ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247009

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก
โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งกรณีศึกษาระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ

นายธีรวัฒน์ อุหาพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b602 1966

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247009

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

นายธีรวัฒน์ อุทาพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5070305321

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

Mr. Teerawat Utapong

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	การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำพร้อมระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ
โดย	นายธีรวัฒน์ อุทาพงษ์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์เดโช ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต)

..... 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.

247009

ได้พัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ โดยใช้เซลล์ความร้อนซึ่งอาศัยกระบวนการทำงานย้อนกลับของอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 192 เซลล์ต่ออันดับกันบนผนังโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนทั้ง 2 ด้าน ด้านละ 96 เซลล์ ประกบด้วยโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น 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 เฮิรตซ์ พร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยตรงไม่ต้องพึ่งพาแบตเตอรีในการกักเก็บพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมซึ่งระบายความร้อนด้วยพัดลมพบว่ามีประสิทธิภาพผลิตไฟฟ้าสูงกว่า 2 เท่า ทำให้ต้นทุนลดลงเป็น 1,289 บาท/วัตต์

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..2553..... 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. 247009

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 สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์ 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 ทองเบ้า นิสิตปริญญาเอก ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำเรื่องระบบแลกเปลี่ยนความร้อนและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิ

ขอขอบคุณ คุณบุญนาถ บัวมีศิลป์ ช่างกลภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือกล

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอบขอบคุณ 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 ปรากฏการซีเบ็ค (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 คุณสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิลิเมนต์ 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 การประกอบอุปกณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน 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 การประกอบโมดูลผลิตไฟฟ้ากับอุปกณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น 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

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	Seebeck effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ	6
2.2	Peltier effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ	6
2.3	แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์	7
2.4	เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์ใช้ความร้อนจากไอโซโทปรังสี	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	แผนภาพระบบเทอร์โมไซฟอนแบบของไหลหมุนเวียนต้มซ้ำใหม่	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	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ได้รับความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของน้ำ	41
3.9	ฮีทเตอร์ขนาด 3,000 W ที่ติดตั้งเพิ่มภายในหม้อต้ม	43
3.10	การดัดแปลงหม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำร้อน	44
3.11	โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้น	44
3.12	การจัดเรียงเซลล์ความร้อนต่อแบบอนุกรมบนผิวพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	46
3.13	โมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบสมบูรณ์บนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังด้านเย็น	46

ภาพที่		หน้า
3.14	แผนภาพการติดตั้งระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติแบบเทอร์โมไซฟอน.....	47
3.15	ระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในลูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบขึ้น	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	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อนที่พัฒนาขึ้น.....	60
4.11	แผนภาพแสดงการประเมินประสิทธิภาพของระบบ.....	62