเสริม

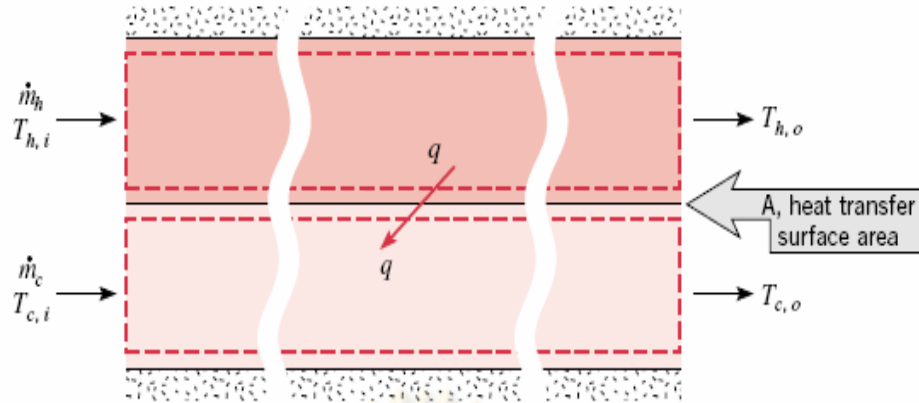
การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นของตัวกลาง อันเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลใช้งาน ก่อให้เกิดการขยายตัวและความดันในระบบ การไหลเวียนของไหลในการพาความร้อนเกิดจากแรงอัดร่วมกับแรงโน้มถ่วงตามกระบวนการไซฟอน (Syphon) โดยไม่ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอกช่วยเสริม การพาความร้อนแบบธรรมชาตินี้จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบผลิตความร้อนในลูปปิด (Closed loop) แบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) [5]

ค. การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) คือ การถ่ายเทความร้อนโดยไม่มีวัสดุตัวกลางมาช่วยในการถ่ายเทความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบคลื่นความร้อนไปกระทบกับวัตถุนั้นๆ

2.6.2 การแพร่กระจายอุณหภูมิตามพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อการไหลของของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีทิศทางต่างกัน จะทำให้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีการแพร่กระจายอุณหภูมิต่างกันออกไป การแพร่กระจายอุณหภูมิตามพื้นผิวนี้จะนำไปพิจารณาในการกำหนดทิศทางการไหลของน้ำร้อนภายในโมดูลถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Module) และการระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Heat Exchanger) ให้มีการถ่ายเทความร้อนและรักษาผลต่างอุณหภูมิตามพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.8 การแพร่กระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 2.8 การหาค่าปริมาณความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_h = m_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad \dots\dots\dots 2.19$$

$$Q_c = m_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad \dots\dots\dots 2.20$$

- เมื่อ Q_h คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อน (W)
- Q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำเย็น (W)
- m_h คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อน (kg/s)
- m_c คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น (kg/s)
- $C_{p,h}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำร้อน (J/kg.K)
- $C_{p,c}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเย็น (J/kg.K)
- $T_{h,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า (K)
- $T_{h,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก (K)
- $T_{c,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า (K)
- $T_{c,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก (K)

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

$$Q_{ave} = \frac{1}{2} (Q_h + Q_c) \quad \dots\dots\dots 2.21$$

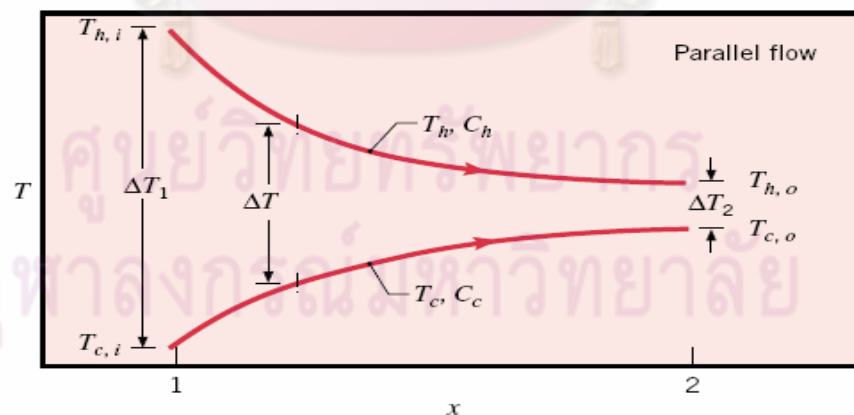
$$Q_{ave} = (UA)\Delta T_{LMTD}$$

- เมื่อ Q_{ave} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (W)
 U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)
 A คือ บริเวณพื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
 ΔT_{LMTD} คือ ค่าความต่างของอุณหภูมิเชิงล็อกเฉลี่ย (K)

โดยค่าความต่างของอุณหภูมิเชิงล็อกเฉลี่ย (Log Mean Temperature Difference: ΔT_{LMTD}) จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบของการไหล 2 แบบเท่านั้น คือ กรณีของไหลเคลื่อนที่ขนานไปในทิศทางเดียวกัน (Parallel Flow) และกรณีของไหลสวนทางกัน (Counter Flow) ซึ่งมีการแพร่กระจายความร้อนสู่จุดสมดุลอุณหภูมิที่เป็นรูปแบบเฉพาะ ดังแสดงเส้นกราฟจากการคำนวณในรูปที่ 2.9 และ 2.10

- เมื่อ $T_{h,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า (K)
 $T_{c,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า (K)
 $T_{h,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก (K)
 $T_{c,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก (K)
 ΔT_1 คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้า (K)
 ΔT_2 คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาออก (K)

กรณีของไหลเคลื่อนที่ขนานไปในทิศทางเดียวกัน (Parallel Flow)

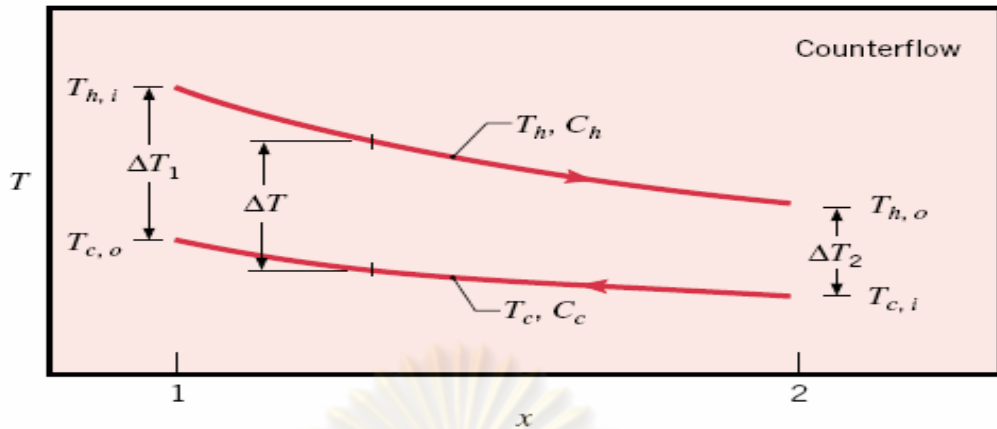


รูปที่ 2.9 การแพร่กระจายอุณหภูมิของการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o}$$

กรณีของไหลสวนทางกัน (Counter Flow)



รูปที่ 2.10 การแพร่กระจายอุณหภูมิชนิดของไหลสวนทางกัน

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$

จะได้ค่าผลต่างอุณหภูมิเชิงล็อกเฉลี่ยดังสมการที่ 2.10

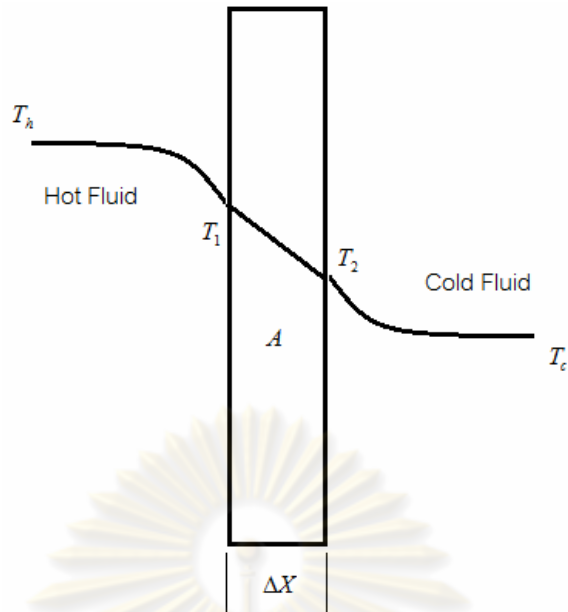
$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \Delta T_2 / \Delta T_1} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \Delta T_1 / \Delta T_2} \dots\dots\dots 2.22$$

หากการไหลในรูปแบบที่ไม่ได้อยู่ในกรณีของไหลเคลื่อนที่ขนานไปในทิศทางเดียวกัน (Parallel Flow) หรือ กรณีของไหลสวนทางกัน (Counter Flow) เช่น การไหลแบบผสม (Cross Flow) จะต้องมีค่าของแฟกเตอร์ F เข้ามาช่วยในการ แก้ปัญหา ซึ่งจะมีความยุ่งยากมากขึ้น

$$Q = UAF\Delta T_{LMTD} \dots\dots\dots 2.23$$

2.6.3 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) จาก 3 แห่ง ได้แก่ ความต้านทานความร้อนของการไหลด้านน้ำร้อน ความต้านทานความร้อนผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน และความต้านทานความร้อนของการไหลด้านน้ำเย็น



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุ 1 แผ่น

ในสภาวะคงตัวการไหลของความร้อนจะถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน และวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเย็นระบายความร้อนตามลำดับ

จะได้สมการที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{h-1} = h_h A(T_h - T_1) \dots\dots\dots 2.24$$

$$Q_{1-2} = \frac{K_w A}{\Delta X} (T_1 - T_2) \dots\dots\dots 2.25$$

$$Q_{2-c} = h_c (T_2 - T_c) \dots\dots\dots 2.26$$

นำสมการที่ 2.24, 2.25, 2.26 มารวมกันแล้วทำการจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$Q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h A} + \frac{\Delta X}{K_w A} + \frac{1}{h_c A}} \dots\dots\dots 2.27$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

T_h คือ อุณหภูมิของน้ำร้อน (K)

- T_c คือ อุณหภูมิของน้ำเย็น (K)
 T_1 คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (K)
 T_2 คือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (K)
 h_h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อน (W/m^2K)
 h_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำเย็น (W/m^2K)
 K_w คือ ค่าความนำความร้อนของวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน (W/mK)
 A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
 ΔX คือ ความหนาของวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน (m)

จากสมการที่ 2.27 จะเป็นเพียงการวิเคราะห์อย่างง่าย แต่หากพิจารณาให้ถี่ถ้วนแล้วจะพบว่า การแพร่กระจายของอุณหภูมิของผิวแลกเปลี่ยนความร้อนไม่เท่ากันทั่วทุกบริเวณ เป็นไปตามเส้นกราฟดังรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10 ส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิแต่ละบริเวณไม่เท่ากันไปด้วย ฉะนั้นจะต้องใช้วิธีวิเคราะห์แบบผลต่างเชิงล็อก (Log Mean Temperature Difference: ΔT_{LMTD}) เข้ามาช่วย จะได้สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมใหม่ดังนี้

$$Q = UAF \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h A} + \frac{\Delta X}{K_w A} + \frac{1}{h_c A}} \quad \dots\dots\dots 2.28$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{\Delta X}{K_w} + \frac{1}{h_c}} \quad \text{หรือ} \quad U = \frac{1}{R_h + R_w + R_c} \quad \dots\dots\dots 2.29$$

เมื่อ $R_h = \frac{1}{h_h}$ คือ ความต้านทานการไหลความร้อนด้านน้ำร้อน (m^2K/W)

$R_w = \frac{\Delta X}{K_w}$ คือ ความต้านทานของวัสดุแลกเปลี่ยนร้อน (m^2K/W)

$R_c = \frac{1}{h_c}$ คือ ความต้านทานการไหลด้านน้ำเย็น (m^2K/W)

2.6.4 ระบบน้ำร้อนไหลเวียน

การไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในลูปปิด (Closed loop natural flow) จากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลใช้งานในระบบพาความร้อน เรียกว่า เทอร์โมไซฟอน

(Thermosyphon) การไหลเวียนเกิดจากการที่ของไหลบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเปลี่ยนความหนาแน่นเกิดการขยายตัวและเกิดความดันในระบบปิด ดันของไหลพร้อมพาความร้อนเคลื่อนตัวสู่บริเวณอุณหภูมิต่ำกว่าด้วยการเสริมของแรงโน้มถ่วงเป็นวงรอบโดยไม่ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอกช่วยเสริม ระบบผลิตน้ำร้อนไหลเวียนตามธรรมชาติในลูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนมีข้อดีดังนี้

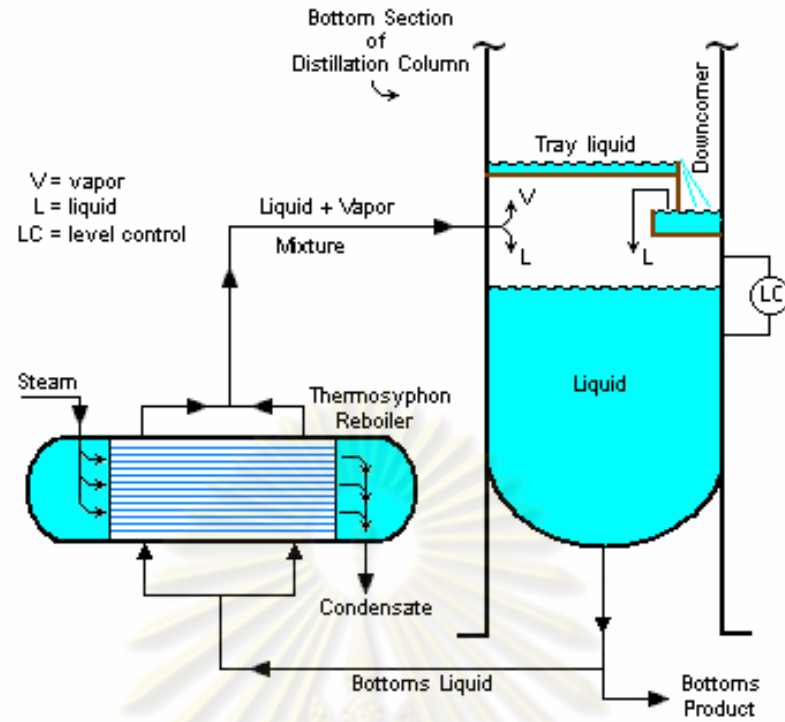
- 1) เป็นระบบทำงานแบบ Passive โดยไม่มีอุปกรณ์ต้นกำลังมาขับเคลื่อนการไหลเวียนของน้ำ เช่น ปั๊มน้ำ
- 2) สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี แม้มีความต่างอุณหภูมิต่างกันระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นเพียงเล็กน้อย
- 3) น้ำไหลเวียนในลูปปิดสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ได้ตลอด (Re-boiling)
- 4) ต้นทุนถูกกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบ Active ที่ต้องมีอุปกรณ์มาขับเคลื่อนการไหลเวียนของน้ำ

ในกระบวนการไหลเวียนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบทั้งสองด้าน คือ การเพิ่มอุณหภูมิและการเย็นตัว เป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อน สามารถพิจารณาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's cooling law)

$$Q = hA\Delta T \quad \dots\dots\dots 2.30$$

- เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา (W)
 h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2K)
 A คือ พื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
 ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ ($^{\circ}C$ หรือ K)

ระบบต้มน้ำหรือแลกเปลี่ยนความร้อนจากไอน้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนไหลเวียนถ่ายความร้อนให้ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและหมุนเวียนกลับมาต้มน้ำใหม่อย่างต่อเนื่องในลูปปิด เรียกว่าระบบเทอร์โมไซฟอนรีบอยเลอร์ (Thermosyphon reboiler) ดังแสดงในแผนรูปที่ 2.12 โดยน้ำต้มเดือดในระบบจะอยู่ในสภาพน้ำร้อนและไอน้ำผสมกัน มีอุณหภูมิสูงและมีแรงส่งในการพาความร้อนของของไหลสูง การหมุนเวียนถ่ายเทความร้อนในลูปปิดมีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามวิธีการไหลเวียนและแรงดันไอน้ำของเทอร์โมไซฟอนสามารถคำนวณได้จากวิธีของแฟร์ (Methods of Fair) [10]



รูปที่ 2.12 แผนภาพระบบเทอร์มิโมไซฟอนแบบของไหลหมุนเวียนต้มซ้ำใหม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W โดยอาศัยกระบวนการทำงานย้อนกลับของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์ (TEC) เพื่อผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอร์มาใช้เป็นเซลล์ความร้อน เป็นงานวิจัยต่อเนื่องในโครงการ “ศึกษาวิเคราะห์ศักยภาพทางเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนเหลือทิ้ง” [4] เพื่อขยายกำลังผลิตไฟฟ้าจากเดิม 50 W เป็น 100 W เพิ่มประสิทธิภาพการกำลังผลิตด้วยการเพิ่มผลต่างอุณหภูมิของเซลล์ความร้อนให้มากขึ้น ลดจำนวนเซลล์ความร้อนให้น้อยลงอันเป็นผลในเรื่องของต้นทุนที่ถูกลง รวมถึงการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดน้ำร้อนระบบปิดที่จะใช้ทดสอบ โดยในงานวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

- ก. การออกแบบโครงสร้างของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน
- ข. การออกแบบและสร้างแผงเซลล์ความร้อน
- ค. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน
- ง. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น
- จ. การออกแบบและสร้างระบบกำเนิดความร้อนสำหรับการทดสอบ
- ฉ. การประกอบและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน

3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4] พบว่าสามารถพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W ประกอบด้วยโมดูลความร้อน 4 โมดูล แต่ละโมดูลใช้เซลล์ความร้อนดัดแปลง 96 เซลล์ รวมใช้เซลล์ความร้อนทั้งสิ้น 384 เซลล์ โครงสร้างของโมดูลผลิตไฟฟ้าออกแบบเพื่อใช้ไอน้ำเป็นแหล่งความร้อนและระบายความร้อนด้วยพัดลม ใช้พื้นที่การติดตั้ง $3 \times 2 = 6$ ตารางเมตร ผลการพัฒนาระบบพบว่าต้องการพื้นที่มาก ใช้ปริมาณความร้อนสูงในการผลิตไอน้ำที่มีแรงดันค่อนข้างสูงและมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนต่ำ จึงได้นำปัญหาที่เป็นอุปสรรคดังกล่าวมาวิเคราะห์และพัฒนาโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนแบบใหม่

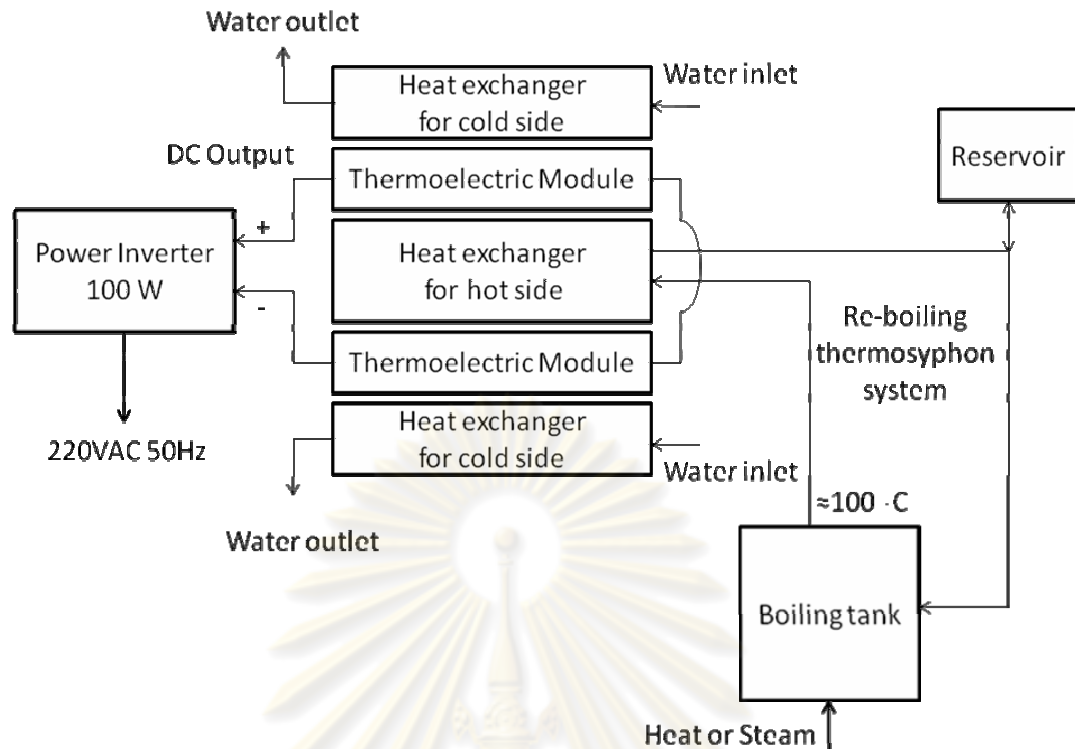
3.1.1 โครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและการทดลองในข้อ 4.1 เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อน ทำให้สามารถกำหนดโครงสร้างของระบบในประเด็นต่อไปนี้

- การลดการใช้ปริมาณความร้อนในระบบผลิตความร้อน โดยปรับเปลี่ยนมาใช้ น้ำร้อนไหลเวียนในระบบปิดเป็นแหล่งความร้อน แทนการใช้ไอน้ำ
- การระบายความร้อนปรับเปลี่ยนมาใช้ น้ำระบายความร้อนแทนพัดลม ทำให้มีประสิทธิภาพในการสร้างผลต่างอุณหภูมิสูงกว่า
- การผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนที่ให้ประสิทธิภาพในสูงกว่า ทำให้สามารถลดจำนวนเซลล์ความร้อนลง มีผลให้ใช้พื้นที่โมดูลเซลล์ความร้อนลดลง

ข้อมูลข้างต้นสามารถออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 100 W ได้ดังแผนภาพของระบบในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยระบบหลัก 5 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่

- 1) โมดูลผลิตไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Module) ประกอบด้วย ชุดแผงเซลล์ความร้อน (Thermoelectric cell) จำนวน 192 เซลล์ ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 100 W
- 2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน (Heat exchanger for hot side) ประกอบด้วย โมดูลถ่ายเทความร้อนจากระบบน้ำร้อนหมุนเวียนให้แก่ชุดแผงเซลล์ความร้อน
- 3) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น (Heat exchanger for cold side) ประกอบด้วย โมดูลถ่ายเทความร้อนจากชุดแผงเซลล์ความร้อน 2 ชุด เพื่อการระบายความร้อนจากผนังด้านเย็นด้วยน้ำในระบบเปิด
- 4) ระบบผลิตน้ำร้อนไหลเวียนตามธรรมชาติ (Re-boiling thermosyphon system) ระบบปิดประกอบด้วย ถังต้มน้ำ ท่อไหลเวียนของน้ำร้อนผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อน และอ่างสำรองน้ำ (Reservoir)
- 5) ระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Power Inverter) ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W, 220 VAC, 50 Hz



รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

3.1.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านระบบน้ำไหลเวียน ตามแผนภาพของระบบในรูปแบบที่ 3.1 มีขั้นตอนดังนี้

1) เมื่อถึงต้มน้ำร้อน (Boiling tank) ของระบบผลิตน้ำร้อนได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ (Low Grade Waste Heat) จะผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไหลเวียนด้วยหลักการเทอร์โมไซฟอนกลับเข้าต้มใหม่ อันเนื่องมาจากแรงลอยตัวของน้ำร้อนขาเข้า และแรงโน้มถ่วงของน้ำขาออกเป็นตัวผลักดัน ผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน น้ำส่วนที่ขยายตัวจะถูกส่งไปที่อ่างสำรองน้ำ

2) ความร้อนจากน้ำร้อนไหลเวียนบริเวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีสภาวะกึ่งน้ำกึ่งไอน้ำ ถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองด้านให้กับแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก ความหนาของผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะช่วยสะสมความร้อนและยืดเวลาการลดลงของอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิผนังด้านร้อนไม่เปลี่ยนแปลงมาก

3) น้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น จะทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากผนังด้านเย็นของโมดูลเซลล์ความร้อน เพื่อรักษาผลต่างของอุณหภูมิ

ระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของโมดูลผลิตไฟฟ้าให้แตกต่างกันมากที่สุด เมื่อระบบถูกระบายความร้อนจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวทริโนจากผนังด้านร้อนภายในเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกถ่ายเทสู่อุณหภูมิด้านต่ำ

4) ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผนังแผงโมดูลผลิตไฟฟ้า $\Delta T = T_h - T_c$ ทั้ง 2 แผงจะกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงตามการออกแบบที่แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 400 V และกระแสลัดวงจร 1 แอมแปร์ เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 100 W

5) ไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าจะส่งให้กับระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Power inverter) เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220V, 50Hz พร้อมทั้งจะจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน

3.2 การออกแบบและสร้างแผงเซลล์ความร้อน

ในงานวิจัยนี้ต้องการกำลังการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ความร้อนดัดแปลงจากเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric cooler) เบอร์ TEC 1-12710 ให้ได้ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W ผลศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการระบายความร้อนด้วยน้ำสูงกว่าการระบายด้วยอากาศมากและช่วยให้ชุดเซลล์ความร้อนผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมากกว่าประมาณ 4 เท่า ดังนั้นจึงต้องทดสอบข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (Specification) ของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ที่ความแตกต่างอุณหภูมิในสภาพการระบายความร้อนด้วยน้ำ

3.2.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์รุ่น TEC1-12710 ผลิตไฟฟ้าเมื่อระบายความร้อนด้วยน้ำในข้อ 4.1 พบว่าอุณหภูมิที่ผนังด้านร้อนของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (T_h) ที่ประมาณ $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ (369.2 K) และอุณหภูมิผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (T_c) ที่ประมาณ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (313.2 K) เป็นการระบายความร้อนที่อุณหภูมิอยู่ในสภาวะแวดล้อม เกิดผลต่างอุณหภูมิประมาณ $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ผลิตไฟฟ้าได้ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W

จากการศึกษาข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (Specification) ของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์พบว่า [11] ข้อมูลหลักที่จำเป็นในการออกแบบชุดเซลล์ความร้อนมี 5 ชนิด ได้แก่

R_c = ความต้านทานภายในของเซลล์ (Internal resistance) (Ω)

ΔT = ความแตกต่างอุณหภูมิของเซลล์ (Temperature difference) ($^{\circ}\text{C}$)

V = แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) (V)

I_{sc} = กระแสลัดวงจร (Short circuit current) (A)

α = สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck coefficient) (V/K)

σ = ความนำความร้อนของเซลล์ (Thermal conductance) (W/K)

ข้อมูลเหล่านี้ใช้สำหรับการคำนวณหาจำนวนเซลล์ความร้อนที่จะใช้ในการผลิตไฟฟ้าให้ได้ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายแก่โหลดตามกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (Specification) ของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอรุ่น TEC1-12710 สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่ความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์ด้านร้อนและด้านเย็นประมาณ 66 °C แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลอรุ่น TEC1-12710 สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่ $\Delta T = 66$ °C

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด (V)	2.6
กระแสไฟฟ้ลัดวงจร (A)	1.36
ความต้านทานภายใน (Ω)	2
สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (V/K)	0.039
ความต้านทานความร้อน (K/W)	1.48
ความนำความร้อน (W/K)	0.67568

3.2.2 การหาจำนวนเซลล์ความร้อนในการกำเนิดไฟฟ้า

จากข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคสามารถประเมินอุณหภูมิของน้ำร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนให้ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเกิดการกระจายความร้อนไปทั่วผนังเซลล์ความร้อน โดยผนังด้านร้อน (T_h) มีอุณหภูมิในภาวะสมดุลย์ความร้อนประมาณ 96 °C หรือประมาณ 369.2 K ส่วนผนังด้านเย็น (T_c) ต้องการระบายความร้อนให้ลดอุณหภูมิลงใกล้อุณหภูมิแวดล้อม ประมาณ 30 °C หรือประมาณ 313.2 K ซึ่งคิดเป็นความแตกต่างอุณหภูมิ 369.2 - 303.2 = 66 K สามารถหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยได้จากสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned}
 T_{avg} &= \frac{(T_h + T_c)}{2} \\
 &= \frac{(369.2 + 313.2)}{2} \\
 &= 341.2 \text{ K}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.10 สามารถหากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ความร้อนดัดแปลง 1 เซลล์
ขณะผลต่างอุณหภูมิที่ 66 K ได้จาก

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \frac{(S_M \times \Delta T)^2}{4 \times R_M} \\ &= \frac{(0.039 \times 66)^2}{4 \times 2} \\ &= 0.82 \text{ W} \end{aligned}$$

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องการกำลังผลิตไฟฟ้าที่ 100 W ดังนั้นจำนวนเซลล์ความร้อนที่ต้อง
นำมาใช้ในการประกอบเป็นโมดูลเซลล์ความร้อน จะสามารถคำนวณได้จาก

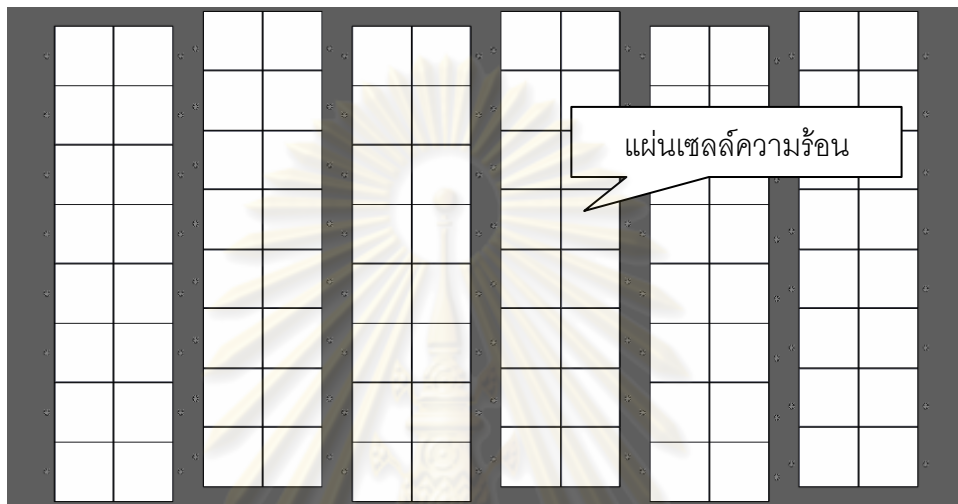
$$\begin{aligned} N_T &= \frac{P_0}{P_{\max}} \\ &= \frac{100}{0.82} \\ &= 121.95 \text{ ประมาณ } 122 \text{ เซลล์} \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติจะเผื่อจำนวนเซลล์ความร้อนมากกว่าที่คำนวณไว้ เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้า
ของเซลล์ความร้อนแต่ละเซลล์ซึ่งขณะใช้งานจริงจะมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่างกัน
เนื่องจากการติดตั้งเซลล์ความร้อนบนแผงหลายเซลล์ต่อรวมกันบนพื้นที่กว้าง ไม่อาจทำให้เซลล์
ความร้อนได้รับการถ่ายเทความร้อนที่ผลต่างอุณหภูมิเท่ากัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการผลิต
กำลังไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนต่อเซลล์ไม่เท่ากันหรือต่ำกว่าที่คำนวณได้ ฉะนั้นจำเป็นต้องเพิ่ม
จำนวนเซลล์ความร้อนมากขึ้นเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เต็มกำลังและในการประเมิน
จำนวนเซลล์ความร้อน ที่เพิ่มขึ้นยังจำเป็นต้องคำนึงถึงการจัดแบ่งและจัดเรียงให้เซลล์ความร้อน
ติดตั้งได้ลงตัวเหมาะสมกับพื้นที่ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากประเมินการจัดเรียงเซลล์ความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนพบว่าจะต้องใช้เซลล์
ความร้อนทั้งหมดจำนวน 192 เซลล์ แบ่งเป็น 2 ชุด แต่ละชุดนำเซลล์ความร้อนต่ออนุกรมกันบน
พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านละ 96 เซลล์ แบ่งเป็นคอลัมน์ได้ด้านละ 6 คอลัมน์ ในแต่ละ
คอลัมน์ จะมีแผ่นอลูมิเนียมขนาด 10 x 8 และ 9 x 8 ตารางเซนติเมตร เป็นอุปกรณ์ในการยึด
ประกอบเซลล์ความร้อนชุดละ 4 ตัว จำนวน 4 ชุด ใ้ให้แนบชิดพื้นผิวผนังถ่ายเทความร้อน โดยใช้
ซิลิโคนถ่ายเทความร้อน (Heat sink compound) ประสานกับผนังถ่ายเทความร้อนเพื่อช่วยให้
ประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนดียิ่งขึ้น ดังในแผนภาพรูปที่ 3. 2 ผลการประเมินโมดูลผลิตไฟฟ้า
จากความร้อน (Thermoelectric Module) สามารถสรุปขึ้นส่วนที่ใช้ได้ดังนี้

ชิ้นส่วนที่ใช้	ชุดแผงเซลล์ความร้อนขนาด 96 เซลล์	2	แผง
	เซลล์ความร้อนทั้งหมด	192	เซลล์

แผ่นอลูมิเนียมขนาด 0.4 x 10 x 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร	36	แผ่น
แผ่นอลูมิเนียมขนาด 0.4 x 10 x 9 ลูกบาศก์เซนติเมตร	12	แผ่น
สกรูสแตนเลสขนาด M3 ยาว 0.8 เซนติเมตร	192	ตัว
แผ่นอลูมิเนียมสำหรับติดตั้งเซลล์ความร้อนอาศัย	1	ชุด
ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็น		
ท่อนำความร้อน	4	เมตร



รูปที่ 3.2 ลักษณะการจัดเรียงของเซลล์ความร้อน

3.2.3 การประเมินกำลังไฟฟ้าของโมดูลผลิตไฟฟ้า

จากเงื่อนไขการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) ความต้านทานภายในเซลล์ความร้อนและความต้านทานโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะลดลงครึ่งหนึ่ง คือ $R_{TEC} = R_L$ และ $V_o = V_o/2$ ดังนั้นจะต้องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรอย่างน้อยประมาณ 400 VDC และกระแสลัดวงจร 1 A เพื่อนำมาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 VAC, 50 Hz, 100 W

เมื่อนำเซลล์ความร้อนต่ออันดับกันทั้งหมด 192 เซลล์ จะได้ความต้านทานภายใน $R_{TEC} = (192 \times 2) = 384 \Omega$ และที่ก่าลังไฟฟ้าสูงสุดค่าความต้านทานโหลดจะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานโหลด } R_L &= \frac{V_o^2}{P_o} \\ &= \frac{200^2}{100} \\ &= 400 \Omega \end{aligned}$$

$R_{TEC} = 384 \Omega$ ใกล้เคียงกับ $R_L = 400 \Omega$ เป็นไปตามเงื่อนไขของการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ส่วนกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะมีการต่อภาระทางไฟฟ้าหรือโหลดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด ประเมินได้จาก

$$\begin{aligned} I &= \frac{S \times \Delta T}{R_C + R_L} \\ &= \frac{0.039 \times 66}{384 + 400} \\ &= 0.328 \text{ A} \end{aligned}$$

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะมีการต่อโหลดทางไฟฟ้า

$$\begin{aligned} V_o &= I \times (R_M + R_L) \\ &= 0.328 \times (384 + 400) \\ &= 257.15 \text{ Vdc} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณข้างต้นนำมาประเมินค่ากำลังไฟฟ้า

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{V_o^2}{R_L} \\ &= \frac{257.15^2}{400} \\ &= 165.31 \text{ W}_e \end{aligned}$$

ความต้องการปริมาณความร้อนที่ต้องจ่ายให้กับชุดเซลล์ความร้อน

$$\begin{aligned} Q_h &= N_T [(S \times T_h \times I) - (0.5 \times I^2 \times R_C) + (K_C \times \Delta T)] \\ &= 192 [(0.039 \times 369.2 \times 0.328) - (0.5 \times 0.328^2 \times 384) + (0.6758 \times 66)] \\ &= 5,504.53 \text{ W}_{th} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของชุดเซลล์ความร้อน

$$\begin{aligned} E_g &= \frac{V \times I}{Q_h} \times 100\% \\ &= \frac{257.15 \times 0.328}{5,504.53} \times 100 \\ &= 1.53 \% \end{aligned}$$

3.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน จะทำหน้าที่เป็นหน่วยรับความร้อนจากน้ำไหลเวียนของหม้อต้มน้ำร้อนด้วยการพาความร้อนผ่านผนังถ่ายเทความร้อน จากนั้นนำความร้อนที่ได้ถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนผ่านผนังโมดูลไปสู่ผนังด้านร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะต้องเก็บรักษาความร้อนที่ได้มาให้มีอุณหภูมิคงที่มากที่สุดและในขณะเดียวกันก็ต้องถ่ายเทความร้อนให้รวดเร็วเพียงพอต่อความต้องการในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน

3.3.1 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

สิ่งที่นำมาพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับถ่ายเทความร้อน ได้แก่ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนให้เซลล์ความร้อน ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างและขนาดของโมดูล ความแข็งแรง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) วัสดุที่ใช้สร้างโมดูล ต้องเป็นวัสดุที่ถ่ายเทความร้อนได้ดี มีค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity; K) สูง และทนต่อการกัดกร่อนเมื่อผิวสัมผัสกับน้ำร้อน
- 2) พื้นผิวผนังหน้าสัมผัสระหว่างโมดูลกับเซลล์ความร้อนต้องแนบสนิทเพื่อให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง
- 3) พื้นผิวผนังของโมดูลต้องมีพื้นที่เพียงพอต่อการวางจำนวนเซลล์ความร้อน 96 เซลล์สองด้าน เพื่อให้จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 100 วัตต์
- 4) ขนาดของโมดูลที่ออกแบบไม่ใหญ่เทอะทะและมีน้ำหนักไม่มากเกินไป อันเป็นผลทำให้การติดตั้งและเคลื่อนย้ายลำบาก
- 5) สามารถทนการอัดแรงดันที่เกิดจากระบบไหลเวียนของน้ำร้อนกึ่งไอน้ำตามธรรมชาติในรูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนได้

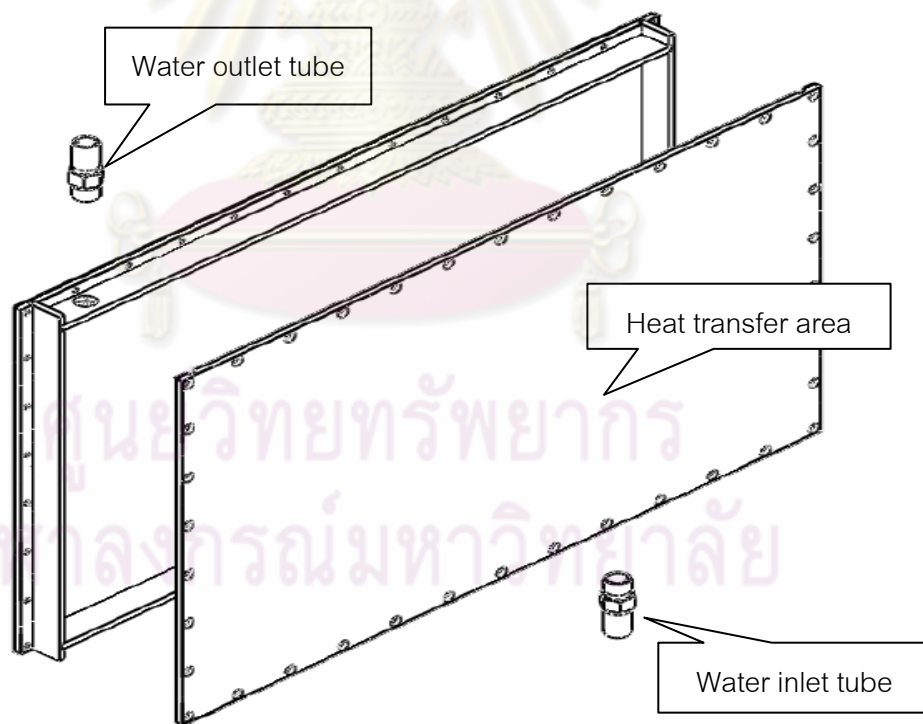
จากข้อพิจารณาดังกล่าวจะเลือกใช้ขอลูมิเนียมแมกนีเซียมอัลลอยด์ เบอร์ AA5083 ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม 0.6 เซนติเมตร โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนที่ออกแบบไว้แสดงในรูปที่ 1 ของภาคผนวก ก มีลักษณะดังนี้

มีขนาดปริมาตรทั้งหมด	3.6 x 37.5 x 65 ลูกบาศก์เซนติเมตร
พื้นที่กักน้ำในโมดูลถ่ายเทความร้อน	3 x 34 x 60 ลูกบาศก์เซนติเมตร
ปริมาตรกักน้ำได้ประมาณ	6 ลิตร
ท่อน้ำร้อนขาเข้า เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	1 ท่อ
ท่อน้ำร้อนขาออก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	1 ท่อ

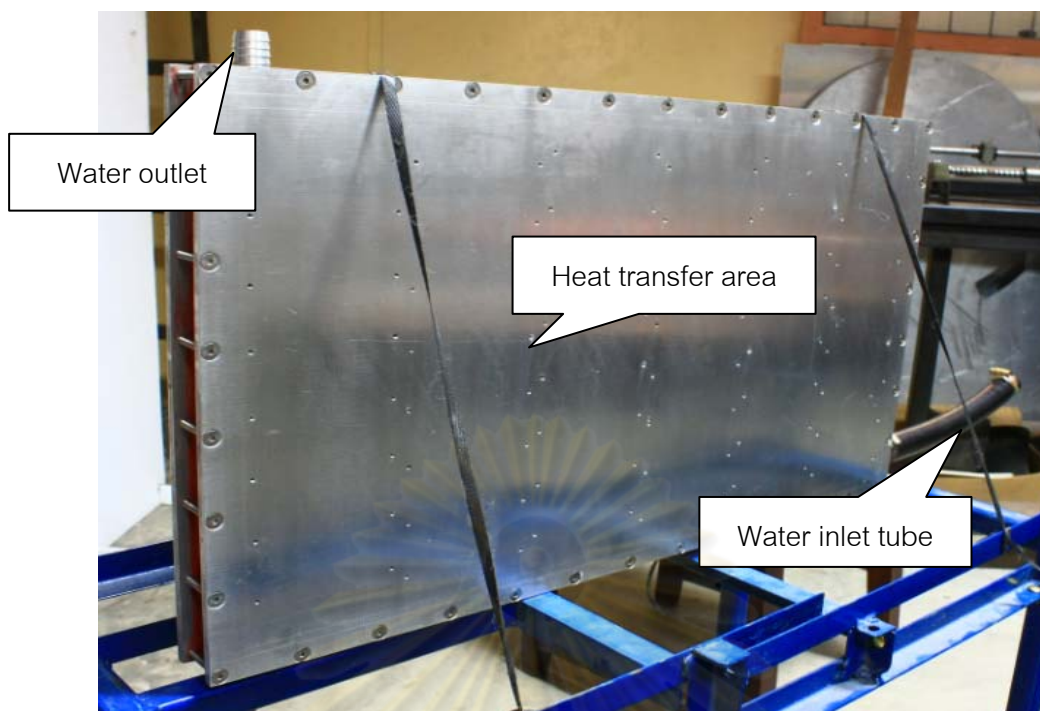
ชิ้นส่วนที่ใช้	แผ่นอลูมิเนียมผนังอุปกรณ์ขนาด	2	แผ่น
	แผ่นอลูมิเนียมกรอบแนวตั้งขนาด	2	แผ่น
	แผ่นอลูมิเนียมกรอบแนวนอนขนาด	2	แผ่น
	สกรูสแตนเลสขนาด M5 ยาว 5 เซนติเมตร	38	ตัว

3.3.2 การประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

ชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามแบบที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการเจาะรูซึ่งได้นำมาประกอบโดยใช้กาวซิลิโคนปะกั้นทนความร้อนทาครอบรูที่เจาะทำลึ้มเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำร้อน ก่อนที่จะยึดด้วยสกรูสแตนเลส และทดสอบการทนแรงดันน้ำที่ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนและโครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนแสดงในแบบรูปที่ 3.3 และภาพถ่ายรูปที่ 3.4 ตามลำดับ หลังการประกอบจะนำไปทดสอบการตอบสนองต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนและความสม่ำเสมอการกระจายอุณหภูมิที่ผนังถ่ายความร้อนสองด้าน



รูปที่ 3.3 แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน



รูปที่ 3.4 โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

3.4 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น จะทำหน้าที่ระบายความร้อนด้วยน้ำที่ไหลผ่านโดยการพาความร้อนจากผนังโมดูลซึ่งแลกเปลี่ยนความร้อนจากผนังแผ่นเซลล์ความร้อนด้านเย็นโดยการนำความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะต้องมีพื้นที่ต่อปริมาตร (Surface to volume ratio) ภายในโมดูลสูง เพื่อประสิทธิภาพการระบายความร้อนและสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของเซลล์ความร้อนให้มาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นนี้เป็นส่วนที่ติดตั้งแผงเซลล์ความร้อน 2 ชุดประกบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

3.4.1 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

สิ่งที่นำมาพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับระบายความร้อน ได้แก่ พื้นที่ติดตั้งเซลล์ความร้อน ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างและขนาดของโมดูล ความแข็งแรง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) วัสดุที่ใช้ต้องมีการถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนการกัดกร่อน มีเนื้อแข็งพอที่จะทำเกลียวยึดชุดแผ่นเซลล์ความร้อน

2) วัสดุที่ใช้ต้องมีความแข็งแรงพอที่จะสามารถเซาะทำร่องครีบบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มพื้นที่ต่อปริมาตร ภายในโมดูลได้

3) พื้นผิวของผนังอุปกรณ์ระบายความร้อนต้องเรียบ เพื่อให้สามารถสัมผัสกับผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ติดตั้งได้แนบสนิท เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน

4) ขนาดของโมดูลระบายความร้อนไม่หนักเกินไปและสามารถจัดวางประกบกับโมดูลเซลล์ความร้อนได้พอดี

จากข้อพิจารณาดังกล่าวจะเลือกใช้อลูมิเนียมแมกนีเซียมอัลลอยด์ เบอร์ AA5083 มาสร้างระบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับวัสดุที่นำมาสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน โดยการออกแบบขึ้นส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนด้านผนังติดตั้งเซลล์ความร้อนจะใช้แผ่นอลูมิเนียมแมกนีเซียมอัลลอยด์เซาะขึ้นรูปทำร่องครีบบระบายความร้อน (Ventilating fin) เพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนให้แก่น้ำระบายความร้อน ในชิ้นส่วนฝาครอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะทำจากอลูมิเนียมเบอร์ AA1100 หนา 0.4 เซนติเมตร เนื่องจากไม่ต้องการความแข็งแรงและมีราคาถูกกว่า

โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นที่ออกแบบไว้ แสดงในรูปที่ 2 ของภาคผนวก ก โดยใน 1 โมดูล มีลักษณะดังนี้

มีขนาดปริมาตรทั้งหมด	2.5 x 65 x 34	ลูกบาศก์เซนติเมตร
จำนวนครีบบระบายความร้อน	34	ครีบ
ขนาดความสูงของครีบ	1.5	เซนติเมตร
ความหนาของร่องครีบ	0.3	เซนติเมตร
ระยะห่างของร่องครีบ	0.6	เซนติเมตร

ปริมาตรที่สามารถบรรจุน้ำได้ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนหาได้จาก

$$= (\text{กว้างภายใน} \times \text{ยาวภายใน} \times \text{สูงภายใน}) - (\text{ปริมาตรของครีบบระบายความร้อนทั้งหมด})$$

$$= (2 \times 32 \times 63) - 34(0.2 \times 57 \times 1.5) = 3,450.6 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ ปริมาตรน้ำ } 3.4 \text{ ลิตร}$$

อัตราพื้นที่ระบายความร้อนทั้งหมดต่อปริมาตรน้ำ หาได้จากพื้นที่ของครีบบระบายความร้อนและพื้นที่สัมผัสน้ำทั้งหมดต่อปริมาตรน้ำระบายความร้อน

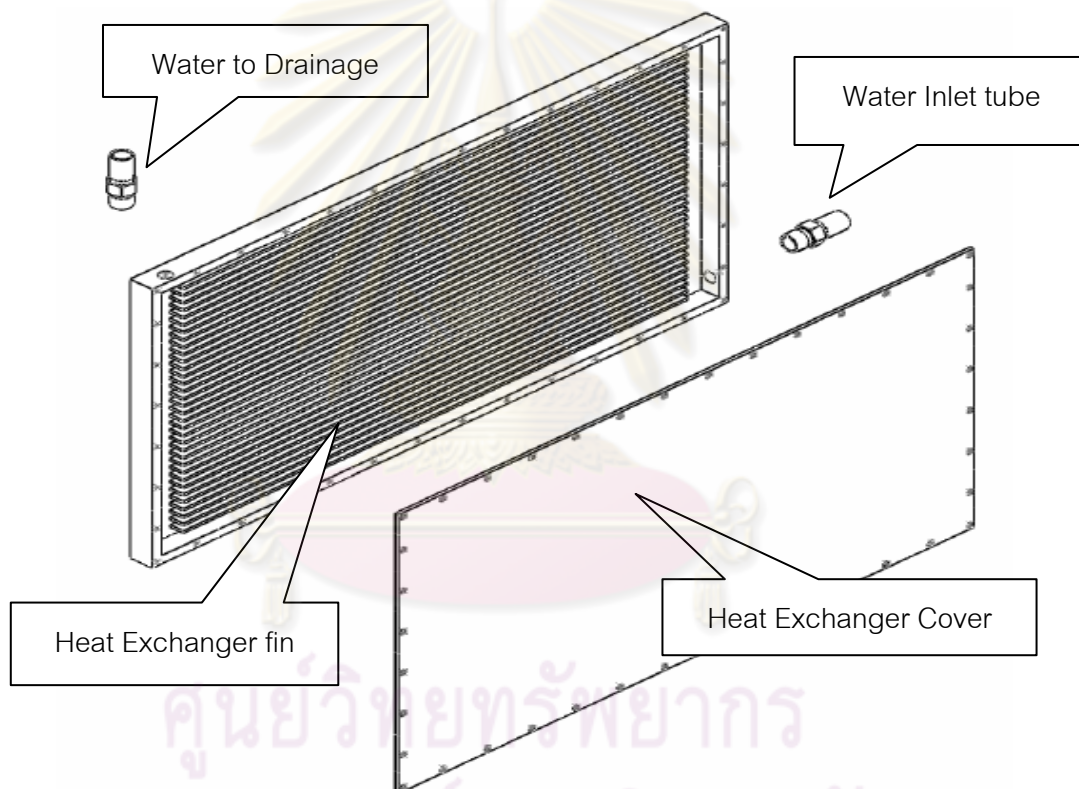
$$= 3,307 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ } 3,450.6 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$= 958.384 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อลิตร}$$

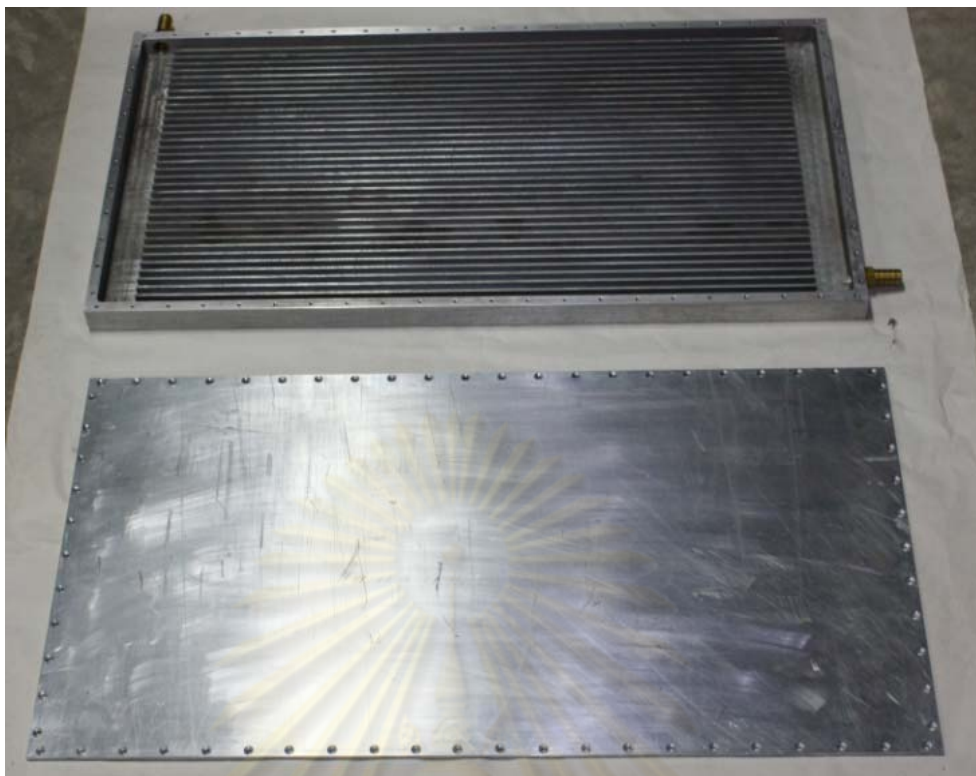
ชิ้นส่วนที่ใช้	ฝาครอบโมดูลขนาด	65 x 34	ตารางเซนติเมตร
	ท่อน้ำขาเข้าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	2	ท่อ

3.4.2 การประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

ชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามแบบที่สร้างขึ้นได้นำจัดทิศทางการไหลของน้ำระบายความร้อนมาก่อนประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้วัสดุซิลิโคนปะเก็นทนความร้อนทาบร่องที่เซาะทำลิ้มเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำร้อน ก่อนที่จะยึดด้วยสกรูสแตนเลส อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นประกอบขึ้นทั้งหมด 2 โมดูล ใน 1 โมดูลจะสามารถจัดเรียงเซลล์ความร้อนแบบอนุกรมกันได้จำนวน 96 เซลล์ ให้กำลังไฟฟ้าประมาณ 50 W โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นแสดงในแบบรูปที่ 3.5 และภาพถ่ายรูปที่ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น



รูปที่ 3.6 โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

3.5 การออกแบบและสร้างระบบผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นนี้ ออกแบบให้สามารถใช้กับแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) เกรดต่ำที่เกิดจากการระบายความร้อนจากระบบการทางอุตสาหกรรม ความร้อนจากการระบายความร้อนจากสารกัมมันตรังสีความแรงสูง การเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนจากแหล่งพลังงานอื่น เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวจะนำสู่ระบบโดยผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อต้มน้ำดังแสดงในภาคผนวก จ. หรือหากเป็นน้ำร้อนสามารถป้อนไหลผ่านระบบได้โดยตรง แต่การทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบในงานวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ จำเป็นต้องผลิตความร้อนจากแหล่งกำเนิดที่ควบคุมและวัดการใช้พลังงานได้ง่ายด้วยการต้มน้ำด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) จัดระบบน้ำร้อนไหลเวียนแบบปิดด้วยกระบวนการเทอร์โมไซฟอน

3.5.1 การออกแบบอุปกรณ์ผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ

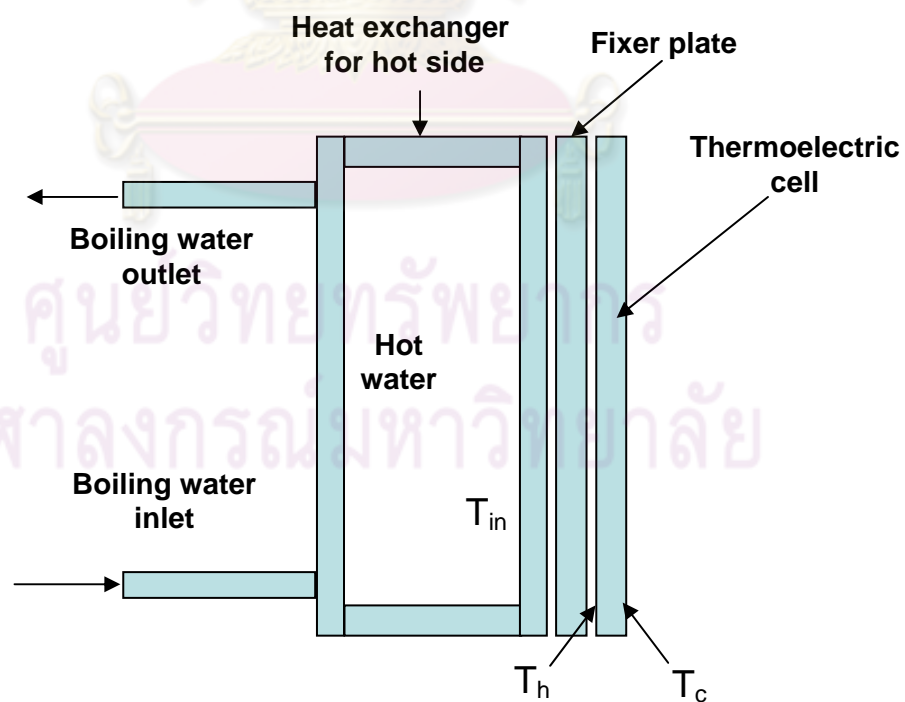
สิ่งที่นำมาพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์ประกอบเพื่อการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อน ได้แก่ ปริมาณน้ำไหลเวียน กำลังผลิตความร้อน คุณสมบัติของวัสดุและความปลอดภัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ระบบต้องทนต่อสภาพแรงอัดของน้ำร้อนในรูปปิด ในกรณีที่ต้องการน้ำเดือดอุณหภูมิสูงกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เล็กน้อย และต้องมีมาตรการวัดความดันและวาล์วปล่อยแรงดันเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน โดยแรงดันที่ประมาณการณในการสร้างระบบไม่เกิน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2) หม้อต้มน้ำต้องทำด้วยวัสดุทนต่อสภาพการกัดกร่อนของน้ำร้อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม และมีความแข็งแรงที่จะทนแรงดันตามต้องการ

3) กำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้าประเมินจากความต้องการปริมาณความร้อนในหัวข้อ 3.2.3 ปริมาณความร้อนที่ต้องการประมาณ $5,504.53\text{ W}_{th}$ เมื่อกำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไว้ 10% จึงเลือกกำลังไฟฟ้าที่ $6,000\text{ W}$

4) ระบบต้องผลิตน้ำร้อนที่ป้อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังด้านร้อน ซึ่งมีความจุของน้ำได้ 6 ลิตร ที่อุณหภูมิ T_{in} ตามแผนภาพในรูปที่ 3.7 อย่างน้อย $102.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยคำนวณจากสมการที่ 2.18



รูปที่ 3.7 โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเป็นการนำความร้อนดังนั้น การหาความนำความร้อนผ่านวัสดุตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ได้จากสมการที่ 2.18

$$Q_{\text{conduction}} = -kA \frac{(T_h - T_{in})}{\Delta x}$$

โดยที่ $Q_{\text{conduction}}$ คือ ค่าการนำความร้อนผ่านวัสดุ (W)

k คือ thermal conductivity ของวัสดุ (W/m·K)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (m²)

$T_h - T_{in}$ คือ ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างพื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (K)

Δx คือ ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ (m)

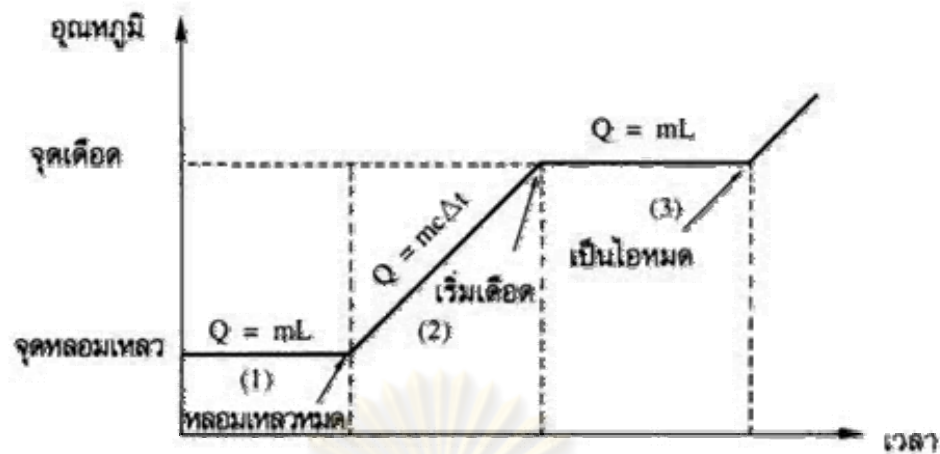
เมื่อ	ความนำความร้อนของอลูมิเนียม (K) เบอร์ AA5083	มีค่า	120 W/m-K
	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (37.5 cm x 65 cm) x 2		0.4875 m ²
	ระยะทางความร้อนเคลื่อนที่ได้จากความหนาของแผ่นอลูมิเนียม		6 mm + 5mm
	ความร้อนที่ถ่ายเทจากไอน้ำไปยังแผ่นอลูมิเนียม		33.867 kW
	ถ้าต้องการ T_h ที่ 96 °C หรือ 369.15 K		

จะได้

$$33.867 \times 10^3 = -120 \times 0.4875 \times \frac{(369.15 - T_{in})}{0.011}$$

$$T_{in} = 375.935 \text{ K} = 102.78 \text{ °C}$$

5) ระบบผลิตความร้อนต้องสามารถผลิตความร้อนได้ต่อเนื่องและควบคุมอุณหภูมิได้ มีปริมาณน้ำที่เพียงพอในระบบไหลเวียน การคำนวณหาปริมาณน้ำปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำร้อนเปลี่ยนสถานะในช่วงไม่เกินบริเวณเริ่มน้ำเดือดและมีบางส่วนกลายเป็นไอ โดยพิจารณาจากสมการในช่วงที่ 2 ของกราฟในรูปที่ 3.8 ผลการคำนวณได้ปริมาณน้ำที่ใช้ 32.56 ลิตร การคำนวณแสดงได้ต่อไป



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ได้รับความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำ

ปริมาณความร้อน (Q) ที่ทำให้จากอุณหภูมิห้องเป็นน้ำร้อนคำนวณได้จากสมการ

$$Q = mc\Delta T \quad \dots\dots\dots 3.1$$

หรือ $m = Q / c\Delta T \quad \dots\dots\dots 3.2$

โดยที่ m คือ มวลของน้ำร้อนทั้งระบบ

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ $1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$

ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิ น้ำจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ T_{in}

ปริมาณความร้อน $5,504.53 \text{ W}_{th}$ ที่ต้มน้ำจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ T_{in} ในเวลา 30 นาที ($30 \times 60 = 1,800$ วินาที คิดเป็นพลังงาน $5,504.53 \times 1,800 = 9.91 \text{ MJ}$ และแปลงเป็นหน่วยความร้อนได้เท่ากับ $9.91 / 4.186 = 2.37 \text{ Mcal}$ ($1 \text{ cal (Calories)} = 4.186 \text{ J}$)

ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 $m = (2.37 \times 10^6) / (1) \times (102.78 - 30) = 32.56 \text{ kg}$

6) จากการคำนวณข้างต้นสามารถประเมินความจุน้ำของหม้อต้มได้โดยหักความจุน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนออกจากความจุของน้ำที่ต้องการจากการคำนวณจากสมการที่ 3.2 จะได้ความจุน้ำหม้อต้มเท่ากับ $32.56 - 6 = 26.56$ ลิตร หรือเผื่อความจุให้มากขึ้นเป็น 30 ลิตร

7) น้ำในหม้อต้มน้ำรวมกับน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนรวมกันมีปริมาตร 36 ลิตร เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะขยายตัวและเกิดแรงดันในระบบปิด เพื่อไม่เกิดแรงดันสูงมากจะออกแบบระบบอ่างสำรองน้ำรองรับการขยายตัวของน้ำ โดยจากการคำนวณตามสมการที่ 3.3 พบว่าน้ำ

ปริมาตร 36 ลิตร ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 28 °C เมื่อต้มเป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ความดันบรรยากาศ จะมีปริมาตรขยายตัวเพิ่มขึ้น 8 ลิตร ดังนี้

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots\dots\dots 3.3$$

เมื่อ $P_1 = P_2$ คือ ความดันบรรยากาศปกติ

V_1 คือ ปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น T_1

V_2 คือ ปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิ T_2

T_1 คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (K)

T_2 คือ อุณหภูมิของน้ำที่ขยายตัว (K)

$$\frac{3.6 \times 10^4}{307} = \frac{V_2}{373}$$

$$V_2 = 43,739.41 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ขยายตัวจะได้จาก

$$V_{\text{net}} = V_2 - V_1$$

$$= 43,739.41 - 36,000$$

$$= 7,739.41 \text{ cm}^3$$

$$= 7.7 \text{ ลิตร หรือประมาณ 8 ลิตร}$$

จะต้องออกแบบอ่างสำหรับน้ำเพื่อ 20% คิดเป็นปริมาตรประมาณ 10 ลิตร

ข้อพิจารณาดังกล่าวจึงเลือกใช้หม้อต้มน้ำร้อนผลิตภัณฑ์ของบริษัท ยูนิตี้ อีควิปเมนท์ แอนด์เซอร์วิส จำกัด Model : WB - 30 ตัวถึงหม้อต้มทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถปรับอุณหภูมิของน้ำได้ 30-110 °C แต่กำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์มีขนาด 3,000 W จึงต้องเพิ่มฮีตเตอร์ให้ มีกำลังรวมเป็น 6,000 W โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่ออกแบบ มีลักษณะดังนี้

กำลังไฟฟ้า	6,000	วัตต์
ใช้ไฟฟ้ากระแสลับ	220V / 50Hz	
ช่วงปรับอุณหภูมิการทำงาน	30-110	องศาเซลเซียส
มาตรวัดความดัน	0 – 30	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
มีขนาดความจุ	30	ลิตร

ปริมาตรอ่างสำรองน้ำ	10	ลิตร
ท่อน้ำขาเข้าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	2	ท่อ
วาล์วปล่อยแรงดันน้ำและวาล์วเปิดปิดน้ำ	1	ชุด

มีซีตบอกระดับน้ำด้านหน้าและไฟบอกสถานะการทำงาน

3.5.2 การประกอบอุปกรณ์ผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ

ในการประกอบอุปกรณ์ผลิตความร้อน ได้ปรับสภาพของหม้อต้มน้ำร้อนโดยดัดแปลงถึงเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเจาะช่องทางน้ำไหลเวียน ติดตั้งท่อน้ำ มาตรวัดความดันและวาล์วปล่อยแรงดัน ที่ด้านฝาครอบ และเจาะติดตั้งท่อน้ำไหลกลับแทนทางเปิดใช้น้ำร้อนเดิม พร้อมทั้งติดตั้งฮีตเตอร์ขนาด 3,000 W ดังในรูปที่ 3.9 เพิ่มภายในหม้อต้มอีก 1 ชุด ทำให้กำลังไฟฟ้ารวมเป็น 6,000 W ซึ่งต้องเพิ่มอัตราทนกระแสของสายไฟฟ้าเป็น 30 A และได้สร้างอุปกรณ์โครงรัดฝาครอบกับตัวถังต้มให้สามารถทนแรงดันเพิ่มเติมด้วย

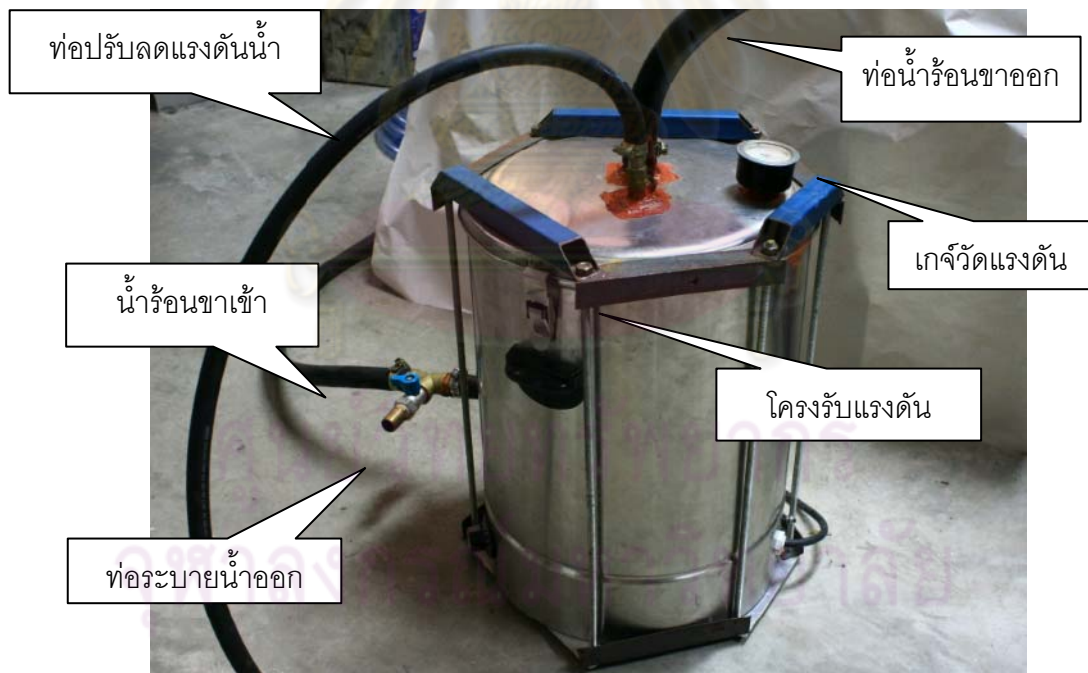
การดัดแปลงส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.10 โดยในการประกอบส่วนฝาครอบและอุปกรณ์เพิ่มเติมจะใช้วัสดุซิลิโคนปะเก็นทนความร้อนทาผนังปากถังจนสนิทไม่ให้เกิดการรั่วไหลของน้ำ ก่อนยึดโครงรัดฝาครอบ เพื่อให้ทนต่อสภาพการทำงานภายใต้แรงดันน้ำร้อนภายในรูปปิดได้ โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 3.11 และขณะประกอบใช้งานกับระบบจะใช้ฉนวนกันความร้อนหุ้มท่อน้ำร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากระบบ



รูปที่ 3.9 ฮีตเตอร์ขนาด 3,000 W ที่ติดตั้งเพิ่มภายในหม้อต้ม



รูปที่ 3.10 การดัดแปลงหม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำร้อน



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้น

3.6 การประกอบและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน

อุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างในแต่ละส่วน ได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นและระบบผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ ได้นำมาประกอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ โดยสิ่งสำคัญในการประกอบและติดตั้งทางเทคนิค ได้แก่

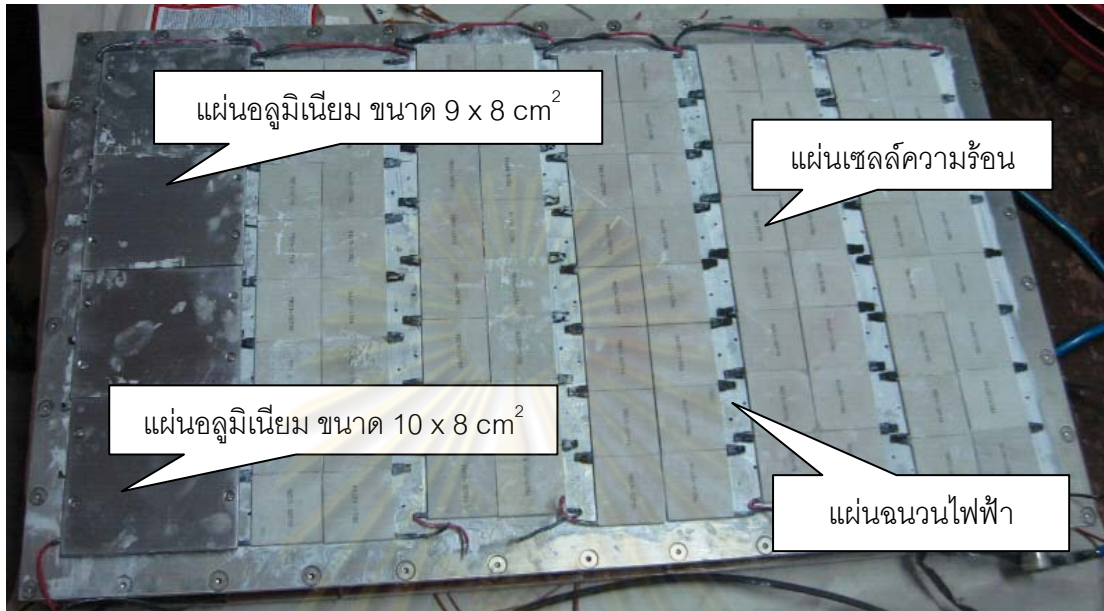
- 1) นำหนักกดบนแผ่นเซลล์ความร้อนที่ติดตั้งและการขยายตัวเมื่อได้รับอุณหภูมิเพื่อป้องกันการแตกร้าวของเซลล์ความร้อน
- 2) การใช้สารซิลิโคนประสานผิวเซลล์ความร้อนสองด้านกับผนังแผ่นโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
- 3) ความเรียบระนาบผิวผนังแผ่นโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อนและความสม่ำเสมอของแรงกด จะช่วยการกระจายความร้อนทั่วถึง ทำให้เซลล์ความร้อนผลิตไฟฟ้าได้เต็มกำลัง
- 4) ความยาวของท่อน้ำร้อนไม่ควรจะยาวเกินไป จะเป็นสาเหตุของการสูญเสียความร้อนระหว่างการพาความร้อนไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน
- 4) การทาปะเก็นซิลิโคนฉนวนรอบบริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต้องมีความละเอียด เพื่อป้องกันการรั่วซึม

การประกอบและติดตั้งชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้นมีรายละเอียดเป็นส่วนๆ ดังนี้

3.6.1 การประกอบโมดูลผลิตไฟฟ้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

เซลล์ความร้อนจะติดตั้งบนพื้นผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น โดยเซลล์ความร้อนทั้งหมดจำนวน 192 เซลล์ ถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดละ 96 เซลล์ต่ออนุกรมกัน บนพื้นผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผนังอุปกรณ์จะจัดแบ่งให้วางชุดเซลล์ความร้อนเป็น 6 คอลัมน์ ในแต่ละคอลัมน์ จะมีแผ่นอลูมิเนียมขนาดพื้นที่ 10×8 และ 9×8 ตารางเซนติเมตร เป็นอุปกรณ์ในการยึดประกบเซลล์ความร้อนให้แนบชิดพื้นผิวผนังถ่ายเทความร้อน ชุดละ 4 ตัว จำนวน 4 ชุด โดยใช้ซิลิโคนถ่ายเทความร้อนประสานกับผนังถ่ายเทความร้อน บริเวณระหว่างช่องว่างคอลัมน์ซึ่งเป็นแนวหัวต่อไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนจะวางฉนวนไฟฟ้าเพื่อป้องกันการลัดวงจรลงผนังโลหะทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับแผ่นอลูมิเนียมยึดประกบเซลล์ความร้อนจะปรับระนาบและแรงกดที่สม่ำเสมอทั่วบริเวณ ดังแสดงโมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบ

สมบรูณ์ในรูปที่ 3.13 โมดูลผลิตไฟฟ้านี้จะสร้างขึ้น 2 โมดูลก่อนที่จะประกบเข้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังด้านร้อน และขณะใช้งานรอบขอบด้านนอกจะห่อหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนผิวที่สัมผัสไปกับบรรยากาศแวดล้อม



รูปที่ 3.12 การจัดเรียงเซลล์ความร้อนต่อแบบอนุกรมบนผิวพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

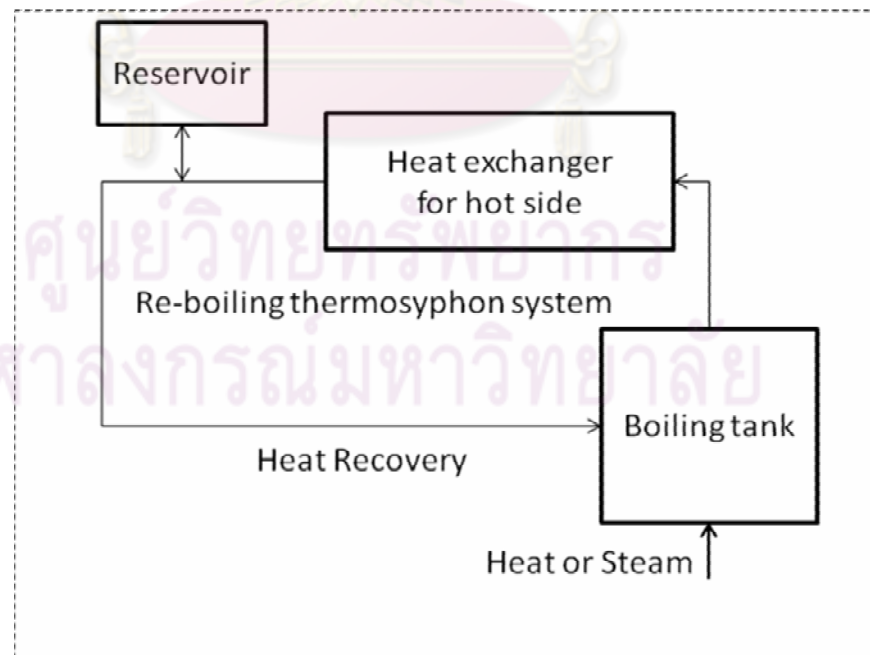


รูปที่ 3.13 โมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบสมบรูณ์บนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

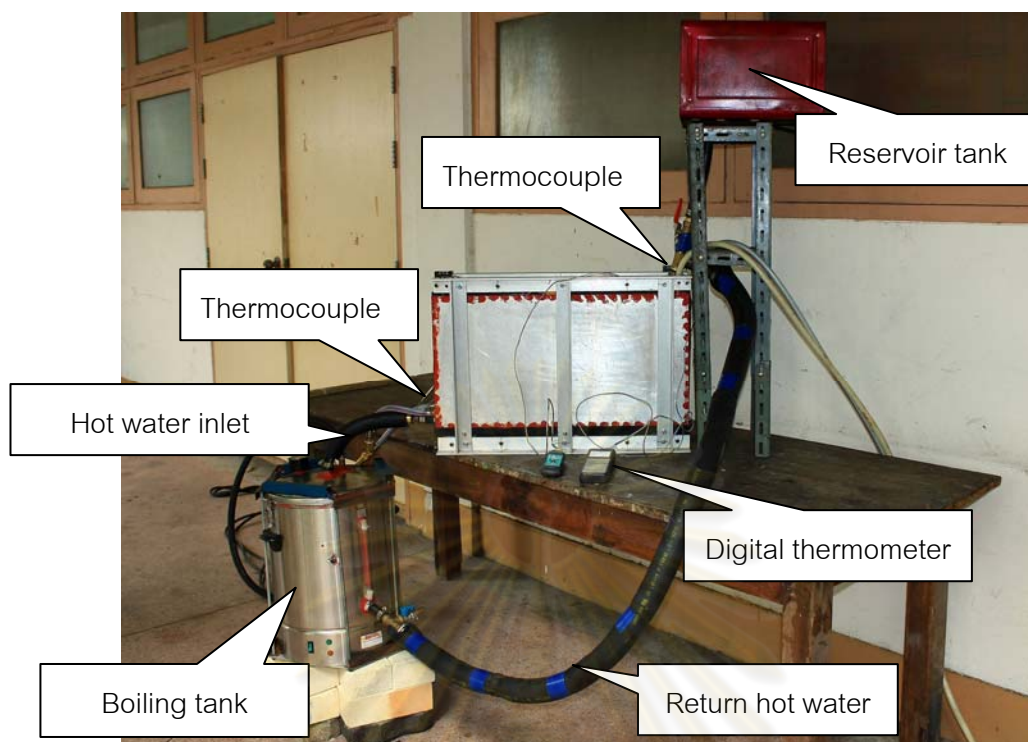
3.6.2 การติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

ระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้นจะประกอบเข้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน ด้วยการจัดทางเข้าและออกของน้ำร้อน เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำร้อนตามหลักการของระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในรูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนเพื่อการต้มน้ำซ้ำ (Reboiling thermosyphon) เป็นการเพิ่มความร้อนให้น้ำร้อนไหลกลับที่ได้ถ่ายเทให้กับผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไป แผนภาพของระบบแสดงในรูปที่ 3.14

ในการจัดระบบ ถังต้มน้ำจะวางที่ระดับต่ำกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน น้ำร้อนที่ออกทางท่อด้านบนฝาหม้อต้มจะพาความร้อนจ่ายเข้าท่อทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ด้านล่างผ่านท่อทางทวนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว หลังถ่ายเทความร้อนให้ผนังโมดูลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะถูกดันออกที่ท่อทางออกด้านบนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ท่อทางออกนี้ น้ำไหลเวียนจะแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะไหลกลับเข้าถังต้มน้ำด้านล่าง อีกส่วนหนึ่งที่มีปริมาตรเพิ่มจากการขยายตัวจะไหลขึ้นไปพักในอ่างสำรองน้ำ (Reservoir) และจะไหลลงด้วยแรงโน้มถ่วงผสมกับน้ำร้อนในท่อที่กลับไปต้มใหม่ตามสมดุลของระบบ ดังภาพถ่ายของระบบที่ประกอบเพื่อทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปที่ 3.15 นอกจากนี้ที่บริเวณท่อทางเข้าและออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนยังติดตั้งหัวเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิทางเข้าและทางออกระหว่างการทดลองด้วย



รูปที่ 3.14 แผนภาพการติดตั้งระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติแบบเทอร์โมไซฟอน

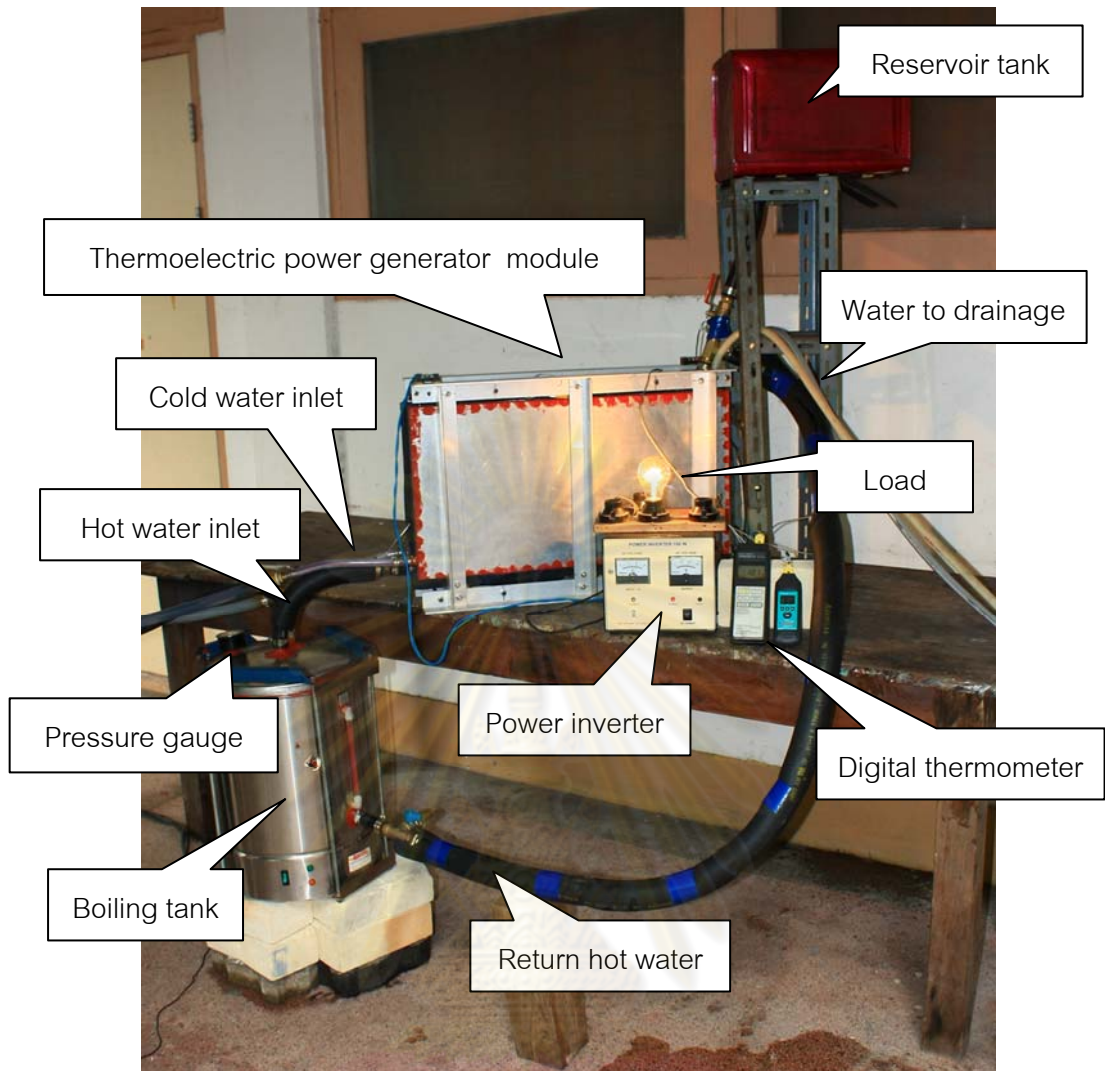


รูปที่ 3.15 ระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในลูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบขึ้น

3.6.3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W ประกอบด้วย ส่วนต่างๆ 5 ส่วน ได้แก่ แผงโมดูลผลิตไฟฟ้า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน ระบบผลิตน้ำร้อนและระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ได้นำมาจัดระบบตามแผนรูปที่ 3.1 ที่ออกแบบไว้

ในการติดตั้งแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น 2 ชุด จะถูกประกบ (Sandwich) เข้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนที่ประกอบร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อนด้วยโครงยึดระบบ ซึ่งโครงยึดระบบนี้ออกแบบขึ้นให้เป็นอุปกรณ์รองรับการติดตั้งและเป็นขาตั้งในเวลาเดียวกัน ปลายสายของแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าแต่ละด้านจะนำมาต่ออันดับกันเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงป้อนเข้าระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผลิตไฟฟ้า 220 VAC, 50 Hz ดังแสดงการติดตั้งในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การดำเนินงานและผลการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย การปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อน การทดลองผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่พัฒนาขึ้น การทดสอบและการประเมินเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ออกใหม่กับงานวิจัยที่พัฒนาไว้เดิม ได้แก่ กำลังการผลิตไฟฟ้า ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน เป็นต้น มีลำดับขั้นดังนี้

- ก. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า
- ข. การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อน
- ค. การทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน
- ง. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้น
- จ. การประเมินราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน

4.1 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

จากการศึกษาผลงานวิจัยเดิมพบว่าข้อจำกัดในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่เป็นประเด็นหลัก คือ ส่วนของการระบายความร้อนจากพื้นผิวของแผ่นระบายความร้อนที่ผนังด้านเย็นของเซลล์ความร้อน ซึ่งเดิมใช้พัดลมช่วยในการบังคับให้อากาศพาความร้อนจากผิวครีบของแผ่นระบายความร้อนแต่ต้องการกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนระบบระบายความร้อนมาใช้เป็นตัวพาความร้อน โดยในการศึกษาผลการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนเปรียบเทียบกันระหว่างการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนที่มีโครงสร้างเหมือนกันต่างกันที่ระบบระบายความร้อน โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

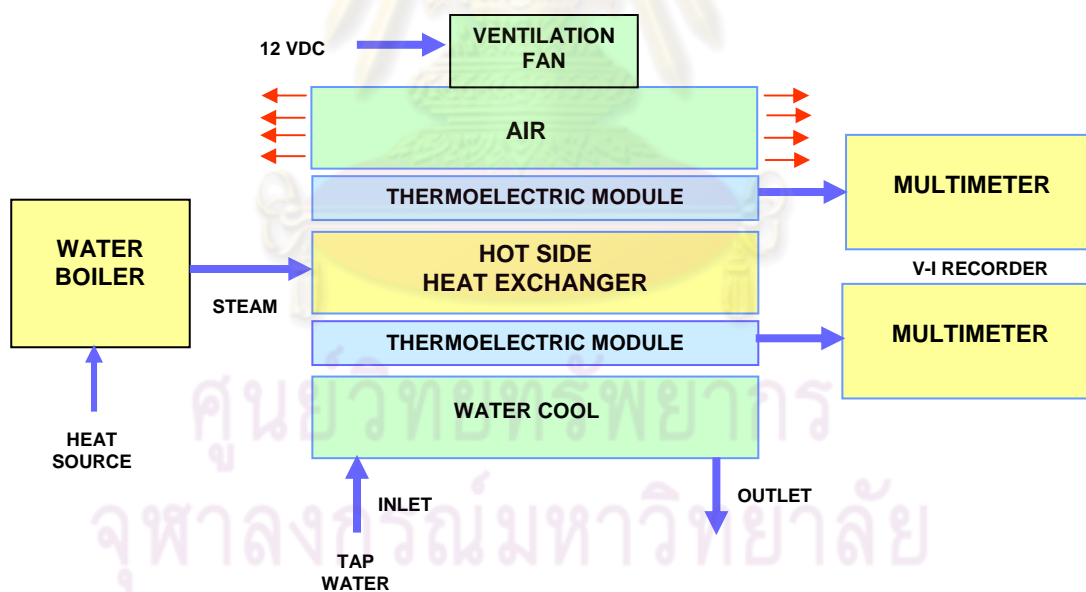
1. ชุดโมดูลเซลล์ความร้อนขนาด 24 cells ที่สร้างขึ้น 2 รูปแบบ
2. ชุดผลิตไอน้ำด้วยเตาไฟฟ้าขนาด 4,000 วัตต์ จำนวน 1 ชุด
3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type k (Chromel – Alumel) จำนวน 4 ชุด
4. เครื่องวัดอุณหภูมิจำนวน ของ LINE SEIKI รุ่น TC - 1100 จำนวน 1 ชุด
5. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ของ OMEGA รุ่น OMEGAETTE HHM93 จำนวน 2 ตัว
6. หลอดไฟฟ้าแบบไส้ขนาดกำลังไฟฟ้าต่างๆ 1 ชุด

7. ถ้วยตวงปริมาตรน้ำขนาด 1 ลิตร

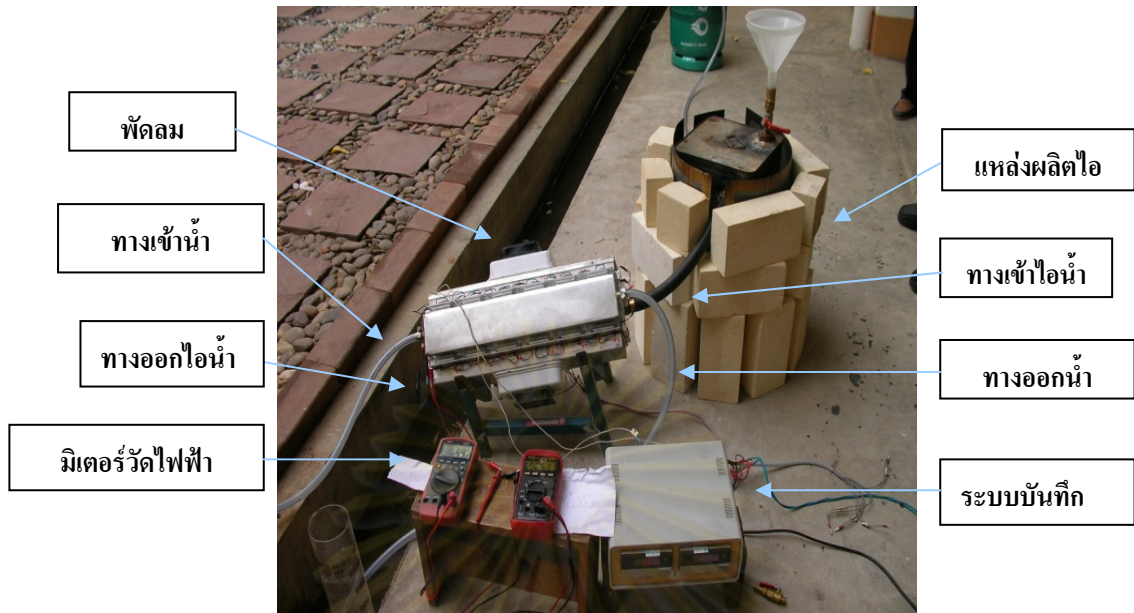
9. นาฬิกาจับเวลา 1 ตัว

4.1.2 การทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

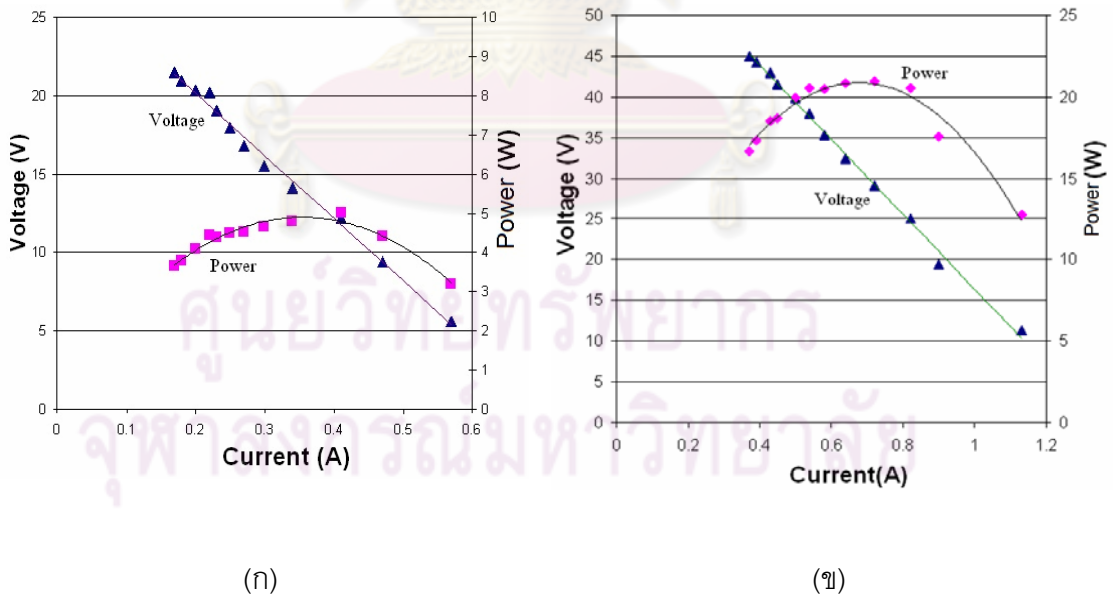
จัดระบบทดลองตามรูปที่ 4.1 โดยชุดโมดูลเซลล์ความร้อนดัดแปลงที่สร้างขึ้นใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric cooler) เบอร์ TEC 1-12710 ต่ออันดับกัน 24 ตัว บนพื้นที่ขนาด $50 \times 12 \text{ cm}^2$ จำนวน 2 ชุด ผลิตไฟฟ้าจากไอน้ำที่อุณหภูมิผนังเซลล์ด้านร้อน $96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยชุดแรกระบายความร้อนออกจากแผ่นครีระบายความร้อนด้วยพัดลมขนาด 6 W เป่าผ่านร่องครีด้วยความอัตราไหลอากาศ 10 l/s ทำให้ผนังด้านเย็นมีอุณหภูมิเฉลี่ย $70.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เปรียบเทียบกับชุดที่สองระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราไหล 3 l/min และน้ำขาเข้าอุณหภูมิ $29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้อุณหภูมิผนังด้านเย็นมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ การจัดระบบทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 ได้ผลการทดลองผลิตไฟฟ้านำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบคุณลักษณะ P-V-I ของชุดโมดูลเซลล์ความร้อนดัดแปลงที่ระบายความร้อนต่างกันได้ในรูปที่ 4.3 และได้รวบรวมผลการวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์เปรียบเทียบกันในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดระบบทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 การจัดระบบทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 กราฟคุณลักษณะ P-V ของโมดูลผลิตไฟฟ้า TEC 1-12710 จำนวน 24 เซลล์

(ก) ระบายความร้อนด้วยพัดลม (ข) ระบายความร้อนด้วยน้ำ

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนเมื่อระบายความร้อนด้วยพัดลมและระบายความร้อนด้วยน้ำ

Parameter (24 devices in series)	Air-force cool ($\Delta T = 96-70.7 = 25.3^{\circ}\text{C}$)	Water cool ($\Delta T = 96-30 = 66^{\circ}\text{C}$)
Maximum power (W)	4.90	21.10
Open circuit voltage (V)	27.42	62.64
Short circuit current (A)	0.71	1.36
Internal resistance (Ω)	42.25	43.40

จากผลการทดลองพบว่า การระบายความร้อนด้วยพัดลมช่วยให้ชุดเซลล์ความร้อนผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เพียง 4.9 วัตต์ ขณะที่การระบายความร้อนด้วยน้ำสามารถช่วยให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 21.1 วัตต์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการระบายความร้อนด้วยน้ำสูงกว่าการระบายด้วยอากาศมากและช่วยให้ชุดเซลล์ความร้อนผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมากกว่าประมาณ 4 เท่า

4.2 การทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

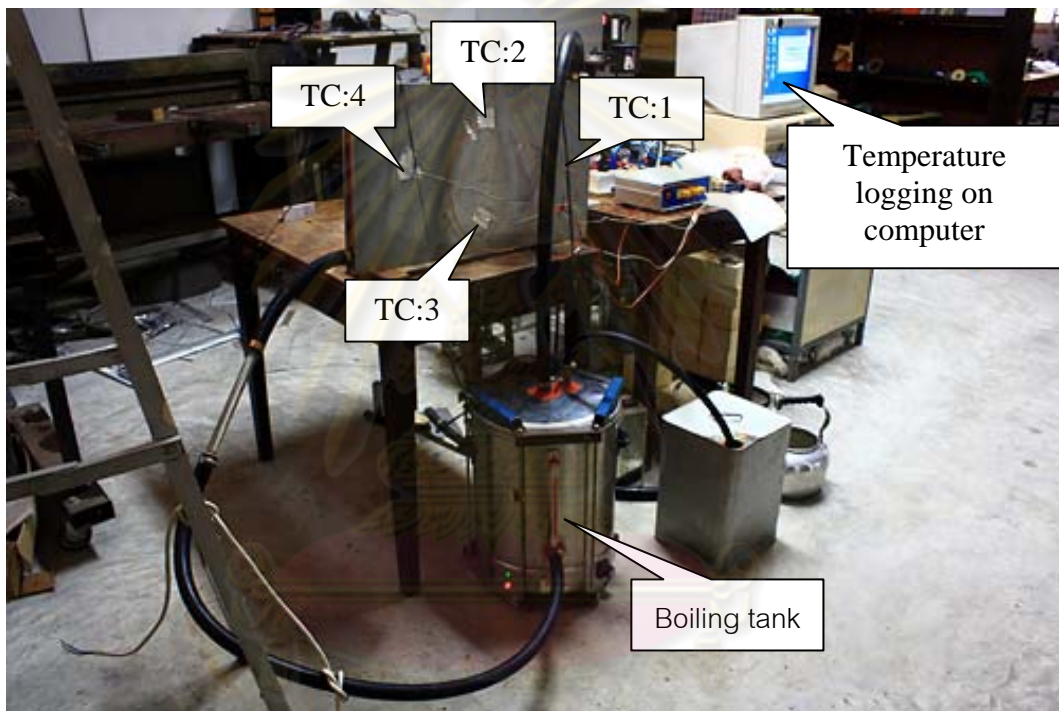
การทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิผนังเซลล์ความร้อน เป็นการทดสอบหาลักษณะการกระจายความร้อนจากน้ำร้อนและไอน้ำที่บริเวณพื้นผิวผนังด้านนอกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อศึกษาผลของการกระจายความร้อนและประเมินความแตกต่างอุณหภูมิก่อนการระบายความร้อนของแหล่งความร้อนสำหรับทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบ

4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อน

1. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนที่พัฒนาขึ้น
2. ระบบผลิตน้ำร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนขนาด 6,000 วัตต์ ที่พัฒนาขึ้น
3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type k (chromel – alumel) จำนวน 4 ชุด
4. เครื่องวัดอุณหภูมิจำนวน ของ LINE SEIKI รุ่น TC - 1100 จำนวน 1 ชุด

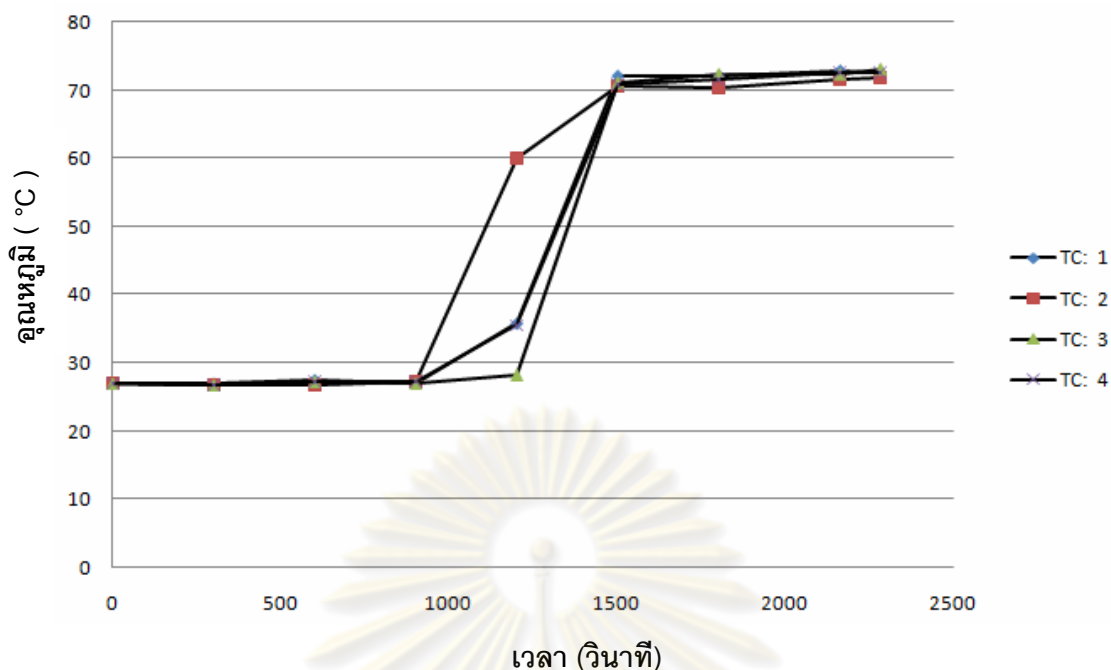
4.2.2 การทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังด้านร้อน

จัดระบบแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำร้อนให้ไหลเวียนตามธรรมชาติในลููปปิดสนิทที่ กำลังไฟฟ้า 3 kW และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (TC) บนบริเวณผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 4 ตำแหน่ง คือ TC1, TC2, TC3, และ TC4 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลจะส่งเข้าระบบวัดและประมวลด้วยโปรแกรมบันทึกข้อมูลต่อเนื่องโดยคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มบันทึกข้อมูลตั้งแต่เริ่มต้มน้ำในระบบผลิตน้ำร้อน จนกระทั่งเวลาผ่านไป 40 นาที ได้ผลทดลองดังตารางที่ ง.1 (ในภาคผนวก) ซึ่งนำมาสร้างกราฟการตอบสนองและการกระจายอุณหภูมิบนผนังด้านร้อนในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 การจัดระบบการตอบสนองการกระจายอุณหภูมิบนผนังด้านร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการตอบสนองและการกระจายอุณหภูมิบนผนังด้านร้อน

ผลการทดลองพบว่าผนังด้านร้อนแต่ละบริเวณที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล มีการตอบสนอง และการกระจายของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยจะเห็นว่าจุด TC2 มีการตอบสนองของอุณหภูมิได้เร็วกว่า เพราะใกล้กับบริเวณที่น้ำร้อนเข้ามากที่สุดและ TC2 เป็นจุดที่อยู่สูงกว่าจุดอื่นๆ โดยธรรมชาติอุณหภูมิความร้อนจะลอยตัวขึ้นด้านบน ส่วน TC3 มีการตอบสนองของอุณหภูมิน้อยที่สุด เพราะเป็นจุดที่อยู่ต่ำสุด จุดที่ TC1 ตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ดีกว่า TC4 เพียงเล็กน้อยเพราะอยู่ในระนาบเดียวกัน มีการกระจายของอุณหภูมิตั้งแต่ผิวความร้อนเฉลี่ย 74°C

ในการจัดระบบแลกเปลี่ยนความร้อนไหลเวียนตามธรรมชาติแบบปิดสนิทนี้ จะมีปัญหาเรื่องของฟองอากาศและการขยายตัวของน้ำที่คอยต้านการไหลของน้ำในระบบทำให้น้ำร้อนในระบบไหลเวียนไม่ต่อเนื่อง เป็นผลให้การกระจายของอุณหภูมิตั้งแต่ผนังด้านร้อนไม่สม่ำเสมอ ทำให้ระบบแบบนี้ไม่เสถียรและส่งผลให้มีแรงดัน (Pressure) สูงมากกว่า 10 psi เป็นปัญหาในเรื่องความปลอดภัยขณะใช้งาน การจัดระบบให้ไหลเวียนต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่ด้านทางออก

ดังนั้นจึงได้ทำการจัดระบบไหลเวียนของน้ำร้อนตามธรรมชาติในรูปแบบที่เปิดให้น้ำร้อนขยายตัวสามารถพักเก็บไว้ที่ถังสำรองน้ำ (Reservoir) มีลักษณะเป็นระบบไหลเวียนตามธรรมชาติแบบเทอร์โมไซฟอนรีบอยเลอร์ (Thermosyphon reboiler) เป็นผลให้ระบบไม่มีความดันในระบบต่ำกว่าระดับ 1-3 psi และน้ำร้อนในระบบสามารถหมุนเวียนได้อย่างต่อเนื่องอีกด้วย ระบบที่ปรับปรุงใหม่นี้จะทดสอบในข้อ 4.3 และใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

4.3 การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อน

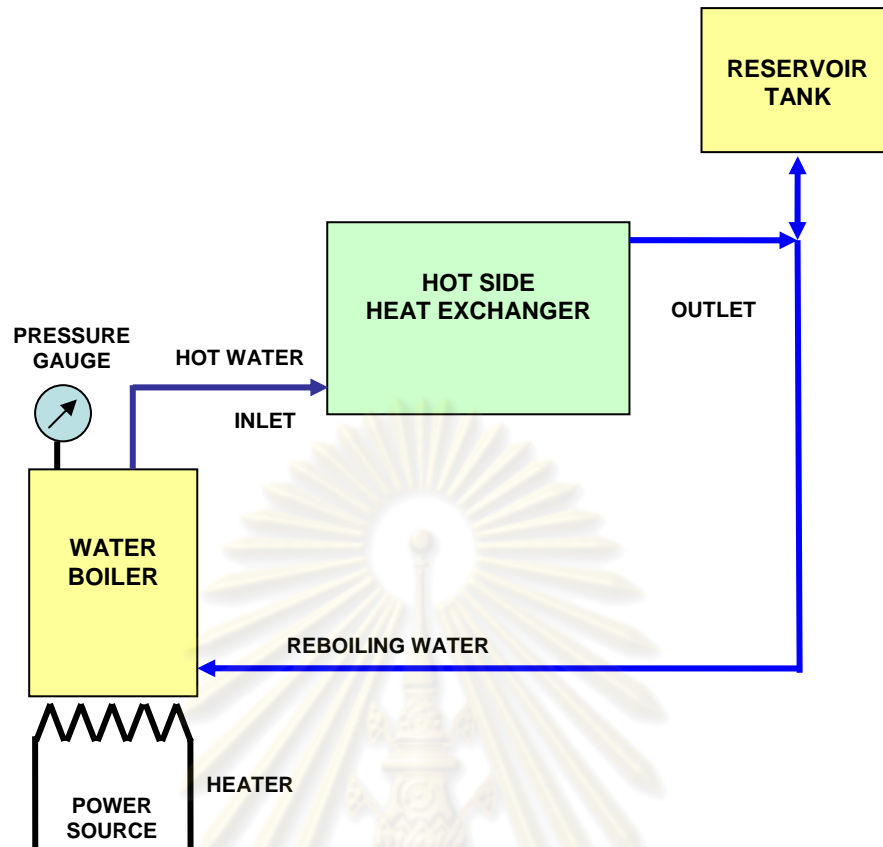
การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยการไหลเวียนของน้ำร้อนตามธรรมชาติที่พัฒนาขึ้น เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณลักษณะของระบบในการผลิตน้ำร้อนด้วยหม้อต้มน้ำและทิศทางการไหลเวียนของน้ำร้อน การขยายตัวของน้ำในถังสำรองและการถ่ายเทความร้อนให้ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ความร้อนด้านร้อน ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทำงานของระบบเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อน

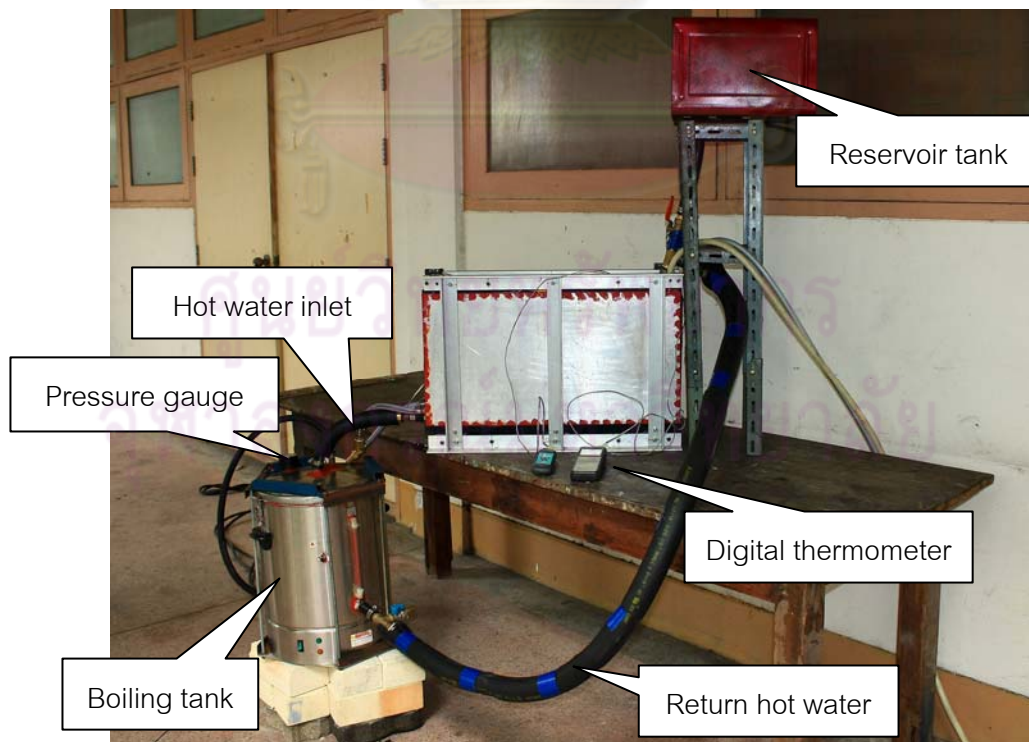
1. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนที่พัฒนาขึ้น
2. ระบบผลิตน้ำร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนขนาด 6,000 วัตต์ ที่พัฒนาขึ้น
3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type k (Chromel – Alumel) จำนวน 5 ชุด
4. เครื่องวัดอุณหภูมิจำนวน ของ LINE SEIKI รุ่น TC - 1100 จำนวน 1 ชุด
5. มาตรวัดพลังงานไฟฟ้า (Kilowatt-hour meter)

4.3.2 วิธีการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อน

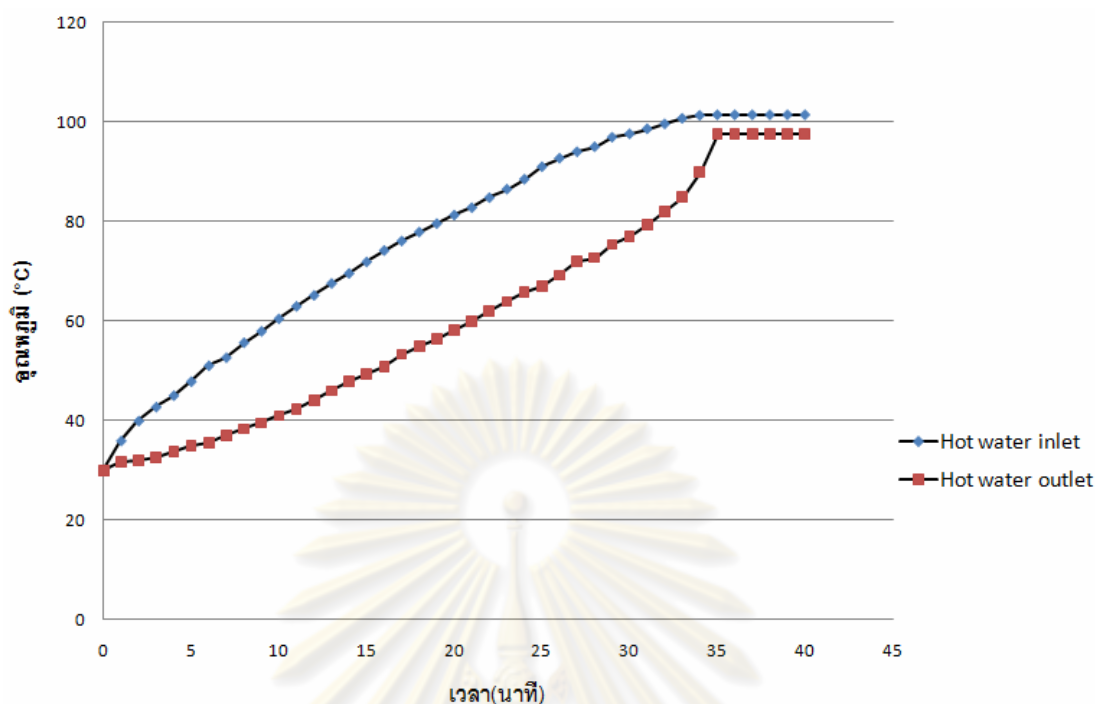
จัดระบบทดสอบตามรูปที่ 4.6 และเติมน้ำเข้าระบบด้วยการอัดน้ำเข้าทางด้านไหลกลับน้ำร้อนที่หม้อต้มน้ำ เพื่อให้ได้อากาศในระบบออกจนกระทั่งระดับน้ำเริ่มเห็นได้ที่ก้นถังสำรองน้ำ (Reservoir) ระบบไหลเวียนแบบปิดนี้จะเปิดปากถังสำรองเพื่อไม่ต้องการให้มีแรงดันในหม้อต้มสูงเกิน 10 psi จากนั้นจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเพื่อต้มน้ำพร้อมวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ความดันในหม้อต้มและพารามิเตอร์อื่นๆ ได้ผลการทดลองได้ผลการเพิ่มอุณหภูมิดังตารางที่ ง.2 (ในภาคผนวก) ซึ่งนำมาสร้างเส้นกราฟอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ในรูปที่ 4.8 และผลสรุปการทดสอบพารามิเตอร์ในการผลิตน้ำร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนที่พัฒนาขึ้นในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 แผนภาพการจัดระบบเพื่อทดสอบผลิตน้ำร้อน



รูปที่ 4.7 การจัดระบบทดสอบผลิตน้ำร้อน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิการผลิตน้ำร้อนไหลดวียนระบบปิด

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ในการผลิตน้ำร้อนของระบบผลิตน้ำร้อน

พารามิเตอร์	ข้อมูลจากการทดสอบ
เวลาในการต้มน้ำปริมาณ 36 ลิตร	35 min
พลังงานความร้อนที่โมดูลต้องการ	9.91 MJ
อุณหภูมิทางเข้า	100 -102 °C
อุณหภูมิทางออก	80 -98 °C
แรงดันในหม้อต้มน้ำ	2 - 3 psi
ปริมาณขยายตัวของน้ำ	8 liters
สถานะของน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	Liquid/vapor

ผลการทดลองพบว่าการผลิตน้ำร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนเป็นไปตามเทคนิคการไหลดวียนของน้ำร้อนตามธรรมชาติ สิ่งสำคัญคือการจัดสมดุลของระดับอุณหภูมิ โดยระยะเวลาในการต้มน้ำที่อุณหภูมิแวดล้อมถึงอุณหภูมิน้ำทางเข้า 102 °C และอุณหภูมิทางออก 98 °C ใช้เวลา 30 นาที เป็นผลให้มีอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยที่ 100°C มีแรงดันในหม้อต้มน้ำประมาณ 2-3 psi ความร้อนที่ได้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนมีสถานะเป็นน้ำและไอน้ำ

4.4 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้น

การทดสอบสมรรถนะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้น เพื่อศึกษา ค่าพารามิเตอร์ทางความร้อนและทางไฟฟ้า ในการทดสอบทางไฟฟ้าจะทดสอบทั้งไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้และไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตผ่านระบบแปลงผันไฟฟ้า (Inverter) โดยเริ่มบันทึกข้อมูล หลังระบบผลิตน้ำร้อนเสถียร มีรายละเอียดการทดลองดังนี้

4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของเครื่อง

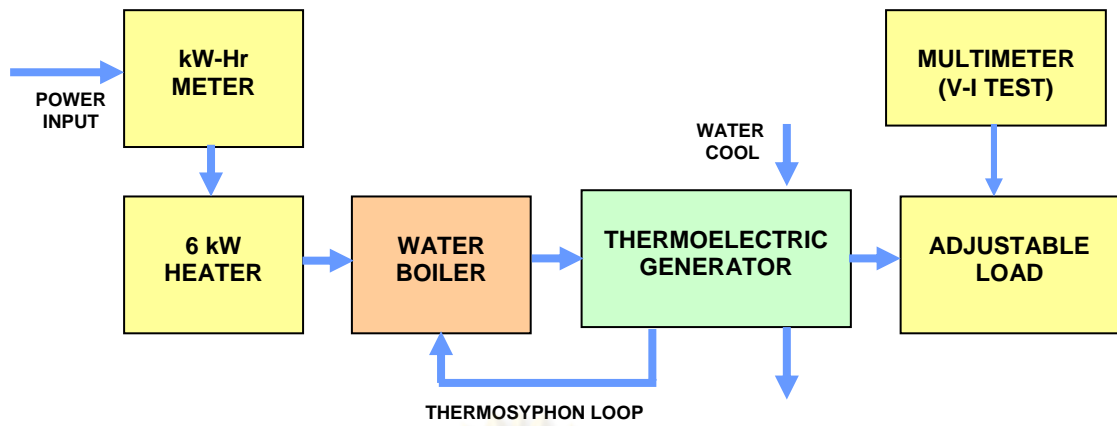
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้น
2. ระบบผลิตน้ำร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนขนาด 6,000 วัตต์ ที่พัฒนาขึ้น
3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type k (chromel – alumel) จำนวน 4 ชุด
4. เครื่องวัดอุณหภูมิจำนวน ของ LINE SEIKI รุ่น TC - 1100 จำนวน 1 ชุด
5. ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ ของ OMEGA รุ่น OMEGAETTE HHM93 จำนวน 1 ตัว
6. หลอดไฟฟ้าแบบไส้ขนาดกำลังไฟฟ้าต่างๆ 1 ชุด
7. มาตรวัดพลังงานไฟฟ้า (Kilowatt-hour meter)

4.4.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่อง

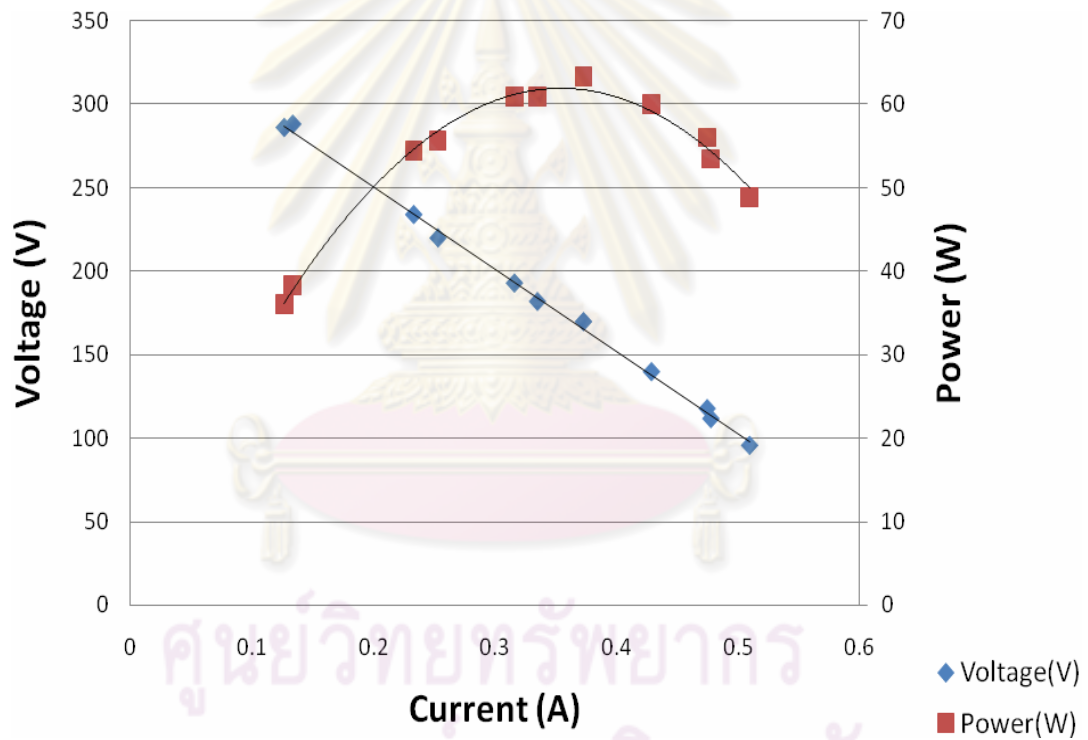
จัดระบบทดสอบตามรูปที่ 4.9 บ่อน้ำร้อนเข้าระบบและรอให้ระบบเสถียรเป็นเวลา 30 – 35 นาที บันทึกค่าคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร รวมทั้งค่าความต้านทานภายในของเซลล์ความร้อน เป็นต้น จากนั้นแปรเปลี่ยนค่าต้านทานโหลด และบันทึกความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าใน 2 กรณี

ก. การทดสอบผลทางไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้เป็นไปตามข้อมูลความสัมพันธ์ดังตารางที่ 3 ในภาคผนวก ง. และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.10 อ่านค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเส้นกราฟ ได้ข้อมูลสรุปในตารางที่ 4.3

ข. การทดสอบผลทางไฟฟ้าในการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตผ่านระบบแปลงผันไฟฟ้า (Inverter) ได้ผลการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 แผนภาพการจัดระบบทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์	ข้อมูลจากการทดสอบ
ผลต่างอุณหภูมิ ΔT ระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็น ($^{\circ}\text{C}$)	50
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูล (W)	62
แรงดันไฟฟ้าที่กัลังไฟฟ้าสูงสุด (V)	163
กระแสไฟฟ้าที่กัลังไฟฟ้าสูงสุด (A)	0.376
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด (V)	335
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)	0.75
ความต้านทานภายในของโมดูล (Ω)	420

ตารางที่ 4.4 ผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ

โหลดทางไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (Vdc)	แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ (Vac)
5	290	199
10	280	203
25	273	205
50	170	211
60	131	201
> 60	< 130	fault alarm

ผลการทดสอบสรุปเบื้องต้นได้ดังนี้

1. ผลการผลิตไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 62 W ซึ่งน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ คือ 100 W เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิผนังเซลล์ความร้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ ได้ความแตกต่างเพียง 50°C

2. ผลการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับผ่านระบบแปลงผันไฟฟ้า พบว่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในย่านที่ระบบสวิตซิ่งจะสามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางออกให้คงที่ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ใช้ งาน ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจากผลการทดสอบระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เปลี่ยนแปลงไม่เกิน $220\text{ V} \pm 10\%$ โดยสามารถขับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับได้ สูงสุด 50 W เมื่อคำนวณประสิทธิภาพของชุดแปลงผันไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นจะได้

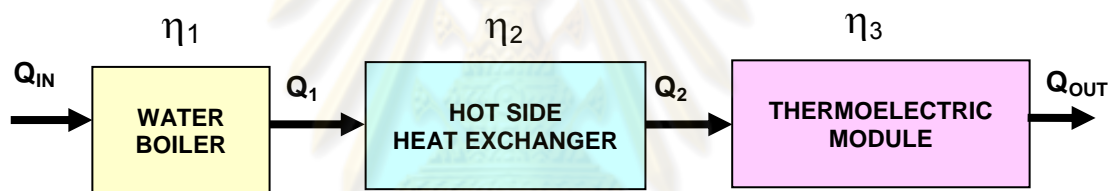
$$\text{ประสิทธิภาพชุดแปลงผันไฟฟ้า} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าทางออก}}{\text{กำลังไฟฟ้าทางเข้า}} = \frac{50W_{ac}}{62W_{dc}} \times 100\% = 80\%$$

4.5 ประเมินราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน

ในการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างงานวิจัยที่พัฒนาไว้เดิมที่กำลังผลิต 50 W และที่พัฒนาขึ้นใหม่ที่กำลังผลิต 100 W จะใช้ข้อมูลที่ทดลองได้ใหม่ในการประเมิน กำลังการผลิตไฟฟ้า ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน เป็นต้น โดยมีรายละเอียดการประเมินดังนี้

4.5.1 การคำนวณประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า

ประเมินจากขั้นตอนการป้อนปริมาณความร้อนเข้าระบบตามแผนรูปที่ 4.11 ด้วยการใช้อัตราประสิทธิภาพของอุปกรณ์และกระบวนการถ่ายเทความร้อนประกอบการวิเคราะห์ ดังนี้



รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

$$\text{ประสิทธิภาพของระบบ } (\eta_{\text{total}}) = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$$

η_1 = ประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อน

η_2 = ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

η_3 = ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

การผลิตน้ำร้อนจากการต้มน้ำจำนวน 36 ลิตร จากอุณหภูมิ 30 °C ให้มีอุณหภูมิ เป็น 101.4 °C (T_{in}) ใช้เวลาต้มน้ำ 30 นาที ปริมาณความร้อนของชุดเซลล์ความร้อนทั้งหมด (Q_1) 5,504.53 W_{th} (จากข้อที่ 3.2.3) ใช้กำลังไฟฟ้า 6,000 W_e (Q_{in})

- จะได้ประสิทธิภาพการผลิตความร้อนด้วยไฟฟ้าคิดเป็น 91.74 %

การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อนจากน้ำร้อนภายในโมดูลเฉลี่ยประมาณ 100°C (ผลการทดลองที่ 4.2) และเมื่อความร้อนถูกถ่ายเทผ่านผนังแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิความร้อนเหลือประมาณ 90°C คิดเป็น 90% ของความร้อนที่ได้รับ

- จะได้การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพ 90%

- ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของชุดเซลล์ความร้อน (จากข้อ 3.2.3) เท่ากับ 1.53 %

ดังนั้น ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าทั้งระบบจะเท่ากับ

$$(0.917 \times 0.9 \times 0.0153) \times 100 = 1.26 \%$$

จากผลการวัดจริง กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เท่ากับ 62 W และ กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับระบบผลิตความร้อน 6 kW

ดังนั้น ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ เท่ากับ 1.03 %

4.5.2 การคำนวณต้นทุนต่อวัตต์

วัสดุและอุปกรณ์	จำนวน	จำนวนเงิน
เทอร์โมอิเล็กทริกคูเลเตอร์	192 แผ่น	57,600.00 บาท
อลูมิเนียมสำหรับสร้างโมดูลความร้อน	1 แผ่น	4,151.60 บาท
อลูมิเนียมสำหรับสร้างโมดูลระบายความร้อน	2 แผ่น	9,900.00 บาท
ฝาปิดโมดูลระบายความร้อน	2 แผ่น	2,100.00 บาท
โครงอลูมิเนียมสำหรับยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	1 เส้น	770.00 บาท
ชุดสกรูสำหรับประกอบโครงอลูมิเนียม	1 ชุด	150.00 บาท
สกรูหัวจมนเทเปอร์ SUS 5x40 ยึดโมดูลความร้อน	38 ตัว	228.00 บาท
สกรูสแตนเลส JF 3x10 ยึดฝาครอบ	66 ตัว	33.00 บาท
สกรูสแตนเลสยึด Fixer plate	192 ตัว	96 บาท
กาวปะเก็น	3 หลอด	270.00 บาท
ซิลิโคนประสานผิวถ่ายเทความร้อน	2 หลอด	813.20 บาท
ท่อยางทนความร้อน	1 เส้น	200.00 บาท
บอลล์วาล์วคัท 1/2	1 ตัว	256.50 บาท
ชุดข้อต่อทองเหลือง	1 ชุด	1,100.03 บาท
เข็มขัดรัดท่อ	1 ชุด	100.00 บาท
สายยางพลาสติกใส	20 เมตร	535.00 บาท

รวมเป็นเงินทั้งสิ้น 77,313.33 บาท

$$\text{ต้นทุนการผลิตโมดูล} = \frac{77,313.33}{62} = 1,289 \text{ บาทต่อวัตต์}$$

4.5.3 การคำนวณราคาไฟฟ้าต่อหน่วย

จะประเมินจากต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยโมดูลเซลล์ความร้อนโดยไม่คิดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ผลิตความร้อน เนื่องจากแหล่งความร้อนในสภาพใช้งานจริงเป็นแหล่งความร้อนเหลือทิ้งคิดระยะเวลาคุ้มทุน ตลอดอายุการใช้งานของเซลล์ความร้อนสูงสุดที่ 200,000 ชั่วโมง ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งเป็นดังนี้

หากทำงานต่อเนื่อง 200,000 ชั่วโมง

$$\text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)} = \frac{\text{cost}}{\text{time}} = \frac{1,289}{200,000} = 6.44 \text{ บาท/kWhr}$$

สรุปผลจากข้อมูลการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถประเมินผลเปรียบเทียบผลการพัฒนาดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการประเมินราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ประสิทธิภาพและต้นทุน

รายการข้อมูล	ระบบที่พัฒนาเดิม [11]	ระบบที่พัฒนาใหม่
กำลังไฟฟ้า	50 W	62 W
จำนวนเซลล์ความร้อน	384 cells	192 cells
แหล่งความร้อน	ไอน้ำ	น้ำร้อน
การระบายความร้อน	พัดลม	น้ำ
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า	0.47 %	1.03 %
ขนาด (กว้างxยาวxสูง) (1โมดูล)	20cm x 48cm x 20cm	12cm x 65cm x 45cm
จำนวนโมดูล	4	1
น้ำหนัก	120 kg	60 kg
ต้นทุนต่อวัตต์	2,500 บาท	1,289 บาท
ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย (ที่ 2 แส่นชั่วโมง)	12.50 บาท/kWhr	6.44 บาท/kWhr

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำและการทดลองในขั้นตอนการดำเนินงานได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบกับงานวิจัยเดิม [11] ที่เคยพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่ระบายความร้อนด้วยอากาศไว้ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดโมดูลเซลล์ความร้อนดัดแปลงที่สร้างขึ้นใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric cooler) เบอร์ TEC 1-12710 ต่ออันดับกัน 24 ตัว ที่มีแหล่งความร้อนเดียวกัน และใช้ระบบระบายความร้อนต่างกันแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการระบายความร้อนด้วยน้ำสูงกว่าการระบายด้วยอากาศมากและช่วยให้ชุดเซลล์ความร้อนผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมากกว่าประมาณ 4 เท่า

5.1.2 ผลการพัฒนาแหล่งความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการผลิตน้ำร้อนไหลเวียนตามธรรมชาติแบบย้อนกลับต้มใหม่ (Reboiling thermosyphon) ที่ปริมาตรน้ำ 36 ลิตร ขนาดกำลังไฟฟ้า 6 kW พบว่าต้องใช้ระยะเวลาการต้มน้ำ 30 นาที มีแรงดันในหม้อต้ม 1-2 psi และมีลักษณะถ่ายความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนจากสถานะเดือดกึ่งไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ ให้อุณหภูมิทางเข้า 102 °C ทางออก 98 °C เมื่อเทียบกับระบบเดิมที่ใช้ไอน้ำผลการกระจายความร้อน อุณหภูมิที่ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะแตกต่างกันมากกว่าแต่ใช้พลังงานน้อยกว่าและน้ำจะอยู่ในระบบปิด

5.1.3 การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้ตั้งเป้าหมายจากการคำนวณขยายสเกลไว้ที่ 100 W แต่ในการพัฒนาระบบในทางปฏิบัติผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียง 62 W และได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นพบว่ามีลักษณะเฉพาะดังนี้

ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า

ความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์เฉลี่ย	50	องศาเซลเซียส
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด	335	โวลต์
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	0.75	แอมแปร์

กำลังไฟฟ้าสูงสุด	62	วัตต์
แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด	163	โวลต์
กระแสไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด	0.376	แอมแปร์
ความต้านทานภายในโมดูล	420	โอห์ม
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ	1.03	เปอร์เซ็นต์
ระบายความร้อนด้วยน้ำในอัตรา	18	ลิตร/นาที่

ลักษณะเฉพาะทางกายภาพ

ขนาดพื้นที่หน้าตัด	65 x 45	ตารางเซนติเมตร
ความหนาของโมดูล	3.7	เซนติเมตร
น้ำหนักรวมของโมดูล	60	กิโลกรัม
ขนาดหัวต่อท่อทางเข้าน้ำร้อน	2.54	เซนติเมตร
ขนาดท่อระบายน้ำร้อนขาออก	2.54	เซนติเมตร
จำนวนเซลล์ความร้อน	192	เซลล์
อุณหภูมิแหล่งความร้อนเฉลี่ย	100	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ผิวน้ำเซลล์ด้านร้อนเฉลี่ย	90	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ผิวน้ำเซลล์ด้านเย็นเฉลี่ย	40	องศาเซลเซียส
ต้องการปริมาณความร้อนของชุดเซลล์ความร้อน	5,504.53	วัตต์

5.1.4 จากการประเมินผลการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นใหม่ พบว่ามีกำลังการผลิตไฟฟ้า 62 วัตต์ต่อระบบ ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย 6.44 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง (เชื่อเพลิงได้เปล่า) ประสิทธิภาพสูงกว่างานวิจัยเดิมมากกว่า 100 % และมีราคาต้นทุน 1,289 บาท/วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้ใหม่กับงานวิจัยที่พัฒนาไว้เดิมที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 15 วัตต์/ระบบ ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย 12.5 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง (เชื่อเพลิงได้เปล่า) และต้นทุน 2,500 บาท/วัตต์

5.2 วิจัยนัผลการวิจัย

5.2.1 จากการวิเคราะห์ผลการผลิตไฟฟ้าที่ไม่สามารถเป็นไปตามการออกแบบที่ 100 วัตต์ได้ เนื่องจากผลของการระบายความร้อนด้วยน้ำประปามีอัตราไหลไม่เพียงพอ จึงทำให้ความแตกต่างอุณหภูมิผิวน้ำเซลล์ความร้อน (ΔT) ไม่ถึงค่าที่คาดหวัง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบ

ประสิทธิภาพของระบบกับงานวิจัยเดิมที่ระบายความร้อนด้วยพัดลมแล้ว ยังคงให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เท่า หรือ 100%

5.2.2 การผลิตน้ำร้อนระบบไหลเวียนตามธรรมชาติ ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายให้กับเครื่องสูบลม และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนผลิตน้ำเป็นไอน้ำในงานวิจัยเดิม พบว่าการต้มน้ำให้เดือดกลายเป็นไอใช้พลังงานมากกว่า และต้องปล่อยน้ำที่เกิดจากการควบแน่นทิ้งโดยเปล่าประโยชน์

5.2.3 ระบบที่พัฒนาขึ้นใหม่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ใช้พื้นที่น้อยลงมาก ราคาต้นทุนต่อวัตต์ลดลง แต่มีน้ำหนักต่อวัตต์ค่อนข้างสูง การพัฒนาระบบแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งด้านผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของเซลล์ความร้อนยังคงเป็นประเด็นปัญหาที่ต้องปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การระบายความร้อนด้านเย็น ควรมีการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบ Absorption ที่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำยาด้วยความร้อนเหลือทิ้ง จะทำให้ได้ความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์ความร้อนสูงขึ้น โดยไม่ต้องพึ่งระบบน้ำใช้ในกิจวัตร

5.3.2 แหล่งผลิตน้ำร้อนหากไม่ใช้กับความร้อนเหลือทิ้ง สามารถใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต้มน้ำร้อนด้วยเตาเผาชนิด Cross-Draft Gasifier แทนการเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์

5.3.3 จากข้อมูลการประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่อาศัยกระบวนการยอนกัลป์การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ พบว่าขณะนี้ยังมีต้นทุนสูงอยู่ แต่ในอนาคตเชื่อว่าต้นทุนจะลดลงเนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ ซึ่งจะมีผลให้ระยะเวลาคุ้มทุนจะสั้นลงด้วย

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Hagelstein, Peter L. Thermal to electric energy conversion. Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2006.
- [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. Kanazawa University, Kanazawa Japan, 2003.
- [3] Bass, J.C., Elsner, N.B. and Leavitt, F.A. Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines. Kansas City: Hi-Z Technology Inc, 1992.
- [4] สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และคณะ. รายงานฉบับสมบูรณ์ งานศึกษาวิเคราะห์ศักยภาพทางเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนเหลือทิ้งขนาด 100 วัตต์. ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ธันวาคม 2549.
- [5] Jensen, K., Messick, D. and Verzosa, J. Thermoelectric Generator. Final Report April 28, 2010.
- [6] Ferrotec. Thermoelectric Technical Reference - Introduction to Thermoelectric Cooling Materials. [online]. Available from: <http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef01/> [2008, March]
- [7] Chuen, C. Radiological Materials in Russia. Senior Research Associate Center for Nonproliferation Studies, July 2004.
- [8] Ferrotec. Thermoelectric Technical Reference — Basic Principles of Thermoelectric Materials. [online]. Available from: <http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef02.php> [2008, March]
- [9] Michael, J. Moran. Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

- [10] Perry, Robert H., and Green, Don W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6th ed. New York City,: McGraw-Hill., 1984.
- [11] Punnachaiya, S., Kovitcharoenkul, P., and Thong-aram, D. Development of low grade waste heat thermoelectric power generator. Songklanakarin J. Sci. Technol. 32 (3) (May - Jun. 2010): 307-313.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

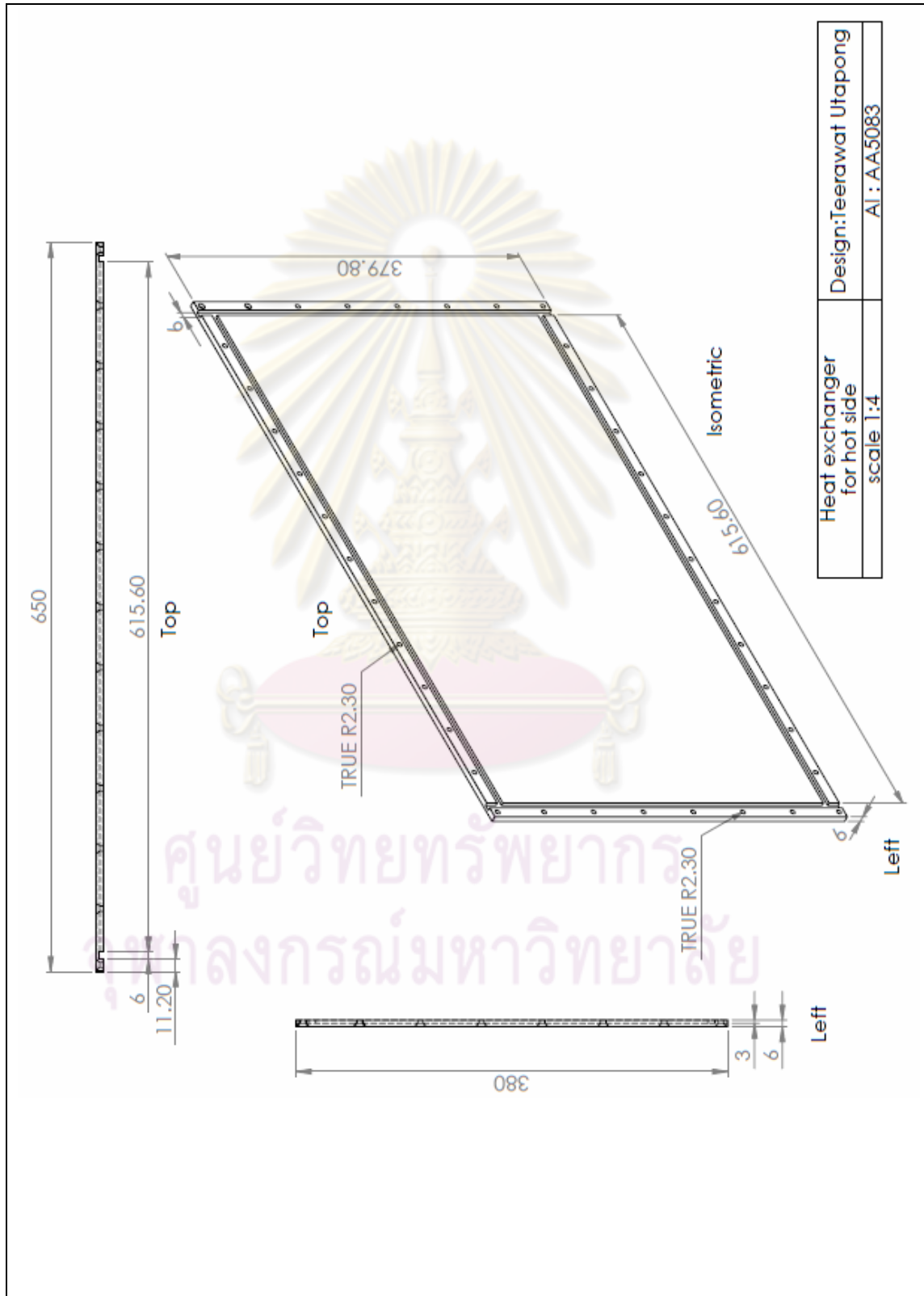


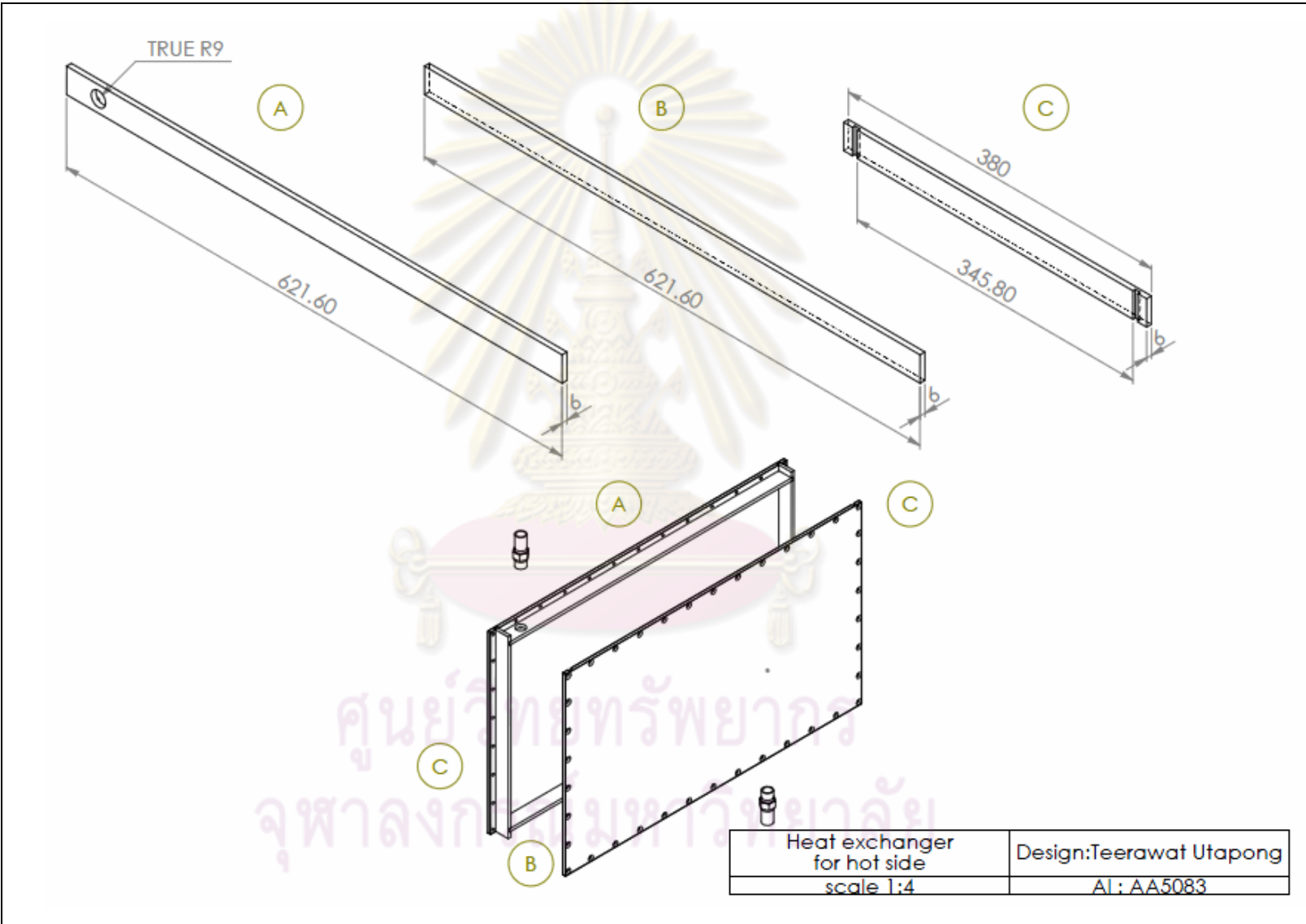
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.
แบบประกอบอุปกรณ์ชิ้นส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

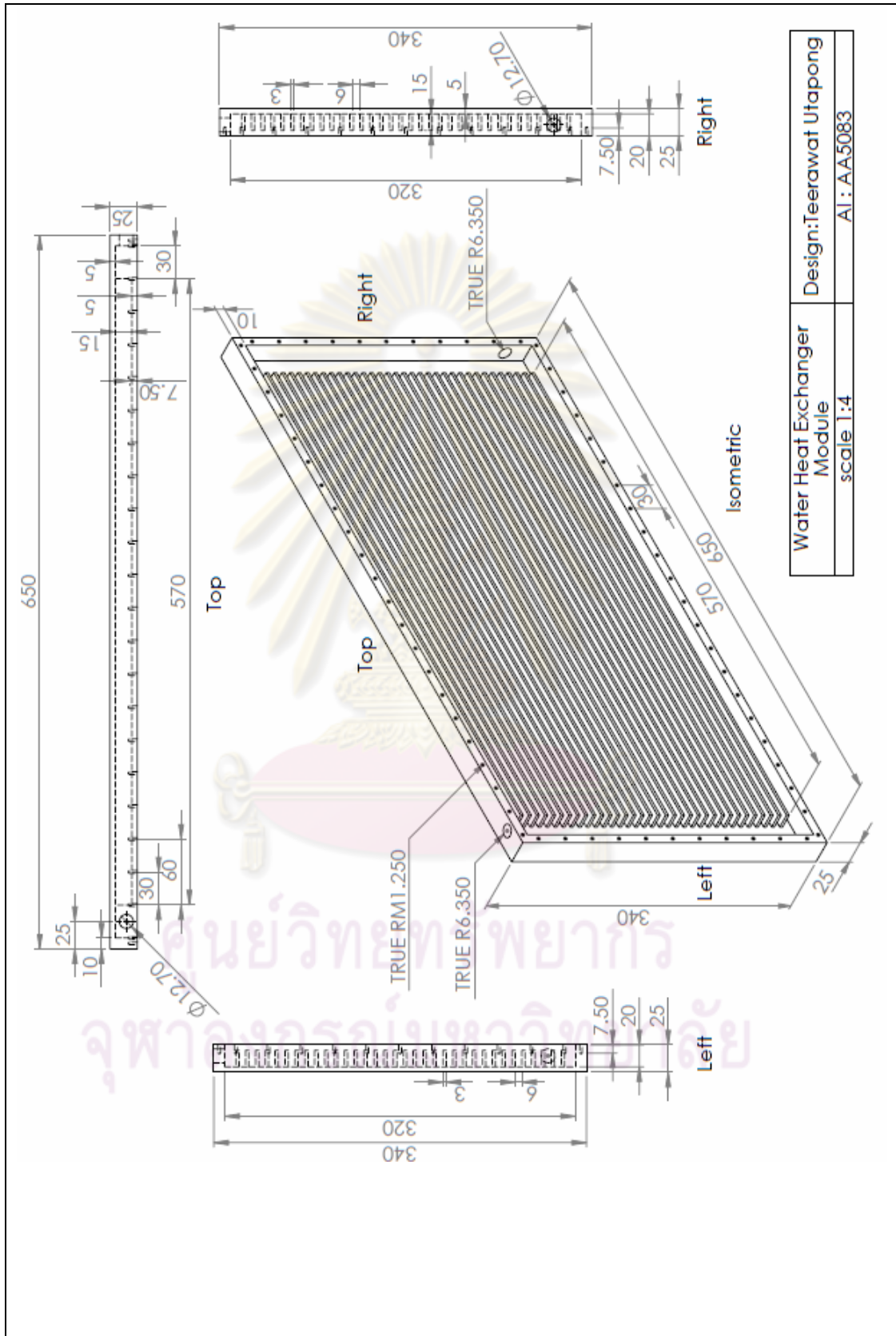
1. ชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

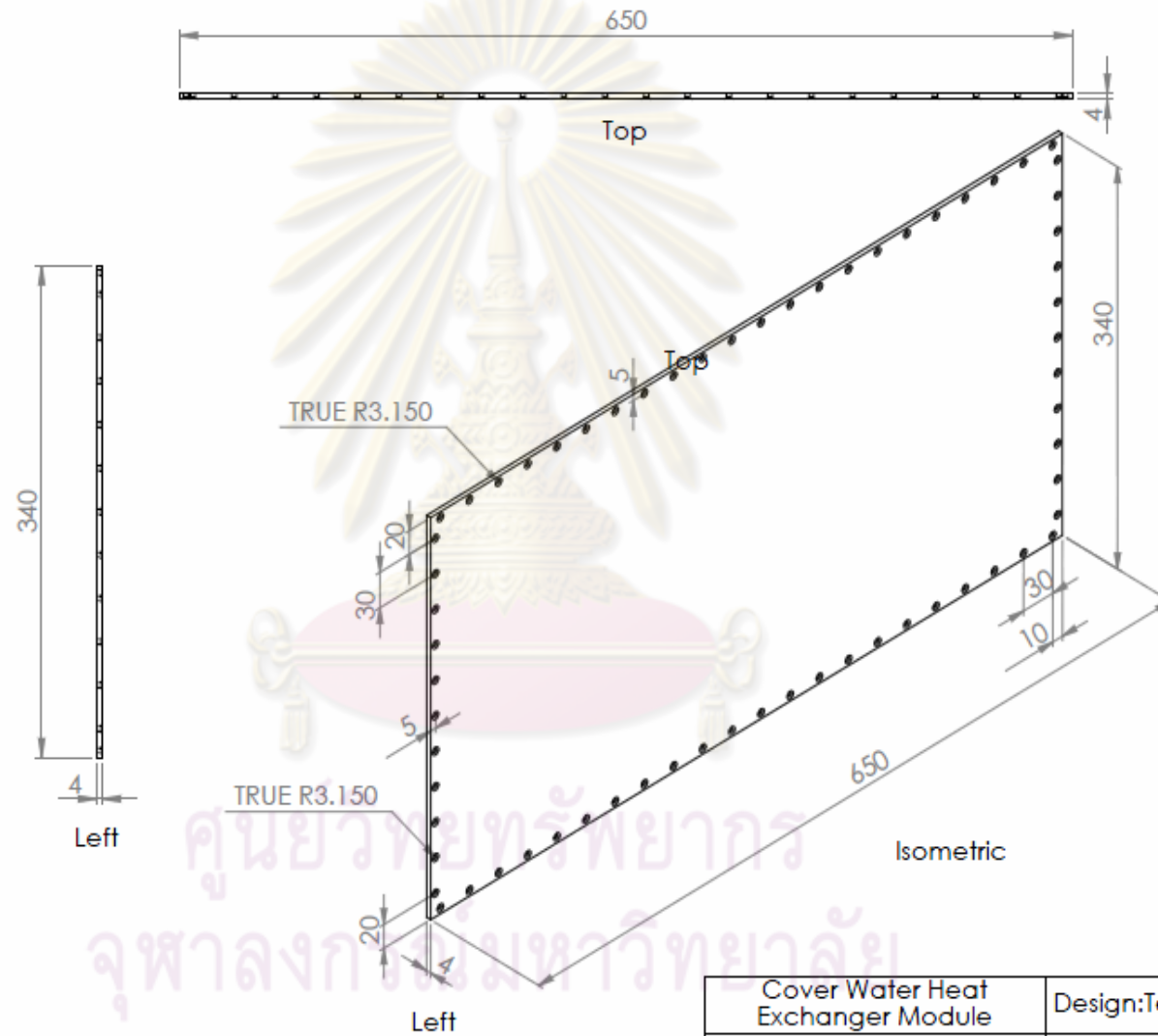




Heat exchanger for hot side scale 1:4	Design:Teerawat Utapong AI: AA5083
---	---------------------------------------

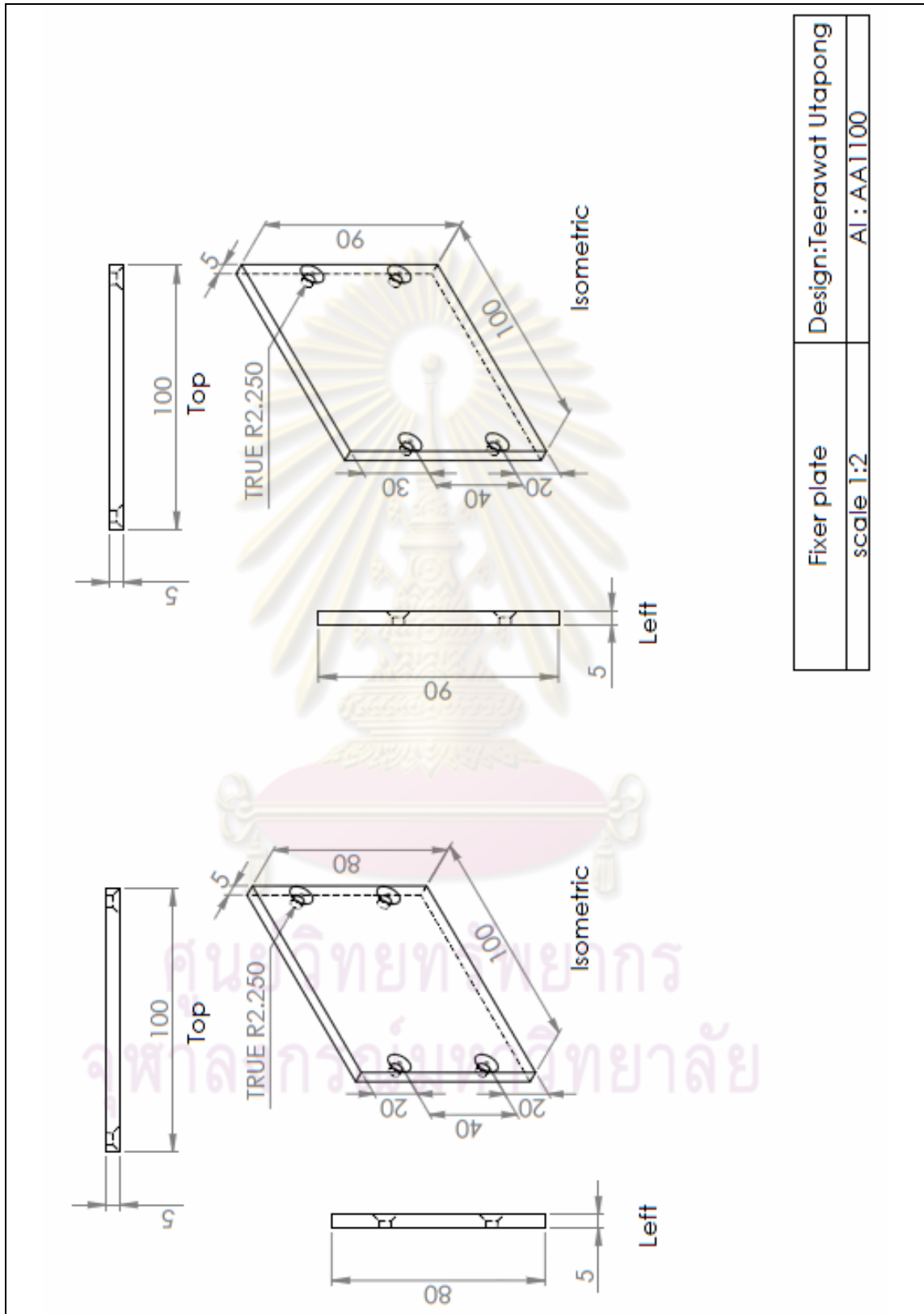
2. ชั้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น





Cover Water Heat Exchanger Module	Design:Teerawat Utapong
scale 1:4	AI : AA1100

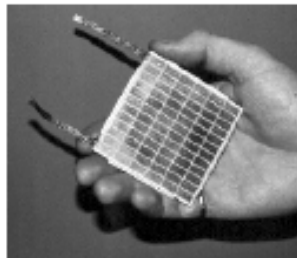
3. ชิ้นส่วนแผ่นยึดเซลล์ความร้อน



ภาคผนวก ข.

คุณลักษณะของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

1. เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์



HZ-20 Thermoelectric Module

Uses Bismuth Telluride Based Semiconductors

Solid State Conversion of Heat To Electricity

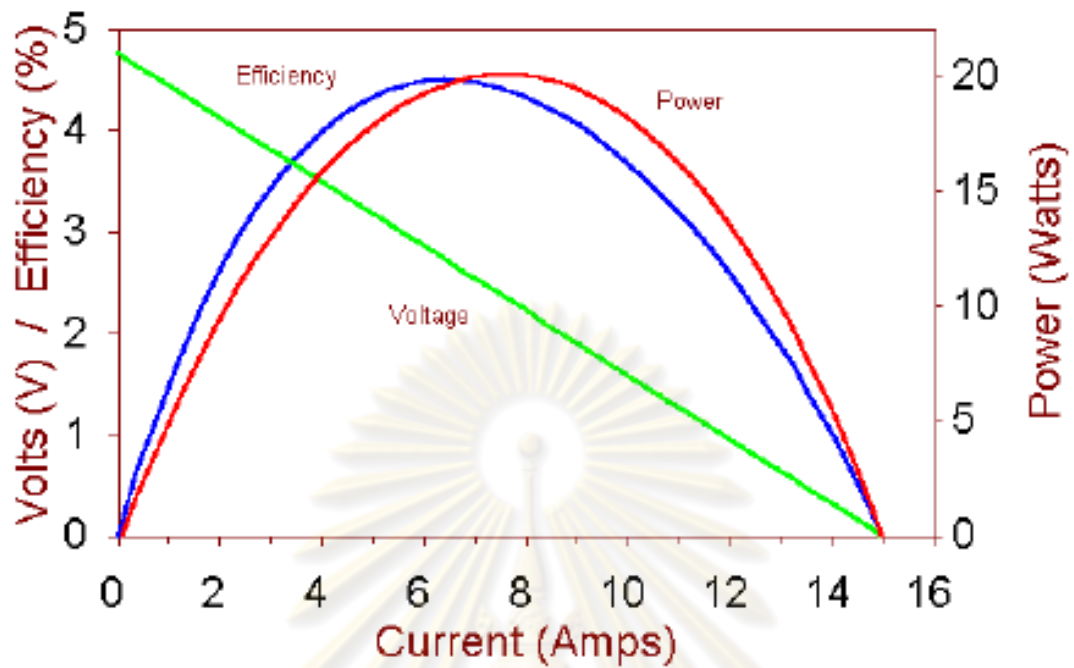
Properties of the 19 Watt Module, HZ-20

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	-----
Thermal Properties		
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
Electrical Properties (as a generator)*		
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

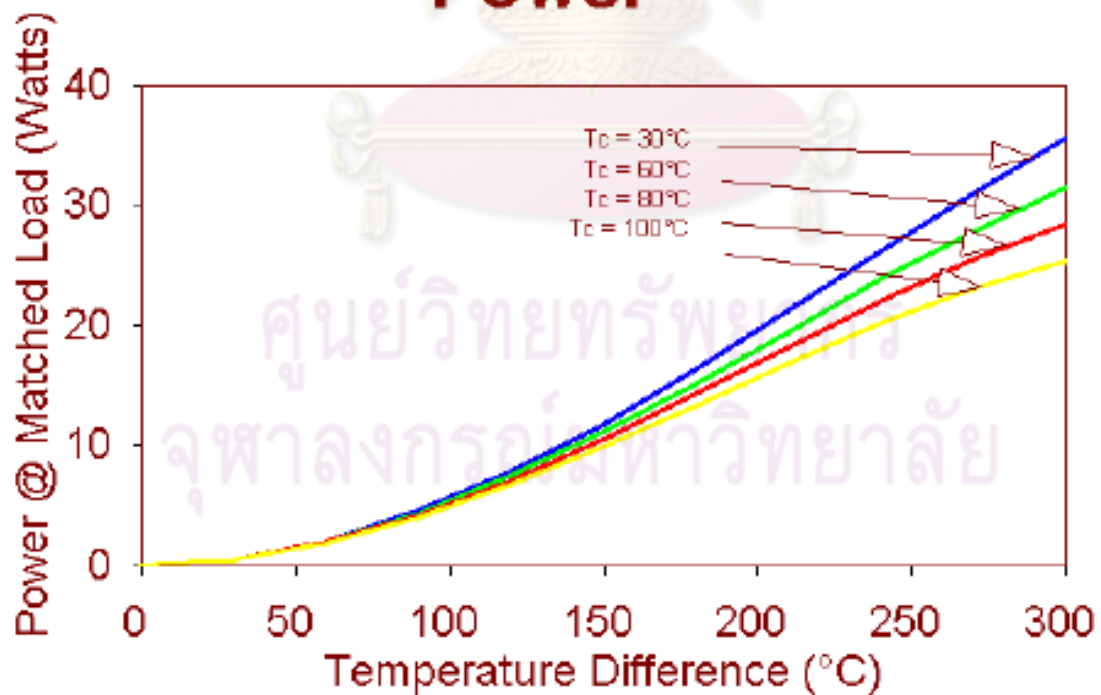
* At Design Temperatures

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

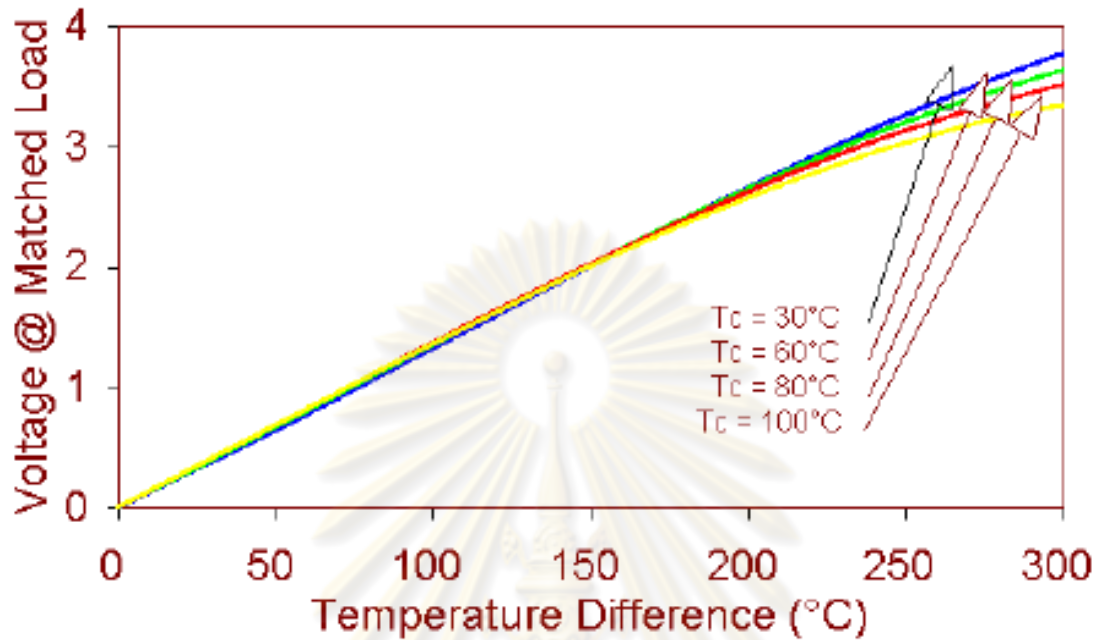
Current - Voltage Curves



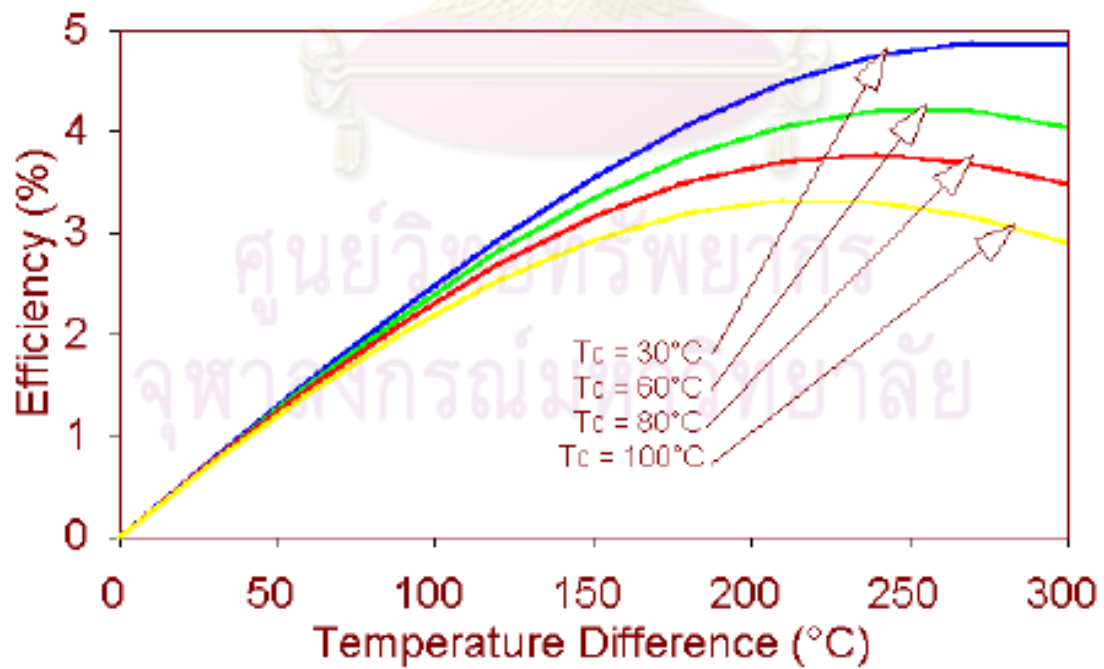
Power



Voltage



Efficiency



2. เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์



Thermoelectric Cooler

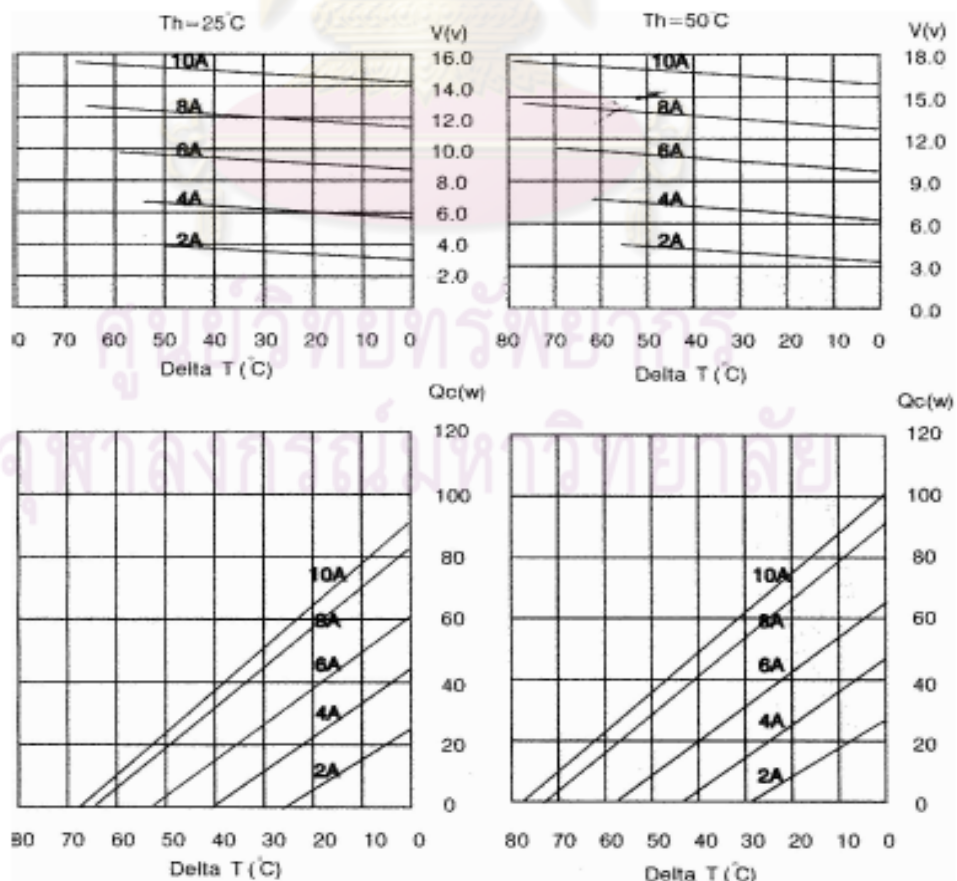
TEC1-12710

Performance Specifications

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

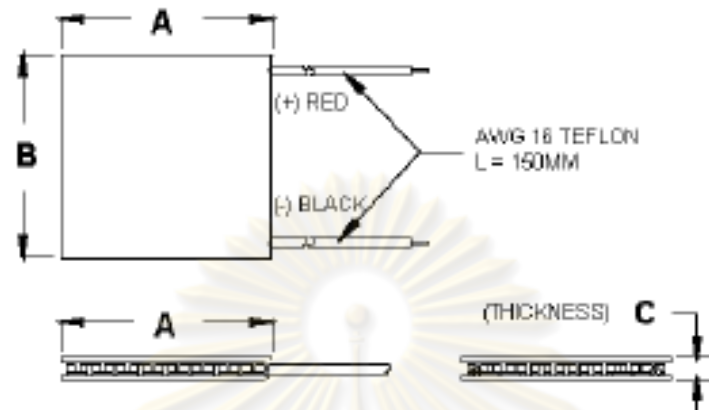


TEC1-12710





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.

คุณสมบัติของอลูมิเนียมอัลลอย เบอร์ AA5083

AA 5083

Category	Aluminum Alloy
Class	Wrought

Composition

Element	Weight %
Al	94.7
Mn	0.7
Mg	4.4
Cr	0.15

Mechanical Properties

Properties		Conditions	
		T (°C)	Treatment
Density ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	2.66	25	
Poisson's Ratio	0.33	25	
Elastic Modulus (GPa)	70-80	25	
Tensile Strength (Mpa)	305	25	H112 more
Yield Strength (Mpa)	195		
Elongation (%)			
Reduction in Area (%)			
Shear Strength (MPa)	170	25	O
Fatigue Strength (MPa)	160	25	H321

Thermal Properties

Properties		Conditions	
		T (°C)	Treatment
Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	23.4	20-100	
Thermal Conductivity (W/m-K)	120	25	All

Electric Properties

Properties		Conditions	
		T (°C)	Treatment
Electric Resistivity ($10^{-9}\Omega\text{-m}$)	60	25	All

ภาคผนวก ง.

ผลการทดสอบการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้ง
พร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ

ตารางที่ ง. 1 การตอบสนองและการกระจายอุณหภูมิบนผนังด้านร้อน

Time(s)	TC: 1	TC: 2	TC: 3	TC: 4
0	27	27	27	27
300	27	26.75	26.75	26.75
600	27.5	26.75	27.25	27.25
900	27	27.25	27	27.25
1200	35.75	60	28.25	35.5
1500	72	70.5	71	70.75
1800	72	70.25	72.25	71.5
2160	72.75	71.5	72.25	72.5
2280	72.5	71.75	73	72.5

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบระบบการผลิตน้ำร้อนไหลเวียนระบบปิด

Time (S)	H1 (Hot Water inlet)	H2 (Hot Water outlet)
0	30	30
1	36	31.8
2	40	32.1
3	42.8	32.7
4	45.1	33.8
5	47.9	35
6	51.1	35.7
7	52.7	37.1
8	55.7	38.4
9	58	39.6
10	60.5	41.1
11	63	42.4

ตารางที่ ง.2 (ต่อ)

12	65.2	44.1
13	67.6	46.1
14	69.6	47.9
15	71.9	49.4
16	74.2	51
17	76.1	53.4
18	77.9	55
19	79.6	56.6
20	81.3	58.2
21	82.8	60
22	84.8	62.1
23	86.5	64
24	88.5	65.9
25	91	67
26	92.7	69.3
27	94	72
28	95	72.8
29	96.9	75.5
30	97.6	77
31	98.6	79.4
32	99.6	82
33	100.7	85
34	101.3	90
35	101.4	97.7
36	101.4	97.7
37	101.4	97.7
38	101.4	97.7
39	101.4	97.7
40	101.4	97.7

ตารางที่ ง.3 ทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

Lamp load (W)	Voltage (Vdc)	Current (A)	Power (W)
10	288	0.1332	38.3616
25	286	0.1262	36.0932
50	234	0.233	54.522
60	220	0.253	55.66
75	193	0.316	60.988
85	182	0.335	60.97
100	170	0.373	63.41
125	140	0.429	60.06
150	118	0.475	56.05
160	112	0.478	53.536
185	96	0.51	48.96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากความร้อนเหลือทิ้ง
สำหรับการประยุกต์ใช้กับระบบผลิตน้ำร้อนให้กับการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรวัฒน์ อุทาพงษ์ เกิดวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อ ปี พ.ศ. 2550 และเข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ ปี พ.ศ. 2550



ศูนย์วิทยพัชการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย