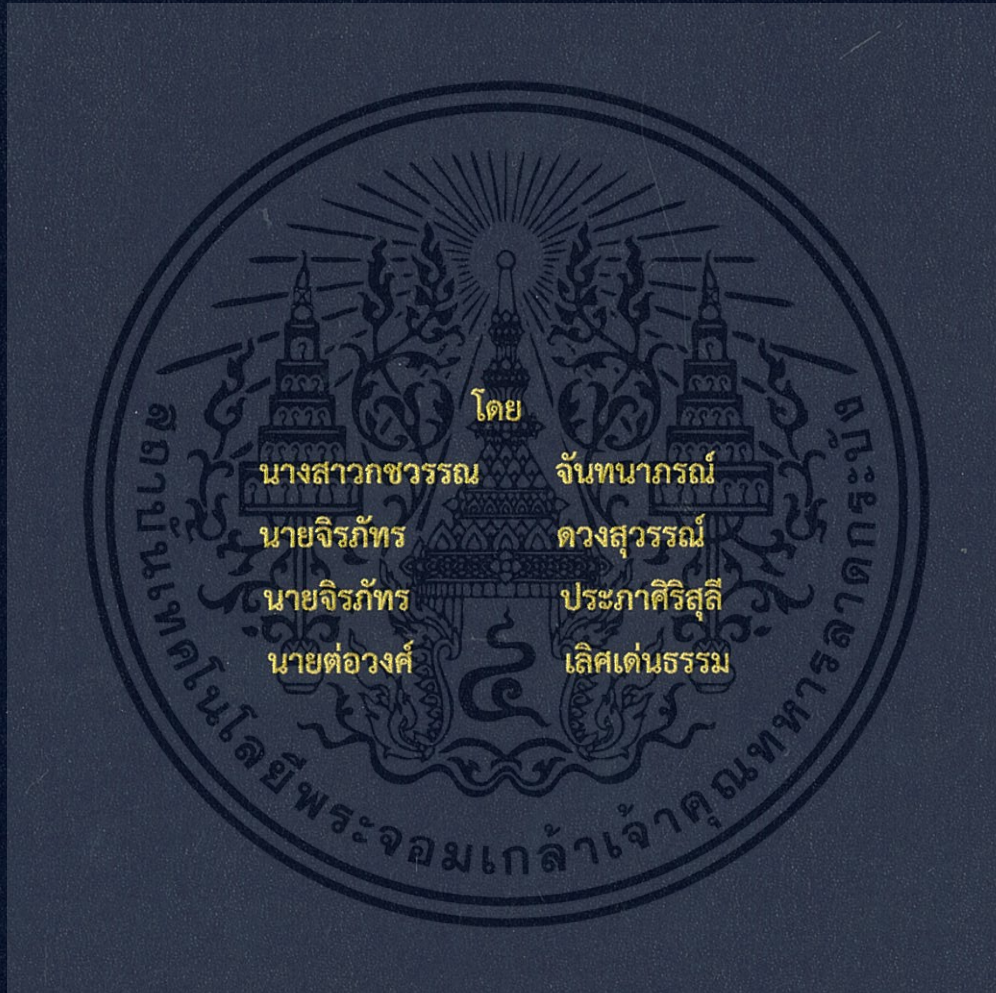


การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
ด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์
An Application of Thermoelectric Generator (TEG)
as Micro Power Generator from Waste Heat



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
ด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์
An Application of Thermoelectric Generator (TEG)
as Micro Power Generator from Waste Heat



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An Application of Thermoelectric Generator (TEG)
as Micro Power Generator from Waste Heat



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2017

ปีการศึกษา 2560

การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
ด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์
An Application of Thermoelectric Generator (TEG)
as Micro Power Generator from Waste Heat



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกชวรรณ จันทนาภรณ์
2. นาย จิรภัทร ดวงสุวรรณ
3. นาย จิรภัทร ประภาศิริสุลี
4. นาย ต่อวงศ์ เลิศเด่นธรรม



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรุช จิรสสุวรรณกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

นางสาวกชวรรณ จันทนาภรณ์

นาย จิรภัทร ดวงสุวรรณ

นาย จิรภัทร ประภาศิริสุลี

นาย ต่อวงศ์ เลิศเด่นธรรม

ผศ.ดร. นิรุช จิรสุวรรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์โมดูล และประยุกต์ใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากการใช้ความร้อนเหลือทิ้ง ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำ(ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส) การศึกษานี้เป็นการใช้วิธีการทดลองในการหาพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูลและ 4 โมดูล โดยจำลองอุณหภูมิด้านร้อนขึ้น บันทึกค่าเพื่อนำไปวาดกราฟพฤติกรรมของกระแส-แรงดัน และหาจุดที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจากกราฟ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 10 25 และ 35 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงระบบสำหรับที่จะใช้สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กให้ดีขึ้น เช่น การปรับปรุงระบบให้ความร้อน การปรับปรุงระบบระบายความร้อน เป็นต้น เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถผลิตไฟฟ้าในปริมาณที่มากพอที่จะจ่ายให้กับโหลดขนาดเล็กได้ โดยผลการทดลองที่ได้คือ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสระบบระบายความร้อนใช้พัดลมระบายอากาศร่วมกับฮีทซิงค์ สำหรับ 1 โมดูล และ 4 โมดูล ได้ค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็น 30 และ 180 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เกิดจากการต่ออนุกรมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 10 โมดูล ใช้ระบบระบายความร้อนแบบใช้น้ำหล่อเย็น สามารถให้ผลต่างอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยที่ใช้เครื่องจำลองอุณหภูมิชุดเดียวกัน ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เป็น 0.509 วัตต์ ซึ่งที่อุณหภูมินี้การทดลองจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถขับแผงโหลดแอลอีดี และชาร์ตแบตเตอรี่มือถือแบบชาร์จได้ จากการศึกษาสรุปได้ว่าที่ผลต่างอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น ใช้การต่ออนุกรมระหว่างโมดูลเพื่อการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า การเพิ่มเสถียรภาพของการผลิตไฟฟ้าสามารถเพิ่มได้จากการเพิ่มเสถียรภาพของอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านของแผ่นโมดูล และจุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดเฉพาะที่ค่าความต้านทานค่าหนึ่งๆตามกราฟคุณลักษณะเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An Application of Thermoelectric Generator (TEG) as Micro Power Generator from Waste Heat

Kotchawan Chantanaporn

Jirapat Duangsuwan

Jiraphatr Prapasirisulee

Torwong Lerddentam

Asst.Prof.Dr.Nirudh Jirasuwankul Advisor

ABSTRACT

This project is a study of Thermoelectric Generator module (TEG) to find characteristic of power generation and apply these devices to establish Micro Power Generator from waste heat. In this project, waste heat from low temperature (below 120°C) is designed as energy source. Experimentation has been performed to find characteristic by plot I-V Characteristic curve and its maximum power point of 1 module and 4 modules. A set of incandescent light bulbs was applied as thermal source to simulate the hot side temperature with different temperature of 10, 25 and 35 °C respectively. We use the result to analyze and improve system for establish Micro Power Generator (MPG) such as improve heating system and cooling system for transmit power to small scale electric load. The result shown that at different temperature 35 °C used cooling fan with heat sink for 1 module maximum power 30 mW and for 4 modules 180 mW. The MPG with 10 TEG modules using water cooling system at cold side gets different temperature 60°C while the same heating system. The maximum power 500 mW can drive 1 led strip and slow charging cell phone. The study indicated that at higher temperature the module generated more power. Get more power generation by series more modules. The stability of temperature both hot and cold side will improve stability of power generation and the maximum power point occurred at specific resistance following the curve.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถประสบความสำเร็จได้ด้วยดีนั้น ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. นิรุช จิรสวรรณกุล เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นต่างๆ ที่สำคัญและเป็นประโยชน์อย่างมาก อีกทั้งยังเกิดจากการทำงานด้วยความมูมานะ โดยอาศัยความร่วมมือกันของกลุ่มเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในด้านเครื่องมือการทดลอง คำแนะนำในการทดลอง และการใช้ห้องปฏิบัติการทดลอง รวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในเรื่องอื่นๆ ทุกๆท่าน

ท้ายสุดนี้ทางคณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านการศึกษา การเงิน รวมทั้งให้กำลังใจ ซึ่งทำให้โครงการนี้สามารถประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสในการจัดทำโครงการเพื่อนำความรู้ที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์จริง จึงขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	5
2.1.1 ทฤษฎี และหลักการทำงานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	5
2.1.2 วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริก	6
2.1.3 การใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	9
2.1.4 กราฟคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (TEG)	11
2.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	12
2.2.1 ฮีทซิงค์ หรือแผงระบายความร้อน	12
2.2.2 ซิลิโคนนำความร้อน	13
2.2.3 กาวสองหน้านำความร้อน หรือเทปกาวสองหน้าอะคริลิกโพลีเมอร์	14
2.2.4 ก่อ้งน้ำระบายความร้อน (Water Cooling Block)	15
2.2.5 พัดลมระบายความร้อน	15
2.3 วงจรทระดับแรงดัน (Boost Converter)	16
บทที่ 3 วิธีการออกแบบและทดสอบ	19
3.1 การออกแบบชุดจำลองอุณหภูมิเพื่อการทดสอบ และการปรับปรุงระบบระบายความร้อน	19
3.1.1 ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อน	19
3.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ในการนำความร้อนระหว่างชุดจำลองอุณหภูมิ และ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.3 การปรับปรุง และพัฒนา ระบบระบายความร้อนของการทดสอบ เพื่อคงที่อุณหภูมิด้านเย็น	21
3.1.4 การปรับปรุงการให้ความร้อนของ ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	24
3.2 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 1 โมดูล	24
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของ 1 โมดูล	24
3.2.2 การต่อวงจรทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	25
3.2.3 วิธีการทดสอบพฤติกรรมผลการผลิตไฟฟ้าของ 1 โมดูล	26
3.3 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 4 โมดูล	27
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมผลการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล	27
3.3.2 การต่อวงจรเพื่อการทดสอบพฤติกรรมผลการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล	27
3.3.3 วิธีการทดสอบพฤติกรรมผลการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล	28
3.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Power Generator) จาก 10 โมดูล	28
3.4.1 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และการปรับปรุงระบบ ระบายความร้อน	28
3.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	28
3.4.3 การต่อวงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	29
3.4.4 วิธีทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	29
บทที่ 4 ผลการทดสอบ และประเมินผล	31
4.1 ผลการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 1 โมดูล	31
4.1.1 ผลการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล ที่ผลต่างอุณหภูมิ 10, 25 และ 35 °C	31
4.1.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic Curve)และ กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้า ของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูลจาก การทดสอบที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ	34
4.2 ผลการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 4 โมดูล	36
4.2.1 ผลการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล ที่ผลต่างอุณหภูมิ 10, 25 และ 35 °C	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic Curve) และ กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้า ของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูลจาก การทดสอบที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ	39
4.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Power Generator) จาก 10 โมดูล	41
4.3.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดเล็ก ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 60 °C	41
4.3.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic Curve) และ กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	45
5.1 ข้อจำกัดของการทดลอง	45
5.1.1 ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนของการทดสอบ	45
5.1.2 ชุดระบายความร้อนเพื่อคงที่อุณหภูมิด้านเย็น	45
5.1.3 เครื่องมือการวัด และบันทึกค่าผลการทดสอบ	45
5.2 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	46
5.2.1 สรุปผลการทดลองเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล	46
5.2.2 สรุปผลการทดลองเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล	46
5.3 สรุปผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Power Generator) จาก 10 โมดูล	47
5.4 สรุปผลการวิจัย	47
5.5 ข้อเสนอแนะในการต่อยอดโครงการ	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	51
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์	56
ประวัติผู้เขียน	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนที่ของประจุภายในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	5
2.2 ค่า ZT ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่างๆ	6
2.3 กราฟแสดงแนวโน้มของค่าสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	8
2.4 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานตามปรากฏการณ์ซีเบค	9
2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานตามปรากฏการณ์เพลเทียร์	10
2.6 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโมดูล TEG ชนิดหนึ่ง	11
2.7 กราฟกำลังไฟฟ้ากับโพลด	11
2.8 ฮีทซิงค์อะลูมิเนียม	12
2.9 ฮีทซิงค์ทองแดง	12
2.10 ฮีทซิงค์ทองแดงผสมอะลูมิเนียม	13
2.11 กาวซิลิโคนนำความร้อน	13
2.12 กาวซิลิโคนซึ่งเชื่อมต่อระหว่างแผ่น TEG และ ฮีทซิงค์	14
2.13 กาวซิลิโคนนำความร้อน	14
2.14 กล่องน้ำระบายความร้อน	15
2.15 พัดลมระบายความร้อน	15
2.16 วงจรทระดับแรงดัน หรือ Boost Converter	16
2.17 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า	16
2.18 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า	17
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดจำลองอุณหภูมิต้านร้อน	19
3.2 ชุดจำลองอุณหภูมิต้านร้อน	20
3.3 อุปกรณ์ในการนำความร้อน และยึดติดวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	20
3.4 ชุดระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และอากาศธรรมชาติ	21
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบระบายความร้อนโดยใช้พัดลมระบายความร้อน	22
3.6 ชุดระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และพัดลม	22
3.7 การควบคุมความเร็วรอบของพัดลม	23
3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น	23
3.9 ลักษณะการติดตั้งฮีทซิงค์กับต้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	24
3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของ 1 โมดูล	25
3.11 วงจรเพื่อการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 1 โมดูล	26
3.12 การต่ออนุกรมเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	27
3.13 วงจรเพื่อการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 4 โมดูล	28
3.14 อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ Micro Power Generator	29
3.15 การต่อวงจรทดสอบจ่ายโพลดแผงหลอดแอลอีดี	30
3.16 การต่อวงจรทดสอบจ่ายไฟฟ้าซาร์จแบตเตอรี่แบบซ้ำ	30
3.17 ขาของเรกูเรเตอร์	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน จากการทดสอบ 1 โมดูล	34
4.2 กราฟคุณลักษณะแรงดัน-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 1 โมดูล	34
4.3 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 1 โมดูล	35
4.4 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน จากการทดสอบ 4 โมดูล	39
4.5 กราฟคุณลักษณะแรงดัน-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 4 โมดูล	39
4.6 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 4 โมดูล	40
4.7 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	42
4.8 กราฟคุณลักษณะแรงดัน-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	42
4.9 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	43
4.10 การต่อโหนดแผงหลอดแอลอีดี(LED strip)	44
4.11 การต่อโหนดแบบชาร์จ์แบตเตอรี่แบบซ้ำ	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ	3
2.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรทบระดับแรงดัน (Boost Converter) เมื่อมีการปรับค่า D	18
4.1 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 10 °C สำหรับ 1 โมดูล	31
4.2 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 25 °C สำหรับ 1 โมดูล	32
4.3 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 35 °C สำหรับ 1 โมดูล	33
4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ $\Delta T = 10, 25$ และ 35 °C สำหรับ 1 โมดูล	35
4.5 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 10 °C สำหรับ 4 โมดูล	36
4.6 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 25 °C สำหรับ 4 โมดูล	37
4.7 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 35 °C สำหรับ 4 โมดูล	38
4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ $\Delta T = 10, 25$ และ 35 °C สำหรับ 4 โมดูล	40
4.9 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	41
4.10 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ $\Delta T = 60$ °C สำหรับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคที่มีความต้องการ การใช้พลังงานไฟฟ้ามีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่ส่วนใหญ่เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการแปรรูปพลังงานงานจากฟอสซิล นั้นเริ่มที่จะตอบสนองต่อความต้องการได้ยากมากขึ้น อีกทั้งยังต้องมีการใส่ใจในผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ในขณะที่การแปรรูปพลังงานที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ในปัจจุบันยังไม่สามารถตอบโจทย์นี้ได้ เนื่องจากกระบวนการแปรรูปพลังงานเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้ ได้จากกระบวนการเผาไหม้ เพื่อสร้างความร้อนเพื่อนำไปเปลี่ยนพลังงานต่อไป ซึ่งในระหว่างกระบวนการนั้นได้สร้างมลพิษเช่นกัน ทำให้เกิดแนวโน้มการพยายามที่จะหาแหล่งพลังงานทดแทน หรือพลังงานสะอาดมาช่วยลดสัดส่วนของการใช้พลังงานจากฟอสซิล เพื่อที่จะตอบโจทย์ความต้องการพลังงานที่มากขึ้น และความต้องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม พลังงานสะอาดจึงเป็นคำตอบที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถที่จะให้พลังงาน และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

พลังงานสะอาดในปัจจุบันมีหลากหลายแหล่งมาก เช่น ลม น้ำ แสงอาทิตย์ เป็นต้น แต่อีกพลังงานที่น่าสนใจคือ พลังงานความร้อน เนื่องจากพลังงานความร้อนนั้นมีอยู่ทุกที่ เช่น กระบวนการหลักในการแปรรูปพลังงานของเราส่วนใหญ่ยังคงเป็นกระบวนการทางความร้อน ซึ่งในกระบวนการนั้นไม่ได้มีประสิทธิภาพสูงมากนัก จึงทำให้ยังมีการปลดปล่อยพลังงานทิ้งออกมา ทำให้ความร้อนส่วนนี้ถูกทิ้งโดยไร้ประโยชน์ นอกจากความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้ในการแปรรูปพลังงานแล้ว ยังมีความร้อนที่เกิดขึ้นตามสิ่งแวดล้อมที่เราอยู่ เช่น พลังงานความร้อนที่ผนังตึกดูดซับไว้จากการโดนแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ความร้อนจากกระจกห้องเนื่องจากแสงอาทิตย์เช่นกัน หรือความร้อนจากคอมเพลสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ความร้อนเหล่านี้ถูกปล่อยให้สูญเสียไปโดยมิได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพราะถือว่าเป็นความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าก็ยังคงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ เพราะถือว่าเป็นพลังงานที่สะอาด หาได้ง่าย ต้นทุนต่ำ อีกทั้งยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนนั้นไม่ว่ากลางวัน หรือกลางคืนก็สามารถที่จะมีความร้อนเกิดขึ้นได้ ซึ่งตรงนี้เป็นข้อได้เปรียบที่น่าสนใจ ซึ่งอาจมีบทบาทในการช่วยลดสัดส่วนการใช้พลังงานจากฟอสซิลด้วยเช่นกัน

เทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น ในปัจจุบันมีการทำบ้างแล้ว แต่พบมากในความร้อนที่มีคุณภาพสูง หรือความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ เช่น วัฏจักรของแรงดันสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle) เป็นกระบวนการใช้ความร้อนเพื่อให้สารเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นกลายเป็นไอซิปกักหันไอน้ำ และผลิตไฟฟ้าออกมา เป็นต้น สำหรับความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำนั้นมีอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ที่สามารถแปรรูปพลังงานได้โดยตรง เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีเครื่องเคลื่อนที่ จึงไม่ทำให้เกิดเสียงรบกวน และไม่ต้องการการซ่อมบำรุงสูงนั่นเอง อุปกรณ์ตัวนี้ใช้หลักการความแตกต่างของอุณหภูมิของสองด้านของแผ่นวัสดุ ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์กับการนำความร้อนที่เหลือทิ้ง และถูกปล่อยโดยไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ได้ แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นก็ยิ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ และมีต้นทุนที่สูงสำหรับการแปรรูปพลังงาน แต่เทคโนโลยีนี้อาจมีบทบาทในอนาคตเพราะมีการพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำตัวอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีเทคโนโลยีรองรับที่เติบโตอย่างรวดเร็ว เช่น นาโนเทคโนโลยี เป็นต้น ทำให้การให้การศึกษาอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมีความน่าสนใจมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงาน และโครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของการผลิตไฟฟ้าที่ความร้อนอุณหภูมิต่างๆ ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ทั้ง 1 โมดูล และหลายโมดูล
- 1.2.3 เพื่อสร้างชุดผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากความร้อนเหลือทิ้ง และศึกษาคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของชุดผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่อุณหภูมิที่สามารถจำลองได้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1.3.1 สามารถอธิบายหลักการทำงาน และโครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ได้
- 1.3.2 สามารถสร้างกราฟของพฤติกรรมในการผลิตไฟฟ้าที่มีผลต่างของอุณหภูมิต่างๆ ได้ ของแต่ละโมดูล และหลายโมดูล
- 1.3.3 สามารถสร้างชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยอาศัยพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าที่อุณหภูมิจำลอง
- 1.3.4 การศึกษานี้เป็นการจำลองอุณหภูมิขึ้นเพื่อการทดลอง ทำให้มีข้อจำกัดในด้านอุณหภูมิที่ทำได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่ด้านร้อนจะไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส
- 1.3.5 การศึกษานี้พยายามให้อุณหภูมิด้านเย็นคงที่ ดังนั้นในการทดลองจะมีการให้พลังงานกับระบบระบายความร้อนเพื่อศึกษาพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นทางทฤษฎีเกี่ยวกับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
- 1.4.2 ศึกษาเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีขายในตลาดทั่วไป ที่หาซื้อได้ง่าย และมีราคาที่เหมาะสม
- 1.4.3 สร้างชุดทดลองเพื่อจำลองอุณหภูมิขึ้น สำหรับการทดสอบวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4 ทำการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่างๆ

1.4.5 ปรับปรุงการทำงานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ดีขึ้น เช่น ขยายขนาดของฮีทซิงค์ หรือปรับปรุงระบบระบายความร้อนในการทดลองเพื่อคงที่อุณหภูมิด้านเย็น

1.4.6 สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวนมากขึ้น และทดสอบหาคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้า ที่อุณหภูมิที่ชุดการจำลองสามารถทำได้

1.4.7 สรุปการทดลองของงานวิจัย และปัจจัยที่มีผลต่อการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้ง

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ									
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาหาข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์										
2.รวบรวมข้อมูลทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อจัดทำลงในปฏิญานินทร์										
3.ทำการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ของโมดูล										
4.นำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อหาจำนวนโมดูลที่จะใช้										
5.สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มากขึ้น										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ (ต่อ)

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ									
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
6. จัดหาชุดควบคุม แรงดัน และกระแสจากไฟฟ้าที่ผลิตได้ เพื่อการต่อโหลด										
7. ทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า										
8. จัดทำเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์										

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.6.1 เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์นำความร้อนเหลือทิ้ง มาใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม
- 1.6.2 เพื่อเป็นการสร้างต้นแบบของชุดผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากความร้อนเหลือทิ้ง
- 1.6.3 เพื่อเป็นข้อมูลคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ให้กับผู้ที่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

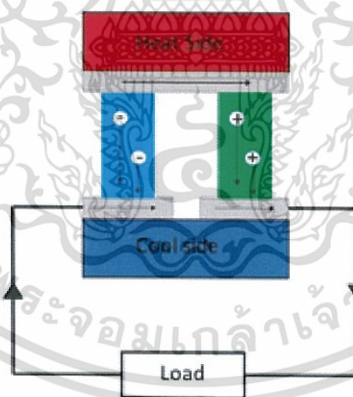
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีการเคลื่อนที่ในการผลิตไฟฟ้า จึงไม่ทำให้เกิดเสียงรบกวน ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

2.1.1 ทฤษฎี และหลักการการทำงานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น มีผู้ที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่ได้รับความน่าเชื่อถืออยู่ 3 ปรากฏการณ์ คือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) และปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect) โดยรายละเอียดของแต่ละปรากฏการณ์มีดังนี้

ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ในปี ค.ศ.1821 นักฟิสิกส์ชื่อ โทมัส โยฮาน ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่ เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นที่รอยต่อของโลหะ ชนิดที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่รอยต่อของโลหะ เนื่องจากประจุในโลหะที่ได้รับความร้อน จะได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้มีพลังงานจลน์ 2 ทั้งสองนั้นสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุขึ้น ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งอธิบายการเกิดขั้ว บวก และลบ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของ โยล และอิเล็กตรอน

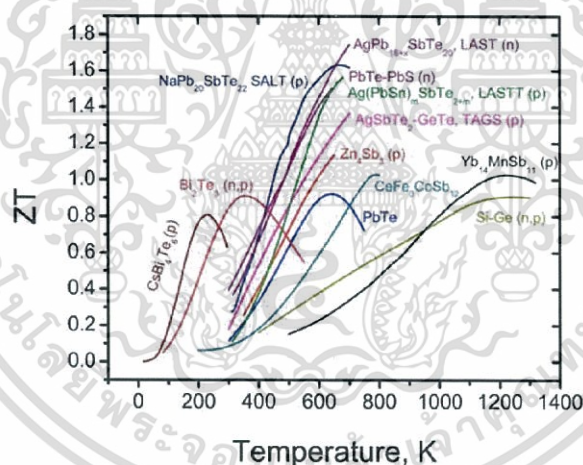


รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของประจุภายในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1834 โดยฌองเพลเทียร์ (Jean Peltier) ได้ทำการทดลองป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะทองแดง และบิสมัทซึ่งเชื่อมต่อถึงกัน ผลที่เกิดขึ้นคือ โลหะด้านหนึ่งร้อนขึ้น ในขณะที่อีกด้านหนึ่งเย็นตัวลง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ย้อนกลับของซีเบค โดยปรากฏการณ์นี้ถูกอธิบายว่า เนื่องจากกลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้านหนึ่งจะปลดปล่อยความร้อน ส่วนอีกด้านหนึ่งจะดูดกลืนความร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบนโลหะทั้งสอง

ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect) ในปี ค.ศ.1954 วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Seebeck Effect และ Peltier Effects ค่าสัมประสิทธิ์ Seebeck และ Peltier ว่ามีความสัมพันธ์กันทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งทอมสันนำไปทำนายผลของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ในปรากฏการณ์ทอมสัน ความร้อนจะถูกดูดซับ หรือเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลลงวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งความร้อนมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์ทอมสันมีค่าสัมพันธ์กันโดยใช้เทอร์โมไดนามิกส์ นำไปสู่สัมประสิทธิ์ Seebeck

2.1.2 วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริก คือวัสดุที่สามารถแสดงปรากฏการณ์ทั้ง 3 ปรากฏการณ์ ได้แก่ ปรากฏการณ์ซีเบค ปรากฏการณ์เพลเทียร์ และปรากฏการณ์ทอมสัน ซึ่งทั้งหมดคือปรากฏการณ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีค่าที่บอกถึงคุณสมบัติการเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีคือค่า ZT (figure of merit) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรสำคัญสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้แก่ สัมประสิทธิ์ซีเบค ค่าสภาพนำไฟฟ้า และค่าสภาพนำความร้อน และตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคืออุณหภูมิ เพราะวัสดุต่างๆที่นำมาใช้จะมีความคงทนต่ออุณหภูมิใช้งานไม่เหมือนกัน ดังนั้นค่า ZT ตามอุณหภูมิต่างๆจึงเป็นค่าที่สำคัญเพราะจะทำให้ทราบว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนี้เหมาะสมที่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิใด ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ค่า ZT ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างๆ

ดังนั้นการเลือกชนิดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้งานจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าสูงสุด ZT ของตัววัสดุนั้นในอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสมเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดจึงต้องมีการแบ่งชนิดวัสดุตามการใช้งานจากอุณหภูมิและค่า ZT ที่อุณหภูมินั้นๆ ยกตัวอย่างจากกราฟจะพบว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส) ควรใช้วัสดุชนิด Bi₂Te₃ เพราะให้ค่า ZT ที่สูงสำหรับช่วงอุณหภูมินี้เป็นต้น

เกณฑ์ที่จะนำมาใช้เลือกวัสดุให้ได้ผลดีที่สุดสำหรับสร้างอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อที่จะนำไปใช้งานเช่นการผลิตไฟฟ้า การทำความเย็น และการทำความร้อน จะพิจารณาสองปัจจัยหลักคือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ และตัวประกอบกำลัง ซึ่งทั้งสองปัจจัยจะขึ้นอยู่กับความนำไฟฟ้า, การนำความร้อน, สัมประสิทธิ์ซีเบค และพฤติกรรมขณะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ ปัจจัยทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นเกี่ยวข้องกับค่า ZT ของวัสดุหากค่า ZT ของวัสดุมีค่าสูงจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลังสูงโดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าต่างๆดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ (Device efficiency) ค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\eta = \frac{\text{พลังงานที่จ่ายโหลด}}{\text{พลังงานความร้อนที่ได้รับ}} \quad (2.1)$$

ค่า figure of merit นั้นเป็นค่าที่ต้องใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพสูงสุดและบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้เป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้สมการที่ 2.2 ในการคำนวณ

$$Z = \frac{\sigma S^2}{k} \quad (2.2)$$

ค่า Z มีหน่วยคือ $1/K$ เป็นค่าที่มีความสำคัญมากเพราะเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการแปลงพลังงานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกวัสดุใดมีค่า Z สูงก็จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีมาก เมื่อพิจารณาจากสมการค่า Z ที่สูงแสดงว่าวัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) ที่สูงเป็นผลให้มีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์สูง และมีค่า สภาพนำความร้อน (K) ต่ำ แต่ในการวิเคราะห์จริงจะใช้ค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริตแบบไม่มีหน่วย (ZT) เพราะสามารถใช้เปรียบเทียบค่าระหว่างวัสดุด้วยกันที่อุณหภูมิต่างๆได้ สามารถบอกได้ว่าวัสดุจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิใด

ประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C \sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{T_H \sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (2.3)$$

โดยที่ T_H คืออุณหภูมิด้านร้อน T_C คืออุณหภูมิด้านเย็น และ \bar{T} คืออุณหภูมิเฉลี่ย ทั้งหมดหน่วยเคลวิน (K) ซึ่งจากการที่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีลักษณะเหมือนกับเครื่องจักรความร้อน ประสิทธิภาพของอุปกรณ์จึงถูกจำกัดตามวัฏจักรคาร์โนต์ในการเปลี่ยนความร้อนให้กลายเป็นพลังงาน สมการนี้จึงแบ่งพิจารณาประสิทธิภาพได้สองส่วนหลักคือ เทอมของสัมประสิทธิ์คาร์โนต์ $\frac{T_H - T_C}{T_H}$

และเทอมของสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก $\frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}}$

ตัวประกอบกำลัง (Power factor) ค่าตัวประกอบกำลังคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และค่าความนำไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.4 ซึ่งวัสดุที่มีค่าตัวประกอบกำลังที่สูงนั้นก็จะมีความสามารถในการแปรผันกำลังได้สูงเช่นกัน

$$\text{Power factor} = \sigma S^2 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นวัสดุที่ต้องการนำมาใช้เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพการแปรผันพลังงานที่ดีจะต้องเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง ค่าสภาพการนำความร้อนต่ำ และมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูง โดยค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

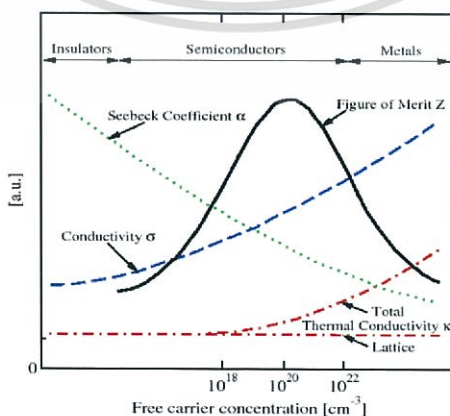
สมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ยกตัวอย่างดังรูปที่ 2.3 จากสมการประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะพบว่า มี 2 ส่วนหลักที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพคือ ส่วนของสัมประสิทธิ์คาร์โนต์ และส่วนของสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ในส่วนของสมบัติทางวัสดุนั้นจะประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้ 1.ค่าฟิสิกเกอร์ออฟเมอร์ิตไม่มีหน่วย (ZT) 2.ค่าตัวประกอบกำลัง 3.ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค 4.ค่าสภาพนำไฟฟ้า 5.ค่าสภาพนำความร้อน

การพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือการทำให้ค่า ZT สูงขึ้นซึ่งจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ คือค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและค่าสภาพนำความร้อน

ค่าสภาพนำไฟฟ้า มีนิยามคือ สัดส่วนระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ขอกกล่าวโดยสรุปสำหรับวัสดุทั่วไปค่าสภาพนำไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นอิเล็กตรอน แต่สำหรับวัสดุกึ่งตัวนำจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหรือโฮลดังนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าของโลหะจะมีค่าสูงและสูงกว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุกึ่งตัวนำ

ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งในวัสดุทั่วไปจะแปรผกผันกับความหนาแน่นประจุไฟฟ้างั้นค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะมีค่าต่ำสำหรับวัสดุโลหะและมีค่าสูงมากสำหรับวัสดุกึ่งตัวนำ

ค่าสภาพนำความร้อนเป็นค่าคงที่แสดงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุซึ่งค่านี้เกิดจากการรวมกันของค่าสภาพนำความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนและค่าสภาพนำความร้อนที่เกิดจากโฟนอนจากการที่ค่า ZT จะสูงได้ก็ควรที่จะมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำจึงจะต้องแยกพิจารณาค่าสภาพนำความร้อนทั้งสองส่วนโดยสรุปดังนี้ ค่าสภาพนำความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนจะแปรผันโดยตรงกับค่าสภาพนำไฟฟ้างั้นค่านี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นพาหะสูงขึ้น ค่าสภาพนำความร้อนที่เกิดจากโฟนอนจะไม่ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็นค่าที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึกซึ่งเป็นกลไกของการนำความร้อนของวัสดุ



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงแนวโน้มของค่าสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

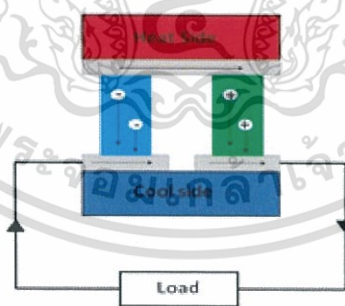
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าสูงสุดของ ZT เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้วจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะมีค่าสูงในวัสดุที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำ ค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงเมื่อมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง เช่นเดียวกันกับค่าสภาพนำความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอน แต่สำหรับค่าสภาพนำความร้อนที่เกิดจากโฟนอนนั้นไม่ขึ้นกับค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนของวัสดุ ถ้าต้องการเพิ่มค่า ZT จะสามารถทำได้ด้วยการลดค่าสภาพนำความร้อนที่เกิดจากโฟนอนซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นของโครงผลึกเท่านั้นจึงไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ค่าสภาพนำไฟฟ้า และค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุจะมีค่าลดลง

วัสดุที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิห้องที่มีอยู่ในปัจจุบันคือ Bismuth telluride (Bi_2Te_3) โดยวัสดุชนิดนี้ให้ค่า figure-of-merit (ZT) อยู่ระหว่าง 0.8 และ 1.0 ที่อุณหภูมิห้อง ค่า ZT ที่ได้เป็นผลจากโครงสร้างของวัสดุนี้ โดยตัววัสดุมีการนำไฟฟ้าที่ดีแต่นำความร้อนได้ไม่ดี และทนความร้อนได้ไม่มาก เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นแล้วราคาจะค่อนข้างต่ำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีขายส่วนใหญ่ราคา 100-300 บาทจึงทำมาจากวัสดุชนิดนี้ หากเป็นชนิดอื่นๆที่ทนอุณหภูมิสูงๆได้จะมีราคาแพงการนำมาใช้งานเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพแล้วไม่คุ้มค่า

2.1.3 การใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จากหลักการเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถประยุกต์สร้างอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกใช้งานได้ 2 รูปแบบหลักคือ 1.เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานตามปรากฏการณ์ซีเบคหรือผลิตไฟฟ้า 2.เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานตามปรากฏการณ์เพลเทียร์หรือทำความเย็นและความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกตามปรากฏการณ์ซีเบค (Thermoelectric generator: TEG) จากหลักการของซีเบคคือเปลี่ยนความแตกต่างของความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 โดยสามารถพิจารณาจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก หรือเรียกว่าเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type)



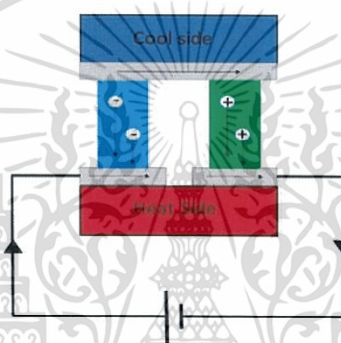
รูปที่ 2.4 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานตามปรากฏการณ์ซีเบค

เมื่อกำหนดให้ด้านบนมีอุณหภูมิสูงและด้านล่างมีอุณหภูมิต่ำ จะเกิดการไหลของความร้อนจากด้านบนไปด้านล่างทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ในวัสดุ n-type) และโฮล (ในวัสดุ p-type) จากด้านบนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านล่างที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงมีจำนวนพาหะด้านล่างมากกว่าด้านบน เมื่อพิจารณาวัสดุชนิดเอ็นจะพบว่าที่ปลายด้านล่างซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่เยอะกว่าด้านบนนั้นจะแสดงศักย์ไฟฟ้าเสมือนเป็นศักย์ลบ และในวัสดุชนิดพีซึ่งมีโฮลอยู่ที่ปลายล่างเยอะก็จะแสดงศักย์ไฟฟ้าเสมือนเป็นศักย์บวกเมื่อเป็นเช่นนี้ก็จะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในวัสดุทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในวัสดุชนิดเอ็นกระแสไฟฟ้ามีทิศการไหลจากด้านเย็นไปด้านร้อนสวนทางกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและสวนทางกับการไหลของความร้อนส่วนในวัสดุชนิดพีกระแสไฟฟ้าจะมีทิศการไหลจากด้านร้อนไปด้านเย็นตามทิศการเคลื่อนที่ของโฮลและมีทิศเกี่ยวกับการไหลของความร้อนนั่นเอง จากหลักการที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ตามปรากฏการณ์ซีเบค อุปกรณ์นี้จึงถูกเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกหรือตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric generator: TEG)

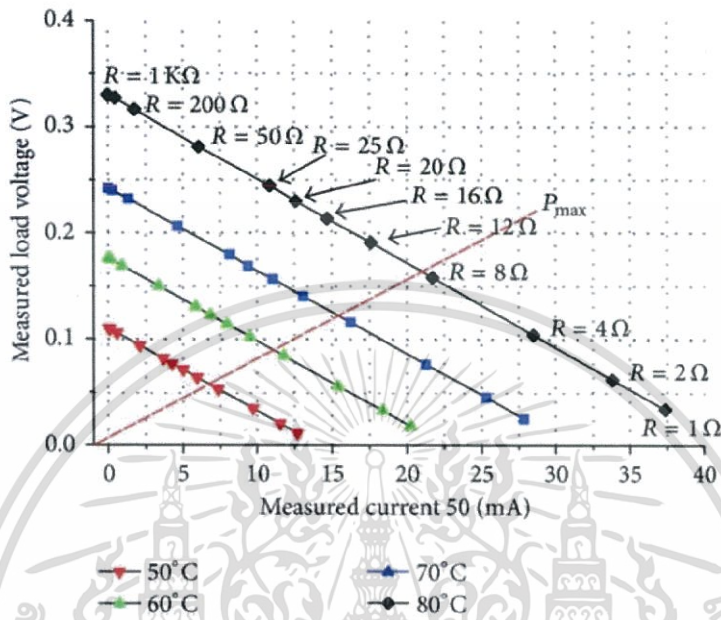
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Thermoelectric cooler: TEC) มีลักษณะ ดังรูปที่ 2.5 จากปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่ได้กล่าวมาแล้วซึ่งอุปกรณ์ที่ทำงานตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ คือ เมื่อมีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกให้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกแล้วจะเกิดความแตกต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกได้



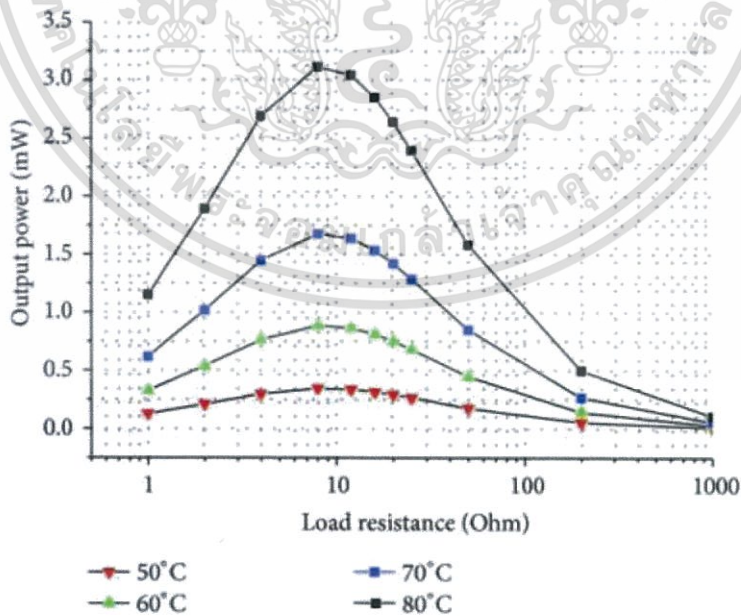
รูปที่ 2.5 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานตามปรากฏการณ์เพลเทียร์

เมื่ออุปกรณ์ได้รับไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาจะบังคับให้เกิดศักย์ไฟฟ้าบวกที่ด้านล่างของวัสดุชนิดเอ็นและเกิดศักย์ไฟฟ้าลบที่ด้านล่างของวัสดุชนิดพี ดังนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในวัสดุจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะในวัสดุ เมื่อพิจารณาที่วัสดุชนิดเอ็นมีพาหะคืออิเล็กตรอนเมื่อมีสนามไฟฟ้าจะเกิดแรงกระทำต่อประจุอิเล็กตรอนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศของแรงที่เกิดขึ้นดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนเคลื่อนที่จากปลายที่มีศักย์เป็นลบไปยังด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ จะเกิดการพาความร้อนไปด้วยเกิดการไหลของความร้อนทำให้อด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าลบนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าบวกนั้นคือด้านบนเย็นกว่าด้านล่างตามรูป ในวัสดุชนิดพีก็เช่นกันแต่ทิศทางการเคลื่อนที่พาหะซึ่งเป็นโฮลนั้นจะมีทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนทำให้อด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าบวกหรือด้านบนนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าลบซึ่งก็คือด้านล่างของวัสดุ จากที่กล่าวมาจะพบว่าอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างความแตกต่างอุณหภูมิได้ตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ 2 รูปแบบคือ 1.เป็นตัวทำความเย็นจากด้านที่เย็นจะถูกเรียกว่า ตัวทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler: TEC) 2.เป็นตัวทำความร้อนจากด้านที่ร้อนจะถูกเรียกว่า ตัวทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Heater: TEH)

2.1.4 กราฟคุณลักษณะ ของเทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(TEG) จะมีอยู่ 2 กราฟที่สามารถบอกคุณลักษณะของอุปกรณ์ได้ คือ กราฟกระแส-แรงดัน ดังรูปที่ 2.6 และกราฟ กำลังไฟฟ้า-โหลด ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโมดูล TEG ชนิดหนึ่ง



รูปที่ 2.7 กราฟกำลังไฟฟ้ากับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหนึ่งตัวนั้นมีค่าต่ำมาก (หน่วยmW) การนำมาประยุกต์ใช้งานนั้นจะต้องนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมาต่อร่วมกันหลายๆโมดูลเพื่อให้มีการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน

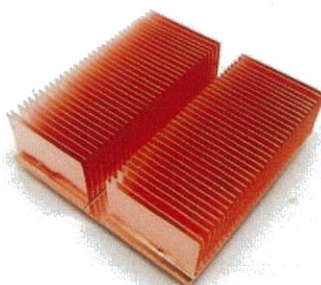
2.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2.2.1 ฮีทซิงค์ แผงระบายความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำหรือความร้อน เพราะการติดตั้งแผงนำความร้อน ติดตั้งเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เราใช้งานไม่เกิดความร้อนมากจนเกินไป จนส่งผลกระทบต่อให้เกิดความเสียหายแก่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยแผงนำความร้อนจะมีพื้นที่สัมผัสกับอากาศมากขึ้นเพื่อให้ระบายความร้อนได้มากขึ้น วัสดุที่ใช้ในการทำแผงนำความร้อน เช่น อะลูมิเนียม , ทองแดง และ ทองแดงผสมอะลูมิเนียม ซึ่งแต่ละวัสดุที่ใช้ทำแผงระบายความร้อนก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังนี้

ฮีทซิงค์ที่ทำจากอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.8 จะมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ขั้นตอนการผลิตง่าย ราคาถูกเมื่อเทียบกับ ทองแดง และทองแดงผสมอะลูมิเนียม แต่มีข้อเสียคือ การนำความร้อนจะไม่ดีเท่าทองแดง และ ทองแดงผสมอะลูมิเนียม

รูปที่ 2.8 ฮีทซิงค์อะลูมิเนียม

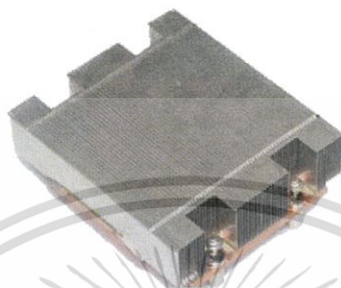
ฮีทซิงค์ที่ทำจากทองแดง ดังรูปที่ 2.9 จะมีราคาค่อนข้างสูง จะนิยมใช้เฉพาะบางกลุ่ม เช่น อุปกรณ์ที่มีความร้อนสูงมากกว่าปกติ และต้องการลดความร้อนได้รวดเร็วมากขึ้น แผงระบายความร้อนที่ทำมาจากทองแดงจะถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอะลูมิเนียม และทองแดงผสมอะลูมิเนียม แต่ก็จะมีข้อเสียคือขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยาก เนื่องจากมีส่วนของครีบบาก การประกอบครีบบากกับตัวแผงนำความร้อนจะต้องใช้การเชื่อมด้วย



รูปที่ 2.9 ฮีทซิงค์ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮีทซิงค์ทองแดงผสมอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.10 จะมีชิ้นส่วนประกอบระหว่างทองแดงและอะลูมิเนียม โดยแผ่นนำความร้อนผิวหน้าทำจากทองแดง และครีบกาวจะทำมาจากอะลูมิเนียม โดยระหว่างผิวสัมผัสของทองแดงและอะลูมิเนียมจะมีสารที่ช่วยในการนำความร้อน เพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดมีพื้นผิวแนบสนิทกัน และถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น แต่ประสิทธิภาพโดยรวมนั้นจะดีกว่าการใช้อะลูมิเนียม แต่จะนำความร้อนไม่ดีเท่ากับการใช้ทองแดง ราคาของแผ่นนำความร้อนชนิดนี้ราคาไม่สูงมาก และมีน้ำหนักที่เบากว่าทองแดง



รูปที่ 2.10 ฮีทซิงค์ทองแดงผสมอะลูมิเนียม

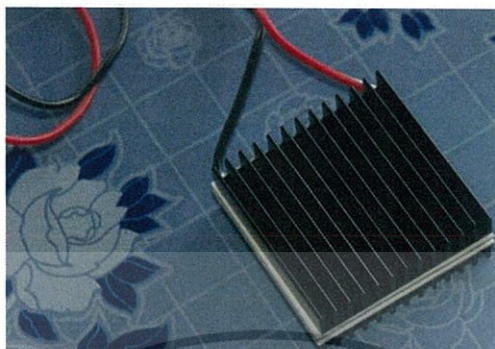
2.2.2 ซิลิโคนนำความร้อน ดังรูปที่ 2.11 เป็นสารพอลิเมอร์ ที่ประกอบด้วย ซิลิโคน คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และสารเคมีประเภทอื่นๆ โดยลักษณะการใช้งานของซิลิโคนจะมีหลายรูปแบบ เช่น กาว ยาแนว ฉนวน และงานทางการแพทย์ ซิลิโคนมีคุณสมบัติของความยืดหยุ่นและการนำความร้อนได้ดี



รูปที่ 2.11 กาวซิลิโคนนำความร้อน

การใช้งานซิลิโคนที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ ซิลิโคนนำความร้อน เพราะสามารถช่วยระบายความร้อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเชื่อมต่อให้พื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น โดยการใช้งานนั้น จะทาซิลิโคนนำความร้อนระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และฮีทซิงค์ ดังรูปที่ 2.12 เพราะในขณะที่ไม่ใช้กาวซิลิโคนนำความร้อน พื้นผิวระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และฮีทซิงค์ จะเกิดผิวขรุขระ ไม่เรียบ เชื่อมต่อถึงกันไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดปัญหาในด้านการระบายความร้อนอย่างไม่เต็มที่ ดังนั้น การใช้กาวซิลิโคนนำความร้อนระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และฮีทซิงค์ก็จะช่วยให้พื้นผิวทั้งสองวัตถุเชื่อมประสานถึงกัน พื้นผิวเรียบสนิทมากขึ้น การระบายความร้อนดีขึ้น ประโยชน์ของการใช้งานซิลิโคนนอกจากจะช่วยให้พื้นผิวระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และฮีทซิงค์การถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมถึงกันอย่างเรียบร้อยแล้ว ก็ยังมีประโยชน์ในการช่วยระบายความร้อน เพราะการใช้งานกาวซิลิโคนนำความร้อนจะช่วยลดอุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลดลงประมาณ 5-10 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.12 กาวซิลิโคนซึ่งเชื่อมต่อระหว่างแผ่น TEG และ ฮีทซิงค์

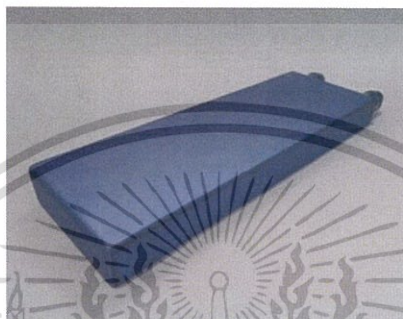
2.2.3 กาวสองหน้านำความร้อน หรือเทปกาวสองหน้าอะคริลิกโพลีเมอร์ ดังรูป 2.13 ซึ่งมีส่วนประกอบคือ ผงเซรามิก กาวซิลิโคน และสารอินทรีย์ ซึ่งมีคุณสมบัติให้ความยืดหยุ่น การบีบอัด ความหนา และความเหนียว การใช้งานนั้นสามารถช่วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จะนำมาใช้กับระบายความร้อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเชื่อมต่อให้พื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น โดยการใช้งานนั้นจะติดกาวสองหน้านำความร้อนระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับฮีทซิงค์ และติดกาวสองหน้านำความร้อนระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับกล่องน้ำระบายความร้อน เพราะในขณะที่ไม่ใช่กาวสองหน้านำความร้อน พื้นผิวระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับฮีทซิงค์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับกล่องน้ำระบายความร้อนจะเกิดผิวขรุขระ ไม่เรียบ เชื่อมต่อถึงกันไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดปัญหาในด้านการระบายความร้อนอย่างไม่เต็มที่ ดังนั้น การใช้กาวสองหน้านำความร้อนระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับฮีทซิงค์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับกล่องน้ำระบายความร้อน จะช่วยให้พื้นผิวทั้งสองวัตถุเชื่อมประสานถึงกัน พื้นผิวเรียบสนิทมากขึ้น การระบายความร้อน หรือการนำความร้อนดีขึ้น



รูปที่ 2.13 กาวซิลิโคนนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ถังน้ำระบายความร้อน (Water Cooling Block) ดังรูป 2.14 เป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากอะลูมิเนียม ใช้เป็นส่วนประกอบในระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว (Water Cooling) ซึ่งมีประสิทธิภาพ และเสถียรภาพที่ดีกว่าการระบายความร้อนด้วยอากาศ การใช้งานนั้นจะนำมาติดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้กาวสองหน้า นำความร้อนเป็นตัวเชื่อมให้ติดกัน ซึ่งข้อดีของการระบายความร้อนด้วยของเหลวคือมีเสถียรภาพดีกว่า และเสียงที่เกิดขึ้นระหว่างทำงานน้อยกว่าการระบายความร้อนแบบพัดลมระบายอากาศ แต่ข้อเสียคือการติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวมีความยุ่งยาก ต้องใช้อุปกรณ์ที่มากขึ้น และต้องมีพื้นที่ในการกักเก็บน้ำ



รูปที่ 2.14 ถังน้ำระบายความร้อน

2.2.5 พัดลมระบายความร้อน ดังรูป 2.15 ใช้เป็นส่วนประกอบในระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศ การใช้งานนั้นจะนำมาติดบนฮีทซิงค์ เพื่อช่วยให้ฮีทซิงค์ระบายความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งความเร็วในการหมุนนั้นสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่า Duty Ratio ข้อดีของการระบายความร้อนด้วยอากาศคือ สามารถติดตั้งได้สะดวก ไม่ต้องใช้พื้นที่มาก แต่มีข้อเสียคือลมที่ใช้เพื่อการระบายความร้อนส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับพื้นที่ที่ต้องการกักเก็บความร้อน ทำให้การกักเก็บความร้อนมีอุณหภูมิลดลง และมีเสียงดังกว่าการระบายความร้อนด้วยของเหลว

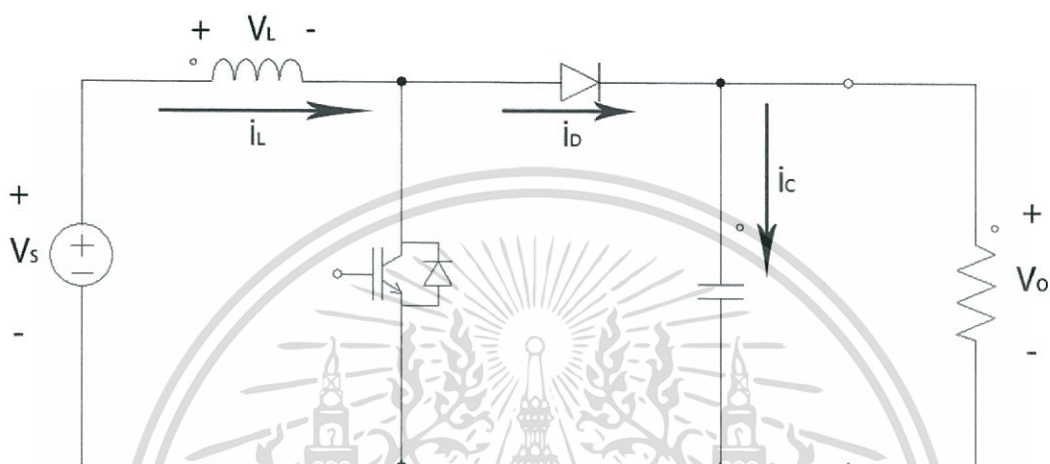


รูปที่ 2.15 พัดลมระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วงจรทบทระดับแรงดัน (Boost Converter)

วงจรทบทระดับแรงดัน คือวงที่ทำกรเพิ่มแรงดัน โดยให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า หรือที่เรียกว่า Boost Converter โดยมีอุปกรณ์สวิตซิ่ง เช่น MOSFET หรือ IGBT จะทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็คทรอนิกส์ ซึ่งมีโหมดการทำงานสองแบบคือ โหมดนำกระแสและโหมดไม่นำกระแส ดังรูปที่ 2.16

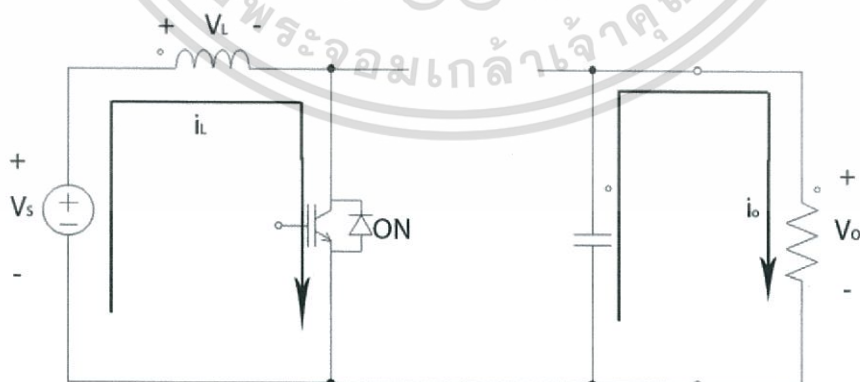


รูปที่ 2.16 วงจรทบทระดับแรงดัน หรือ Boost Converter

จากรูป 2.16 เราสามารถพิจารณาโหมดการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันตามการเปิดและปิดของอุปกรณ์สวิตซิ่งได้ดังนี้

โหมดที่ 1 ขณะสวิตซ์นำกระแส (Mode 1 Switch ON)

กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และผ่านสวิตซ์ ในขณะที่ไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลเมื่อสวิตซ์นำกระแสไฟฟ้า

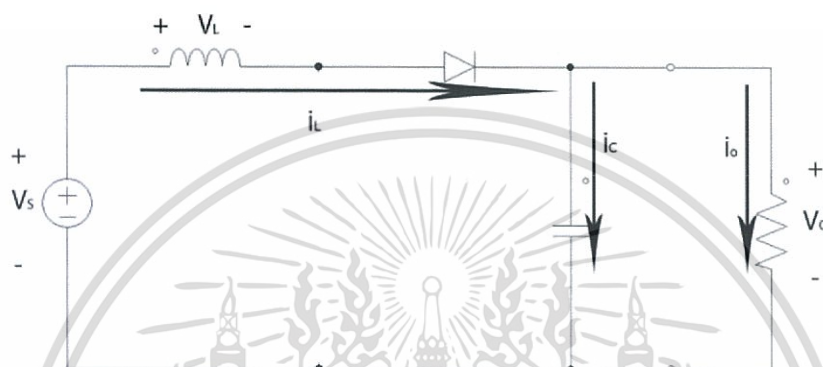
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.17 สามารถนำมาเขียนสมการจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ซึ่งจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$\begin{aligned} -V_S + V_L &= 0 \\ V_L &= V_S \end{aligned} \quad (2.5)$$

โหมดที่ 2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส (Mode 2 Switch OFF)

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้าให้นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า

จากรูป 2.18 สามารถนำมาเขียนสมการจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ซึ่งจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$\begin{aligned} -V_S + V_L + V_O &= 0 \\ V_L &= V_S - V_O \end{aligned} \quad (2.6)$$

ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกจะถูกควบคุมโดยการปรับค่าตัวดีไซเคิล (Duty cycle หรือ Duty ratio: D) ซึ่ง D หมายถึงอัตราส่วนของช่วงเวลาที่ยานำกระแสต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบการสวิตช์ ดังสมการที่ 2.7

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.7)$$

เมื่อ t_{on} คือ ช่วงเวลานำกระแส, $t_{on} = DT$

t_{off} คือ ช่วงเวลาไม่นำกระแส, $t_{off} = (1-D)T$

T คือ คาบเวลาของการเปิด-ปิดของสวิตช์

ซึ่งการกำหนดค่า D จะนิยมบอกสองลักษณะ คือนิยมบอกเป็นเลขจำนวนเต็มหนึ่ง และบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างเช่น $D = 0.6$ หรือ $D = 60\%$ หมายถึงช่วงเวลาที่ยานำกระแสอยู่ 0.6 ส่วนจากช่วงเวลาหนึ่งคาบ หรือหมายถึงช่วงเวลาที่ยานำกระแสอยู่ 60 เปอร์เซ็นต์จากช่วงเวลาหนึ่งคาบหรือ 100 เปอร์เซ็นต์

การที่เราจะหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้านั้น ต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นสมการดังนี้

$$V_{L,เฉลี่ย} = V_{L,on(ton)} + V_{L,off(toff)} = 0 \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 จะได้

$$\begin{aligned} V_{L,เฉลี่ย} &= V_{S(ton)} + (V_S - V_O)_{(toff)} = 0 \\ V_S(DT) + (V_S - V_O)(1-D)T &= 0 \\ V_S D + (V_S - V_O)(1-D) &= 0 \\ V_S D + V_S - V_S D - V_O + V_O D &= 0 \\ V_S - V_O(1-D) &= 0 \\ \frac{V_O}{V_S} &= \frac{1}{1-D} \end{aligned} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าได้โดยการปรับค่า D ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรหกระดับแรงดัน (Boost Converter) เมื่อมีการปรับค่า D

Duty Ratio (D)	อัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) (V_O/V_S)
0.0	1.00
0.1	1.10
0.2	1.25
0.3	1.43
0.4	1.67
0.5	2.00
0.6	2.50
0.7	3.33
0.8	5.00
0.9	10.00
1.0	infinity

ประโยชน์ของการใช้วงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีแรงดันด้านออกต่ำกว่าความต้องการใช้งานของโหลดใดๆ สามารถใช้วงจรนี้ช่วยในการปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมในการใช้งานกับการขับภาระทางไฟฟ้าต่างๆ

บทที่ 3

วิธีการออกแบบและทดสอบ

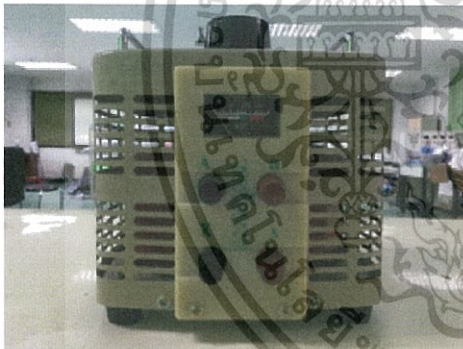
3.1 การออกแบบชุดจำลองอุณหภูมิเพื่อการทดสอบ และการปรับปรุงระบบระบายความร้อน

3.1.1 ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองอุณหภูมิด้านร้อน มีดังนี้

1.แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูปที่ 3.1 ก	1	เครื่อง
2.แท่นหลอดไฟแบบเกลียวชนิด 4 หลอด ดังรูปที่ 3.1 ข	1	แท่น
3.หลอดไฟฟ้าแบบไส้ 100 W ดังรูปที่ 3.1 ค	4	หลอด
4.แท่นครอบหลอดไฟหุ้มอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.1 ง	1	แท่น

ทำชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนเพื่อทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยการใช้หลอดไฟแบบไส้ 100 วัตต์ 4 หลอด ติดอยู่กับแท่นหลอดไฟที่เป็นกระเบื้องเพื่อป้องกันอันตรายจากความร้อน ประกอบกับมีการใช้แท่นครอบหลอดไฟเป็นอลูมิเนียมเพื่อให้สามารถเก็บความร้อนได้ดี ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าปรับค่าได้จ่ายไฟให้กับหลอดไฟ 4 หลอด 220 โวลต์ จะทำให้ได้แหล่งความร้อนสำหรับการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



ก.แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ



ข.แท่นหลอดไฟ



ค.หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 100 W



ง.แท่นครอบหลอดไฟหุ้มอลูมิเนียม

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



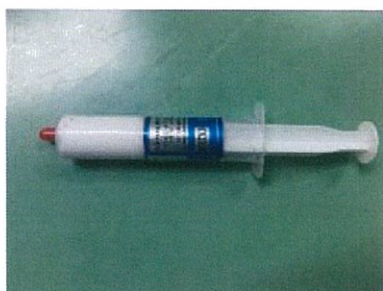
รูปที่ 3.2 ชุดจำลองอุณหภูมิความร้อน

3.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ในการนำความร้อนระหว่างชุดจำลองอุณหภูมิ และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ซิลิโคนระบายความร้อน ใช้ติดระหว่างฮีทซิงค์กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ดังรูปที่ 3.3ก จะเกิดการระบายความร้อนจากโมดูลไปสู่ฮีทซิงค์ เพื่อคงความแตกต่างของอุณหภูมิของด้านร้อนและด้านเย็น แต่การใช้ซิลิโคนนั้นมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงไม่สามารถยึดติดได้ดีเท่าที่ควร จึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องการการติดแน่น

กาวสองหน้านำความร้อน ใช้ติดระหว่างฮีทซิงค์กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ดังรูปที่ 3.3ข ซึ่งมีแรงยึดติดกันมากกว่าซิลิโคนระบายความร้อน จะทำให้การระบายความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งมีลักษณะที่บางจึง และไม่เปื้อนของเหลวทำให้ชิ้นงานติดแน่น แต่กาวสองหน้าชนิดนี้มีราคาสูงกว่า และการถอดชิ้นงานเพื่อแก้ไขทำได้ยาก

ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้กาวสองหน้านำความร้อนในการทดสอบเพราะต้องการให้ชิ้นงานติดแนบสนิท ทำให้การนำความร้อนทำได้เต็มที่



ก.ซิลิโคนระบายความร้อน



ข.กาวสองหน้านำความร้อน

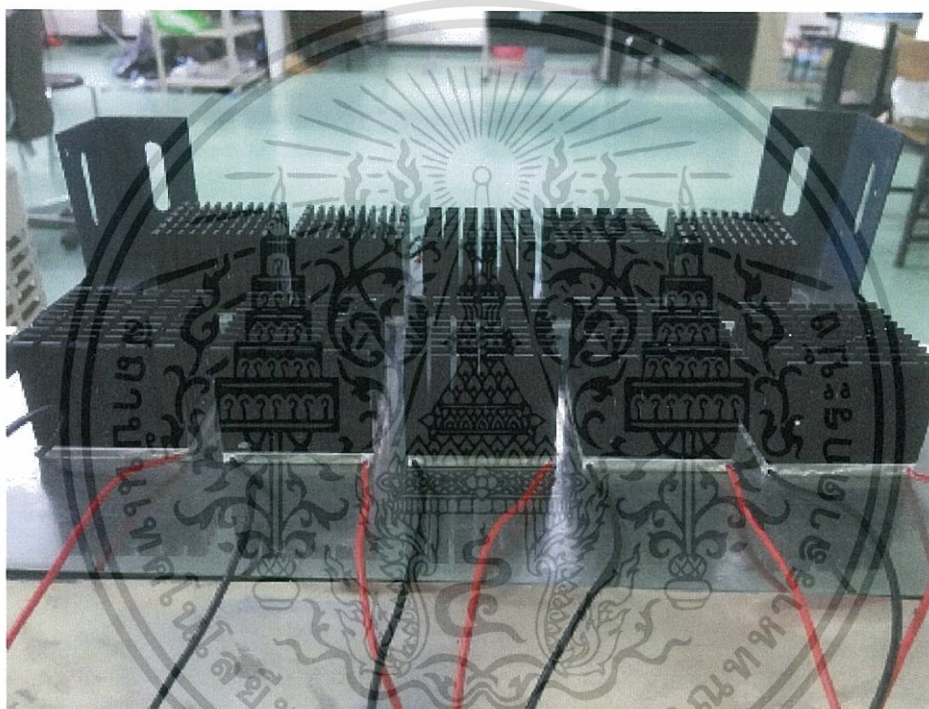
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ในการนำความร้อน และยึดติดวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การปรับปรุง และพัฒนา ระบบระบายความร้อนของการทดสอบเพื่อคงที่อุณหภูมิ ด้านเย็น

- ขั้นที่1 การระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์ และอากาศธรรมชาติ

ใช้ฮีทซิงค์เป็นตัวช่วยในการระบายความร้อนออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยใช้อากาศธรรมชาติเป็นตัวพาความร้อนจากฮีทซิงค์ออกจากระบบ ดังรูปที่ 3.4 แต่เมื่อเราทำการทดสอบไปได้ระยะเวลาหนึ่ง การระบายความร้อนออกจากฮีทซิงค์จะเริ่มไม่คงที่ มีการระบายความร้อนที่น้อยลงทำให้ฮีทซิงค์เก็บความร้อนไว้มากจนมีอุณหภูมิเท่ากับด้านร้อน ส่งผลให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ จึงมีการพัฒนาระบบระบายความร้อนในขั้นต่อไปเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 3.4 ชุดระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และอากาศธรรมชาติ

- ขั้นที่2 การระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์ร่วมกับพัดลมระบายความร้อน

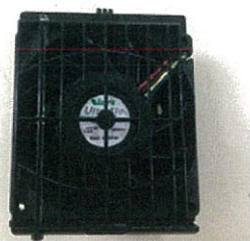
การพัฒนาในขั้นนี้ ได้มีการเพิ่มอุปกรณ์เพื่อช่วยเร่งในการเคลื่อนที่ของอากาศทำให้การระบายความร้อนทำได้มากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบระบายความร้อนโดยใช้พัดลมระบายความร้อน มีดังนี้

1.แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 3.5 ก	1	เครื่อง
2.พัดลมระบายความร้อน 12 V, 2.54 A ดังรูปที่ 3.5 ข	1	ตัว
3.Function Generator ดังรูปที่ 3.5 ค	1	เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



ข.พัดลมระบายความร้อน



ค.Function Generator

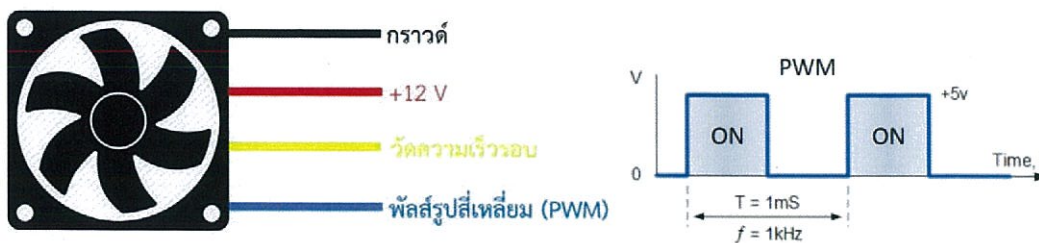
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบระบายความร้อนโดยใช้พัดลมระบายความร้อน

ใช้ฮีทซิงค์ติดกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อระบายความร้อน จากนั้นใช้พัดลมระบายความร้อนเป็นตัวช่วยให้ความร้อนถูกระบายออกเร็วขึ้นด้วยการดูดอากาศร้อนจากฮีทซิงค์เป่าออกทางด้านบน ดังรูปที่ 3.6 โดยจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายความร้อนที่พิกัดของพัดลม และใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของพัดลม โดยจ่ายพัลส์รูปสี่เหลี่ยมขนาด 5 V, 1 kHz ควบคุมความเร็วรอบด้วย Duty Cycle ของพัลส์ ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งการใช้พัดลมในการช่วยระบายความร้อนทำได้ดีกว่าการใช้อากาศธรรมชาติ และยังสามารถคงที่อุณหภูมิด้านเย็นได้ระยะเวลาหนึ่งซึ่งพอต่อการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แต่เมื่อใช้เป็นเวลานานพบว่าอุณหภูมิเริ่มผันผวน เมื่ออุณหภูมิด้านร้อนที่ถูกสะสมเริ่มสูงขึ้น ทำให้การควบคุมความเร็วรอบทำได้ยาก โดยความเร็วรอบสูงเกินไปทำให้อุณหภูมิด้านร้อนลดลง แต่ความเร็วรอบต่ำเกินไปก็ไม่สามารถระบายความร้อนที่ด้านเย็นได้ ส่งผลต่อการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งผลิตไฟฟ้าได้ลดลง จึงมีการพัฒนาการระบายความร้อนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อไป



รูปที่ 3.6 ชุดระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และพัดลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การควบคุมความเร็วรอบของพัดลม

- ขั้นที่3 การระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น

การพัฒนาครั้งนี้ทำเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตไฟฟ้าอย่างเต็มที่ ณ อุณหภูมิที่ชุดจำลองทำได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เกิดจากการต่อรวมกันของชุดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมี การเปลี่ยนระบบระบายความร้อนเป็นการใช้น้ำหล่อเย็นเพื่อเพิ่มความคงที่ของอุณหภูมิให้การทำงาน มีความยาวนานและมีความน่าเชื่อถือของชุดผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

1.ปั้มน้ำ ดังรูปที่3.8ก	1	ตัว
2. Water Cooling Block ดังรูปที่3.8ข	2	ตัว
3.สายยางขนาด 5/16 นิ้ว ดังรูปที่3.8ค	1	ชุด
4.อ่างน้ำสำหรับใส่น้ำหล่อเย็น	1	ใบ

การติดตั้งจะใช้ Water Cooling Block ติดอยู่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 5 โมดูล ต่อ 1 บล็อก โดยจะใช้ปั้มน้ำหล่อเย็นเป็นตัวสูบน้ำจากอ่างน้ำเข้า Water Cooling Block และน้ำออกจาก Water Cooling Block กลับเข้าสู่ถังน้ำ เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ทั้งหมด ทำให้อุณหภูมิด้านเย็นคงที่เท่ากับอุณหภูมิของน้ำ ข้อควรระวังในการติดตั้งนั้น จะต้องให้แน่ใจว่าด้านเย็นของแผ่นโมดูลทุกแผ่นต้องสัมผัสกับตัว Water cooling block เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเต็มที่ ซึ่งโดยปกติแล้วการผลิตแผ่นโมดูลออกมาจากโรงงานนั้นความหนาของตัวแผ่นจะมีความคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อยทำให้ต้องมีการแก้ไขในส่วนการให้ความร้อน เพราะความไม่เสมอกันของแผ่นโมดูล จึงมีการพัฒนาการให้ความร้อนในด้านร้อนของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก



ก.ปั้มน้ำ



ข. Water cooling block



ค.สายยาง

รูปที่3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การปรับปรุงการให้ความร้อนของ ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากปัญหาความไม่สม่ำเสมอของแผ่นโมดูลที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.1.3 การระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น แล้วนั้น จึงมีการปรับปรุงการให้ความร้อนกับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กใหม่เป็นการใช้อีทซิงค์ติดในด้านร้อนของแผ่นโมดูลแต่ละแผ่น และให้ความร้อนกับอีทซิงค์โดยตรงแทนการติดด้านร้อนของแผ่นโมดูลกับแผ่นโลหะนำความร้อน ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะการติดตั้งอีทซิงค์กับด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

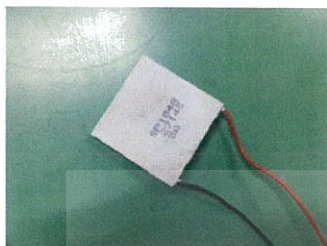
3.2 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 1 โมดูล

เป็นการทดสอบหาคุณสมบัติในการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเบอร์ SP1848 SA ดังรูปที่ 3.9ก ทำการทดสอบด้วยการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลไปทำการทดสอบการผลิตไฟฟ้าที่ความต่างอุณหภูมิต่างๆ 3 ค่า คือ 10, 25 และ 35°C ตามลำดับ ในทดสอบจะวัดค่าต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิด้านร้อน อุณหภูมิด้านเย็น แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆ เพื่อนำค่าที่ได้ในการทดลองไปสร้างกราฟพฤติกรรมกระแส-แรงดันของการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล หรือ I-V Curve ของโมดูลเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ โดยในการทดลองจะใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอีทซิงค์ร่วมกับพัดลมระบายความร้อน

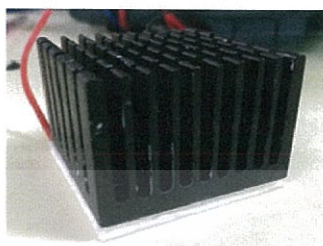
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของ 1 โมดูล มีดังนี้

- | | | |
|---|---|---------|
| 1.แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล SP1848 SA | 1 | โมดูล |
| ดังรูปที่ 3.10ก | | |
| 2.อีทซิงค์ ดังรูปที่ 3.10ข | 1 | ตัว |
| 3.ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อน ดังรูปที่ 3.2 | 1 | ชุด |
| 4.เครื่องวัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.10ค | 2 | เครื่อง |
| 5.มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแส ดังรูปที่ 3.10ง | 2 | เครื่อง |
| 6.แผ่นโปรโตบอร์ด ดังรูปที่ 3.10จ | 1 | แผ่น |

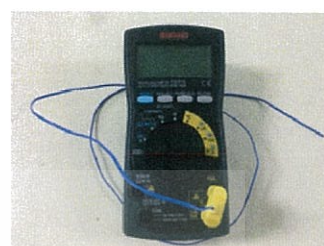
- | | |
|--|--------|
| 7.ตัวต้านทานค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.10ฉ | 20 ค่า |
| 8.กาวสองหน้านำความร้อน ดังรูปที่ 3.3ข | 1 ม้วน |
| 9.ชุดระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และพัดลม ดังรูปที่ 3.6 | 1 ชุด |



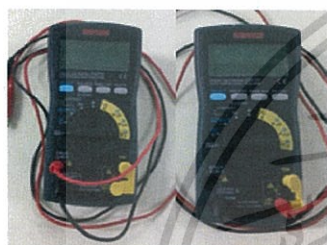
ก.เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



ข.ฮีทซิงค์



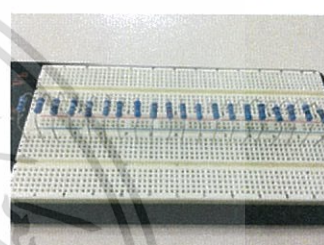
ค.เครื่องวัดอุณหภูมิ



ง.มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแส



จ.แผ่นโปรโตบอร์ด

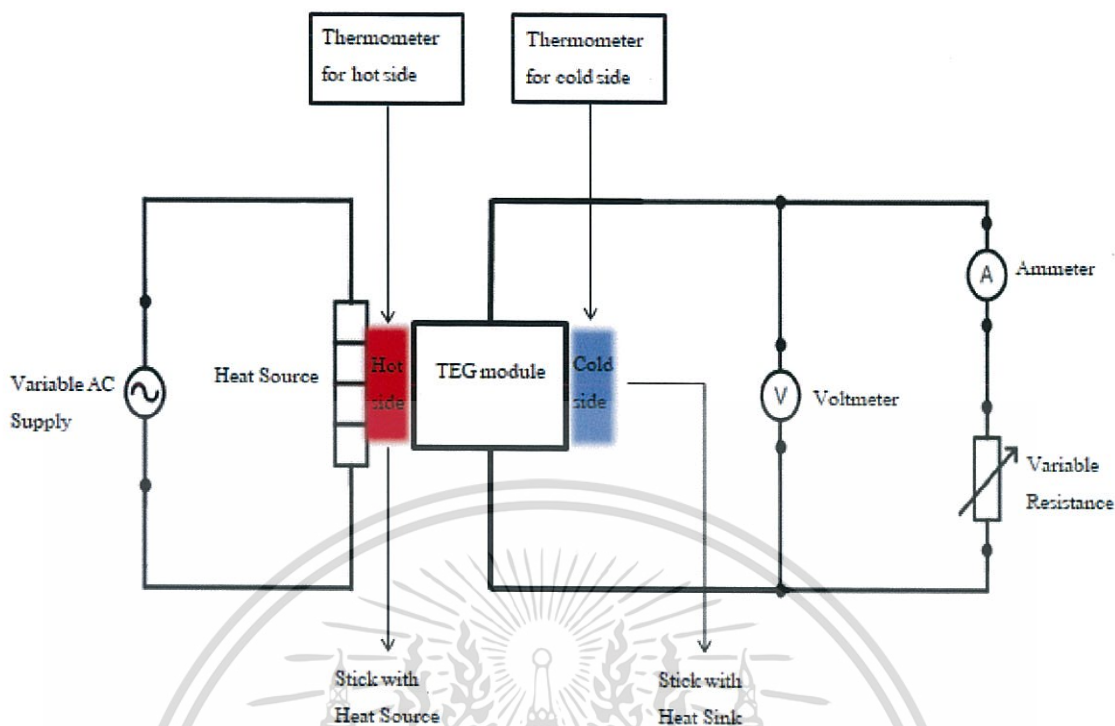


ฉ.ตัวต้านทานค่าต่างๆ

รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของ 1 โมดูล

3.2.2 การต่อวงจรทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ใช้ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนเพื่อเป็นแหล่งความร้อน (Heat Source) ในการทดสอบและปรับค่าแรงดันให้กับโหลดไฟเพื่อให้ได้ด้านร้อน (Hot Side) มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะมีการใช้กาวสองหน้านำความร้อนเพื่อยึดระหว่างแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลกับแผ่นโลหะ อีกด้านของแผ่นโมดูลจะมีการระบายความร้อนด้วยการต่อฮีทซิงค์ร่วมกับพัดลมระบายความร้อนซึ่งเป็นด้านเย็น (Cold Side) โดยใช้กาวสองหน้านำความร้อนในการเชื่อมต่อ จากนั้นสายไฟที่ออกจากตัวเทอร์โมอิเล็กทริกจะมี 2 เส้น คือเส้นไฟบวก(สีแดง)และไฟลบ(สีดำ) จากนั้นทำการต่ออนุกรมกับตัวต้านทานค่าที่ต้องการทดสอบ ซึ่งจะได้อ่างจร ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรเพื่อการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 1 โมดูล

3.2.3 วิธีการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของ 1 โมดูล

โดยจะแบ่งออกเป็นการทดลอง 3 ครั้งตามผลต่างของอุณหภูมิ 10, 25 และ 35 °C ตามลำดับ โดยจะมีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

- I. ต่่วงจรตามข้อ 3.2.2 โดยต่อค่าความต้านทานที่ต้องการทดลองตามตารางทดลองในบทที่ 4
- II. ปรับแรงดันป้อนเข้าหลอดไฟให้หลอดไฟสว่างและรอจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ แล้ววัดอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น จากนั้นจึงปรับเพิ่มหรือลดแรงดัน พร้อมทั้งอ่านค่าอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิเริ่มคงที่ จนได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ต้องการ บันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นขณะนั้นลงในตารางทดลอง
- III. เมื่อได้ผลต่างอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ ทำการบันทึกค่าความต้านทาน แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ขณะนั้นลงในตารางทดลอง พร้อมทั้งคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้
- IV. เปลี่ยนค่าความต้านทาน ที่ค่าผลต่างอุณหภูมิเดิม จากนั้นวัดและบันทึกค่าความต้านทานที่ใช้ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าขณะนั้น ทำการทดลองเช่นเดิมกับความต้านทานตัวอื่นๆจนครบทุกค่าที่ต้องการ
- V. ทำการทดลองตามข้อ II-IV จนครบทุกผลต่างอุณหภูมิ
- VI. นำค่าที่ได้จากการทดลองไปทำกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Curve) ทั้ง 3 ค่าผลต่างของอุณหภูมิ โดยพล็อตระหว่างแรงดัน (แกนตั้ง) และกระแส (แกนนอน)
- VII. เมื่อได้กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันแล้ว ทำการหาสมการเชิงเส้นที่ใช้ในการประมาณกราฟคุณลักษณะทั้งสามซึ่งจะมีลักษณะเชิงเส้นตรง นำสมการที่ได้จากการประมาณทั้ง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองตามกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะมีความผิดตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

สมการ หาจุดที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวโมดูลผลิตออกมา และบันทึกค่าต่างๆ ของจุดนั้นลงตาราง

3.3 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 4 โมดูล

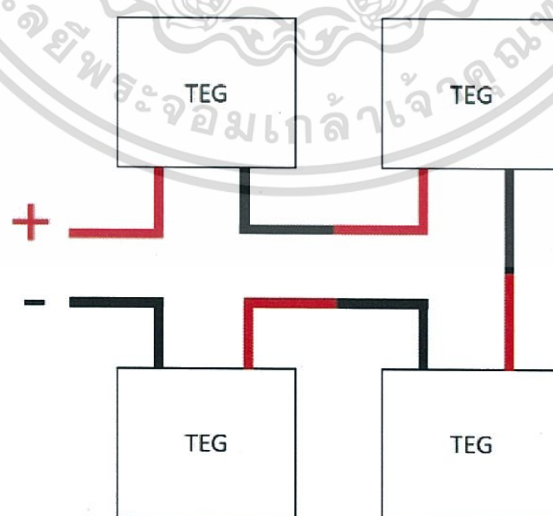
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล มีดังนี้

1.แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล SP1848 SA	4	โมดูล
ดั่งรูปที่ 3.10ก		
2.ฮีทซิงค์ ดั่งรูปที่ 3.10ข	4	ตัว
3.ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อน ดั่งรูปที่ 3.2	1	ชุด
4.เครื่องวัดอุณหภูมิ ดั่งรูปที่ 3.10ค	2	เครื่อง
5.มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแส ดั่งรูปที่ 3.10ง	2	เครื่อง
6.แผ่นโปรโตบอร์ด ดั่งรูปที่ 3.10จ	1	แผ่น
7.ตัวต้านทานค่าต่างๆ ดั่งรูปที่ 3.10ฉ	20	ค่า
8.กาวสองหน้านำความร้อน ดั่งรูปที่ 3.3ข	1	ม้วน
9.ชุดระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และพัดลม	1	ชุด
ดั่งรูปที่ 3.6		

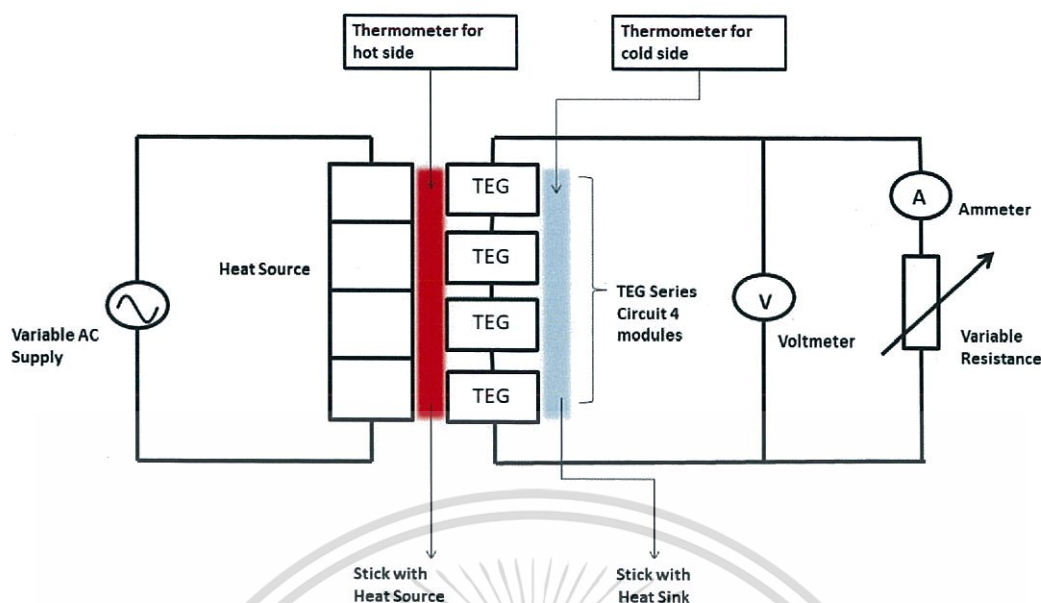
3.3.2 การต่อวงจรเพื่อการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล

การต่อวงจรเพื่อการทดสอบนั้นจะมีการต่อวงจรคล้ายกับการทดสอบในข้อ 3.2 แตกต่างกันเพียงมีการเพิ่มเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็น 4 โมดูลซึ่งทั้ง 4 โมดูลจะมีการต่ออนุกรมกันดั่งรูปที่ 3.12 ทำให้ได้วงจรการทดสอบโดยรวมดั่งรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การต่ออนุกรมเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรเพื่อการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 4 โมดูล

3.3.3 วิธีการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล

วิธีการทำการทดลอง ให้ทำการทดลองตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2.3 แต่ใช้วงจรดังรูปที่ 3.13

3.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก(Micro Power Generator)จาก 10 โมดูล

3.4.1 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และการปรับปรุงระบบระบายความร้อน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 10 โมดูล นำมาต่ออนุกรมกัน ใช้การระบายความร้อนด้วย Water Cooling Block และปั้มน้ำหล่อเย็น เนื่องจากการระบายความร้อนด้วยการใช้น้ำ เป็นวิธีการระบายความร้อนที่ดีที่สุด คือสามารถควบคุมอุณหภูมิด้านเย็นได้ดี ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองฝั่งมีมาก ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้มาก

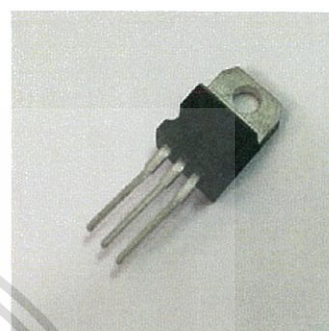
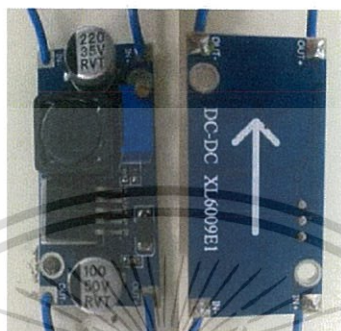
3.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก มีดังนี้

1.แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล SP1848 SA	10	โมดูล
ดังรูปที่ 3.10 ก		
3.ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อน ดังรูปที่ 3.2	1	ชุด
4.เครื่องวัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.10 ข	2	เครื่อง
5.มัลติมิเตอร์ วัดแรงดันและกระแส ดังรูปที่ 3.10 ค	2	เครื่อง
6.แผ่นโปรโตบอร์ด ดังรูปที่ 3.10 ง	1	แผ่น
7.ตัวต้านทานค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.10 จ	20	ค่า
8.ซิลิโคนนำความร้อน ดังรูปที่ 3.3 ก	1	หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.ชุดระบายความร้อนด้วย Water Cooling Block ดังรูปที่ 3.8	1	ชุด
10.แผงหลอดแอลอีดี ดังรูปที่ 3.14 ก	1	แผง
11.โมดูลวงจรเพิ่มแรงดัน ดังรูปที่ 3.14 ข	1	โมดูล
12.เรกกูเรเตอร์ 5 V เบอร์ L7805CV ดังรูปที่ 3.14 ค	1	ตัว



ก.แผงหลอดแอลอีดี

ข.โมดูลวงจรเพิ่มแรงดัน

ค.เรกกูเรเตอร์เบอร์ L7805CV

รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ Micro Power Generator

3.4.3 การต่อวงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

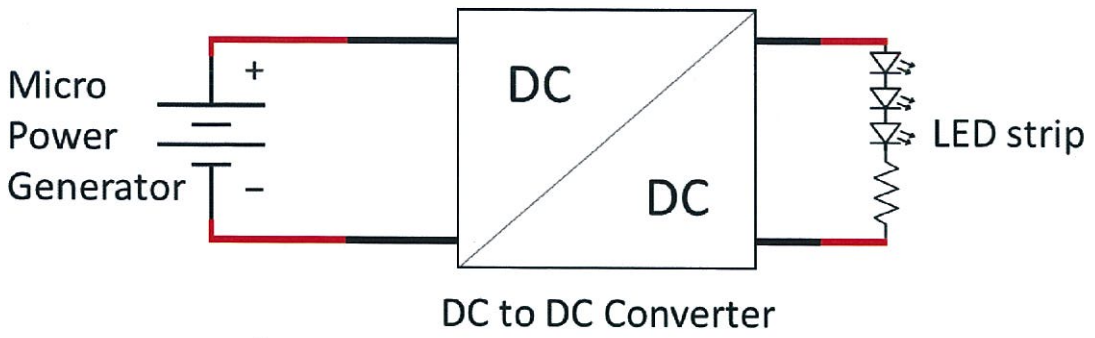
ต่อวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะประกอบด้วย เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 10 โมดูล แต่ละโมดูลจะต่ออนุกรมกันเหมือนการทดลอง 4 โมดูล โดยจะใช้ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และใช้ระบบ Water Cooling Block เป็นระบบระบายความร้อน

3.4.4 วิธีทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

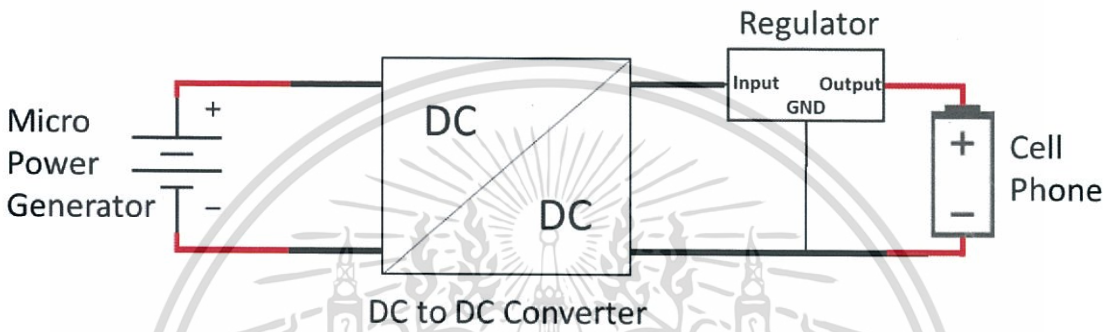
การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะทำการทดสอบโดยใช้วงจรระดับแรงดัน(Boost Converter) ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ในการทดสอบจะทดสอบจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้า 2 ชนิด คือ แผงหลอดแอลอีดี และชาร์ตแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือแบบซ้ำ โดยการต่อวงจรทำดังนี้

- I. การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แผงหลอดแอลอีดีจะต่อไฟฟ้าด้านออกของชุดผลิตไฟฟ้ากับวงจรขยายแรงดัน แล้วจึงต่อเข้ากับหลอดแอลอีดี บันทึกค่า แรงดัน กระแส และกำลังที่หลอดใช้ของหลอด ดังรูปที่ 3.15
- II. การต่อวงจรการชาร์ตแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ จะต่อวงจรเหมือนการต่อแอลอีดี แต่จะมีการเพิ่มเรกกูเรเตอร์ 5 โวลต์ ก่อนการต่อวงจรเข้ากับหลอด ดังรูปที่ 3.16 และขาของเรกกูเรเตอร์ ดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การต่อวงจรทดสอบจ่ายโพลิตแรงไหลอดแอลอีดี



รูปที่ 3.16 การต่อวงจรทดสอบจ่ายไฟฟ้าชาร์จแบตเตอรี่แบบซ้ำ



รูปที่ 3.17 ขาของเรกกูเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ และประเมินผล

4.1 ผลการทดสอบเทอร์มิสเตอร์โมดูล 1 โมดูล

4.1.1 ผลการทดสอบเทอร์มิสเตอร์โมดูล 1 โมดูล ที่ผลต่างอุณหภูมิ 10, 25 และ 35 °C ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่ไหลค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 10 °C สำหรับ 1 โมดูล

$T_H = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_C = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$	
R(โอห์ม)	V(mV)	I(mA)	P(mW)
0.5	20.6	29.54	0.608524
2	73.8	23.46	1.731348
5	101	19.9	2.0099
15	173	11.41	1.97393
24	204.9	8.47	1.735503
51	236	4.62	1.09032
100	255.5	2.55	0.651525
120	257.2	2.12	0.545264
150	255.6	1.7	0.43452
220	259.6	1.17	0.303732
330	268.3	0.8	0.21464
470	270.1	0.57	0.153957
1k	266.5	0.26	0.06929
4.7k	272.2	0.05	0.01361
7.5k	276.7	0.03	0.008301
10k	270.9	0.02	0.005418
47k	271	0	0
100k	273.2	0	0
2M	274.7	0	0
10M	279.5	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่ไหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 25 °C สำหรับ 1 โมดูล

$T_H = 62\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_C = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$	
R(โอห์ม)	V(mV)	I(mA)	P(mW)
0.5	49.2	78.5	3.8622
2	142.2	65.6	9.32832
5	276.6	53.7	14.85342
15	448	29.47	13.20256
24	521	21.62	11.26402
51	604	11.86	7.16344
100	644	6.41	4.12804
120	654	5.43	3.55122
150	663	4.43	2.93709
220	667	3.03	2.02101
330	663	2	1.326
470	667	1.41	0.94047
1k	677	0.67	0.45359
4.7k	684	0.14	0.09576
7.5k	684	0.09	0.06156
10k	684	0.06	0.04104
47k	684	0.01	0.00684
100k	684	0	0
2M	686	0	0
10M	686	0	0

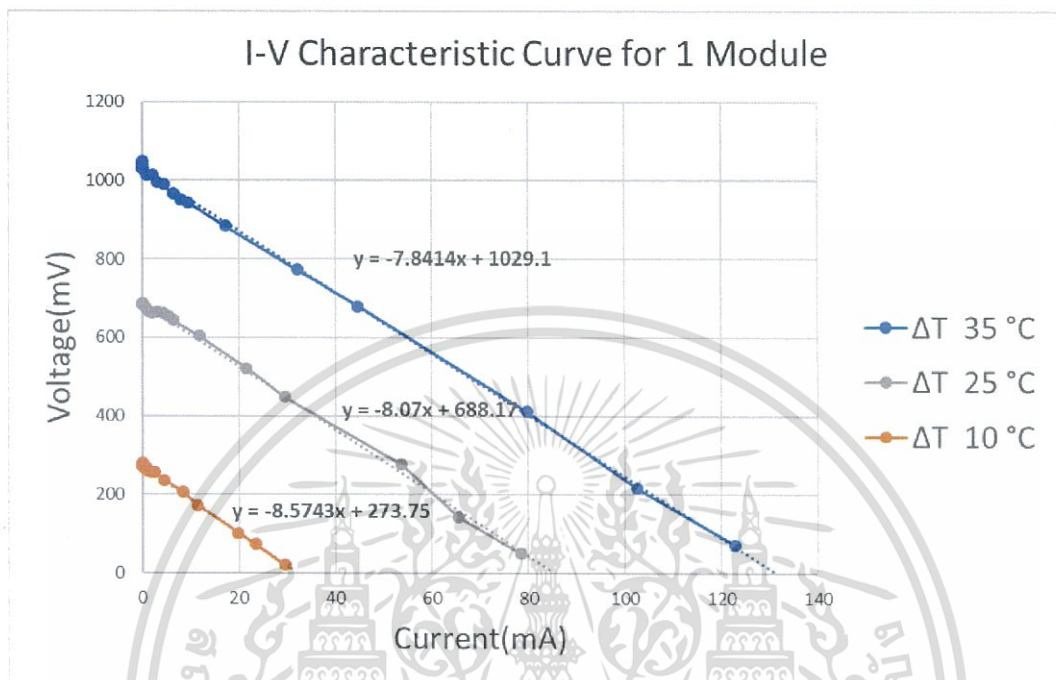
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่ไหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 35 °C สำหรับ 1 โหมด

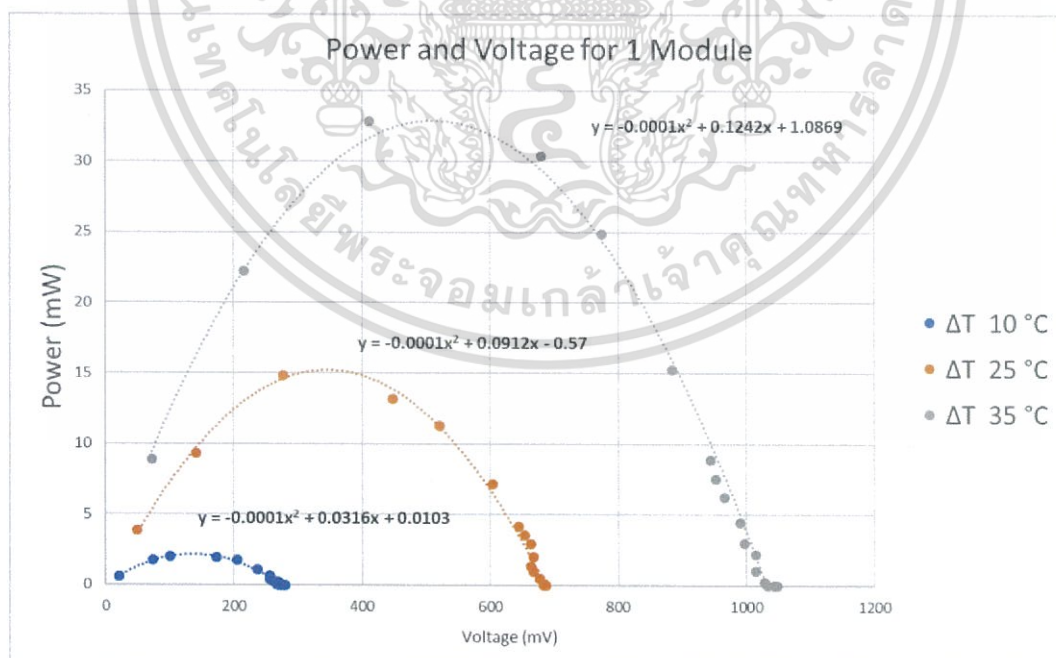
$T_H = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_C = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	
R(โอห์ม)	V(mV)	I(mA)	P(mW)
0.5	72.2	122.8	8.86616
2	216.6	102.6	22.22316
5	412	79.7	32.8364
15	680	44.7	30.396
24	774	32.11	24.85314
51	885	17.22	15.2397
100	944	9.42	8.89248
120	952	7.91	7.53032
150	966	6.45	6.2307
220	990	4.49	4.4451
330	997	3	2.991
470	1015	2.14	2.1721
1k	1015	1.01	1.02515
4.7k	1028	0.21	0.21588
7.5k	1031	0.13	0.13403
10k	1031	0.1	0.1031
47k	1034	0.01	0.01034
100k	1043	0	0
2M	1045	0	0
10M	1048	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic Curve) และกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้า ของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูลจากการทดสอบที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

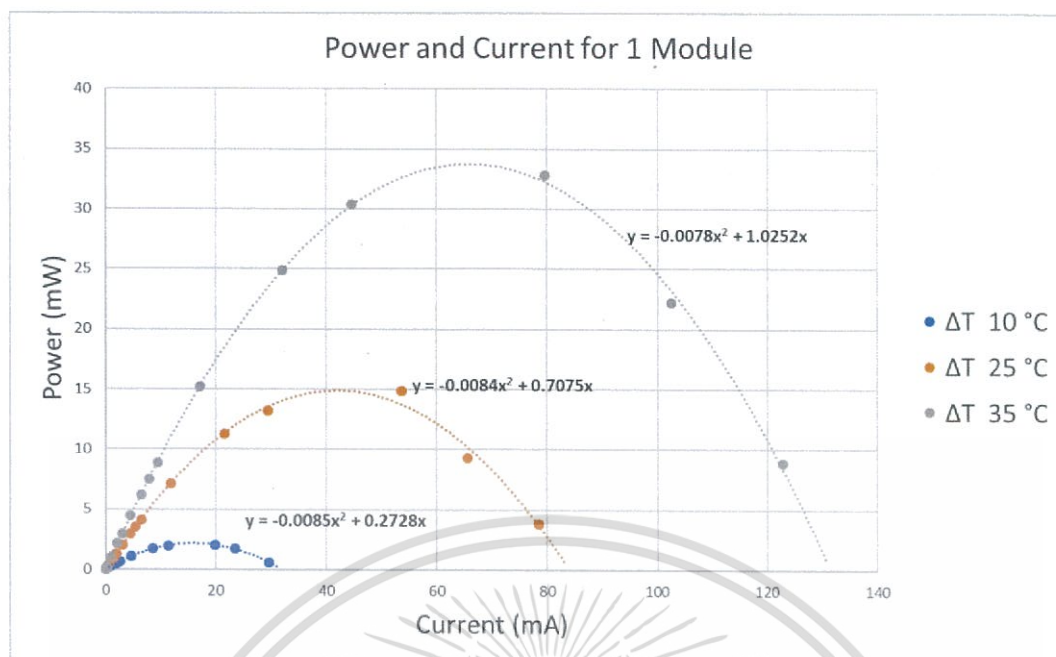


รูปที่ 4.1 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน จากการทดสอบ 1 โมดูล



รูปที่ 4.2 กราฟคุณลักษณะแรงดัน-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 1 โมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 1 โมดูล

จากกราฟคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบผลที่ได้มีแนวโน้มในลักษณะเส้นตรง ซึ่งจะได้สมการเชิงเส้นเพื่อการประมาณ 3 สมการ แบ่งตามผลต่างของอุณหภูมิที่ 10, 25 และ 35 °C คือ สมการที่ 4.1-4.3 ตามลำดับ

$$V = -8.5743(I) + 273.75 \text{ ที่ } \Delta T=10 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

$$V = -8.0700(I) + 688.17 \text{ ที่ } \Delta T=25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.2)$$

$$V = -7.8414(I) + 1029.1 \text{ ที่ } \Delta T=35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.3)$$

และจากสมการเส้นตรงทั้ง 3 นำไปหาจุดที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าได้ หรือหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละความแตกต่างของอุณหภูมิ ผลลัพธ์เป็นไปดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ $\Delta T = 10, 25$ และ $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับ 1 โมดูล

ΔT	I(mA)	V(mV)	R(โอห์ม)	P_{MAX} (mW)
10	15.96	136.875	8.576	2.185
25	42.64	344.09	8.070	14.671
35	65.62	514.55	7.841	33.765

4.2 ผลการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 4 โมดูล

4.2.1 ผลการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล ที่ผลต่างอุณหภูมิ 10, 25 และ 35 °C ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 10 °C สำหรับ 4 โมดูล

TH = 43 °C		TC = 33 °C	
R(โอห์ม)	V(mV)	I(mA)	P(mW)
0.5	45.7	50.6	2.31242
2	102.1	47.2	4.81912
5	214.2	41.5	8.8893
15	424	28.14	11.93136
24	523	21.73	11.36479
51	666	13.12	8.73792
100	762	7.61	5.79882
120	787	6.51	5.12337
150	804	5.37	4.31748
220	826	3.75	3.0975
330	845	2.55	2.15475
470	859	1.81	1.55479
1k	870	0.87	0.7569
4.7k	879	0.18	0.15822
7.5k	879	0.11	0.09669
10k	879	0.08	0.07032
47k	915	0.01	0.00915
100k	921	0	0
2M	935	0	0
10M	940	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 25 °C สำหรับ 4 โมดูล

$T_H = 62\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_C = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$	
R(โอห์ม)	V(mV)	I(mA)	P(mW)
0.5	89.8	139	12.4822
2	319.2	124.8	39.83616
5	575	113.1	65.0325
15	1169	76.9	89.8961
24	1453	60.3	87.6159
51	1867	36.57	68.27619
100	2164	21.54	46.61256
120	2228	18.53	41.28484
150	2275	15.2	34.58
220	2345	10.66	24.9977
330	2403	7.24	17.39772
470	2441	5.17	12.61997
1k	2490	2.49	6.2001
4.7k	2543	0.54	1.37322
7.5k	2551	0.33	0.84183
10k	2540	0.25	0.635
47k	2517	0.05	0.12585
100k	2517	0.02	0.05034
2M	2533	0	0
10M	2543	0	0

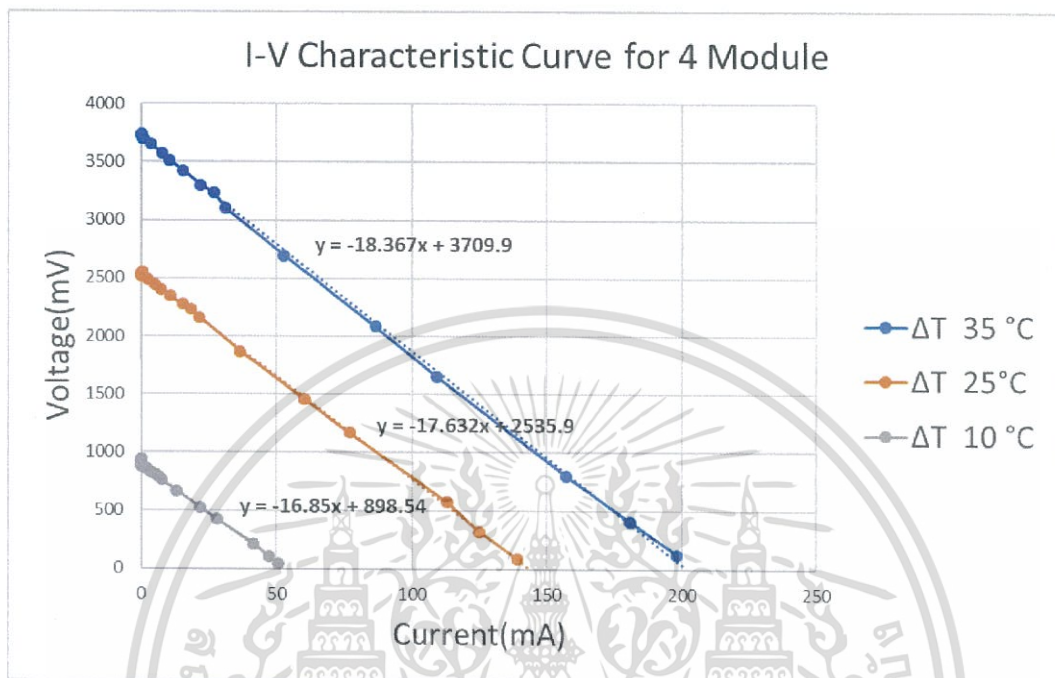
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ และผลต่างอุณหภูมิ 35 °C สำหรับ 4 โมดูล

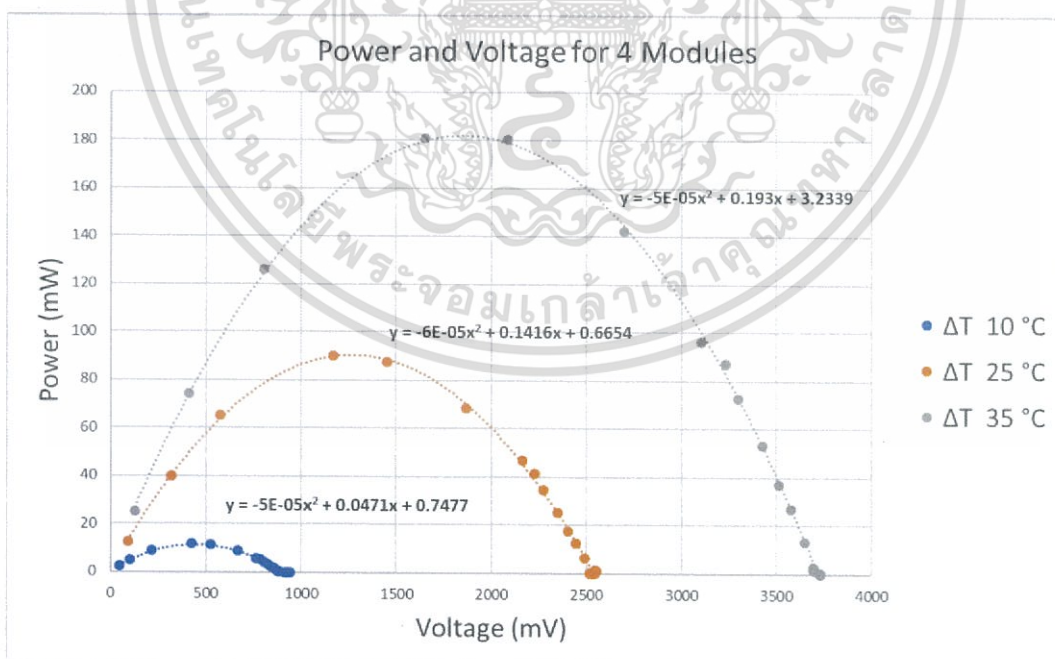
$T_H = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_C = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	
R(โอห์ม)	V(mV)	I(mA)	P(mW)
0.5	126.1	198.2	24.99302
2	410	180.8	74.128
5	803	157.1	126.1513
15	1655	109.2	180.726
24	2085	86.5	180.3525
51	2697	52.7	142.1319
100	3107	30.97	96.22379
120	3233	26.9	86.9677
150	3299	21.99	72.54501
220	3424	15.55	53.2432
330	3510	10.56	37.0656
470	3578	7.57	27.08546
1k	3651	3.66	13.36266
4.7k	3695	0.78	2.8821
7.5k	3696	0.49	1.81104
10k	3710	0.37	1.3727
47k	3730	0.07	0.2611
100k	3732	0.03	0.11196
2M	3732	0	0
10M	3732	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic Curve) และกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้า ของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูลจากการทดสอบที่ผลต่างอุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

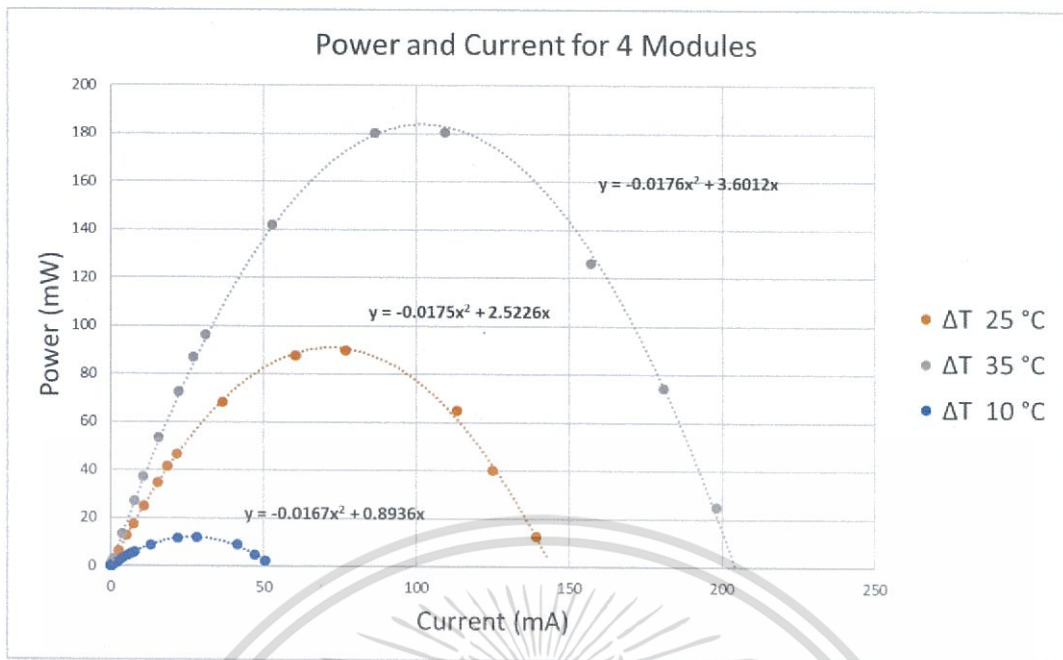


รูปที่ 4.4 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน จากการทดสอบ 4 โมดูล



รูปที่ 4.5 กราฟคุณลักษณะแรงดัน-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 4 โมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบ 4 โมดูล

เช่นเดียวกับการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล จากการจะได้สมการเชิงเส้นเพื่อการประมาณ 3 สมการ แบ่งตามผลต่างของอุณหภูมิที่ 10, 25 และ 35 °C คือ สมการที่ 4.4-4.6 ตามลำดับ

$$V = -16.850(I) + 898.54 \text{ ที่ } \Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.4)$$

$$V = -17.632(I) + 2535.9 \text{ ที่ } \Delta T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.5)$$

$$V = -18.367(I) + 3709.9 \text{ ที่ } \Delta T = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.6)$$

และจุดที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าได้ ของแต่ละผลต่างของอุณหภูมิ ผลลัพธ์เป็นไปดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ $\Delta T = 10, 25$ และ $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับ 4 โมดูล

ΔT	I(mA)	V(mV)	R(โอห์ม)	P_{MAX} (mW)
10	26.663	449.27	16.85	11.979
25	71.912	1267.95	17.632	91.181
35	100.994	1854.95	18.367	187.339

4.3 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก(Micro Power Generator) จาก 10 โมดูล

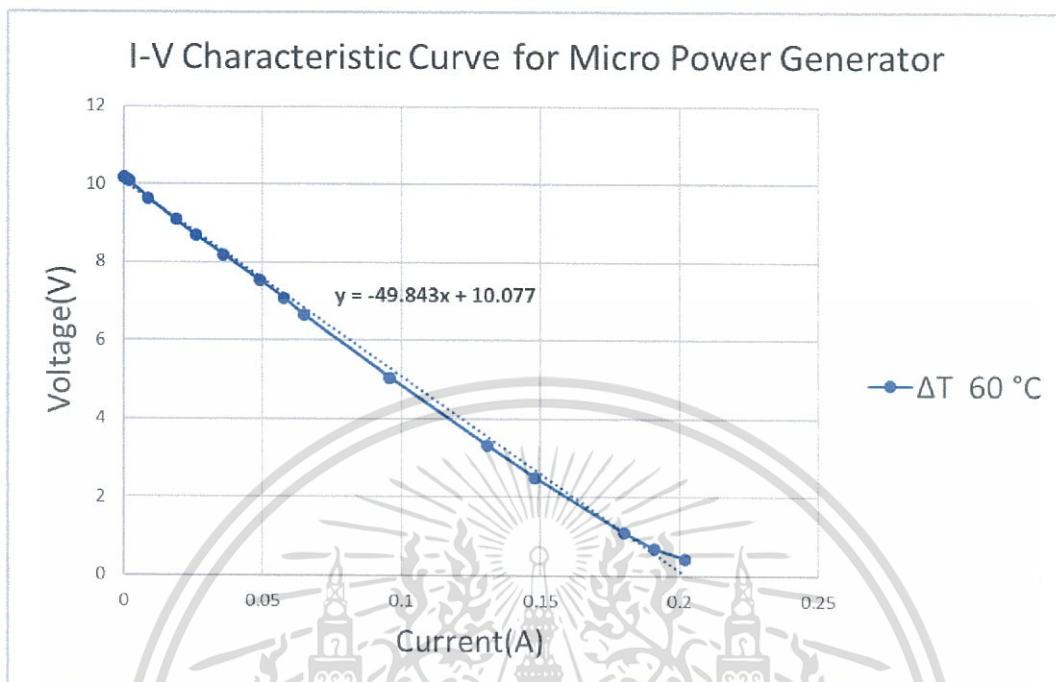
4.3.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่สภาพแวดล้อมการทดลองเดิม แต่ได้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ 60 °C จากการปรับปรุงระบบระบายความร้อนและระบบให้ความร้อน

ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ที่โหลดค่าต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

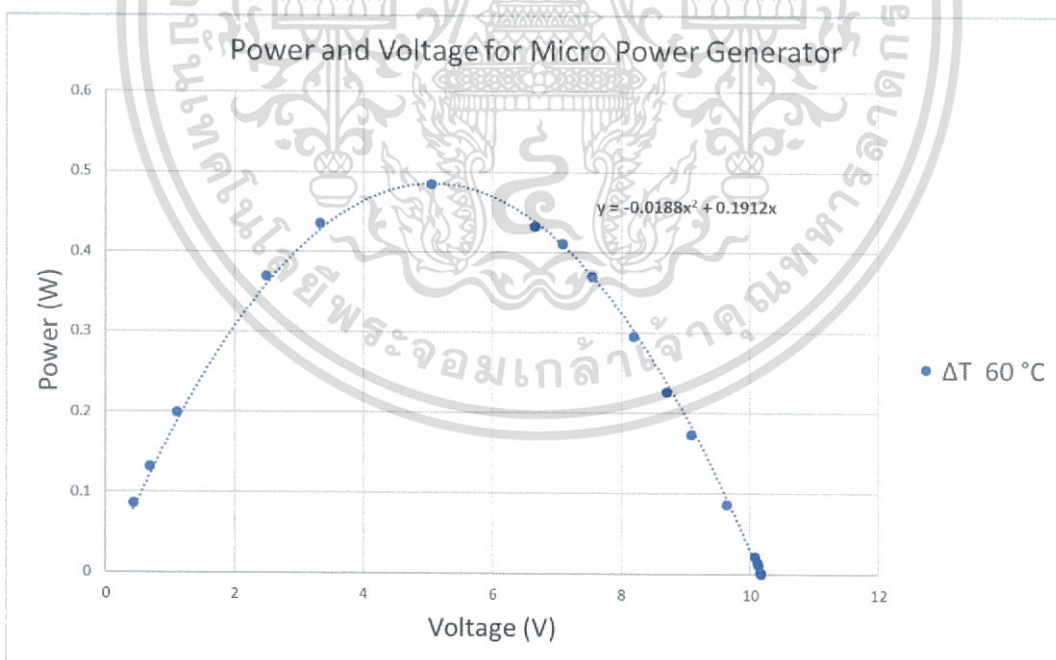
$T_H = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_C = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	
R(โอห์ม)	V(V)	I(A)	P(W)
0.5	0.427	0.202	0.086254
2	0.69	0.191	0.13179
5	1.104	0.18	0.19872
15	2.497	0.148	0.369556
24	3.325	0.131	0.435575
51	5.05	0.096	0.4848
100	6.66	0.065	0.4329
120	7.09	0.058	0.41122
150	7.54	0.049	0.36946
220	8.19	0.036	0.29484
330	8.7	0.026	0.2262
470	9.08	0.019	0.17252
1k	9.63	0.009	0.08667
4.7k	10.08	0.00215	0.021672
7.5k	10.12	0.00134	0.013561
10k	10.13	0.00101	0.010231
47k	10.16	0.00021	0.002134
100k	10.17	0.0001	0.001017
2M	10.17	0	0
10M	10.17	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic Curve) และกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9ตามลำดับ

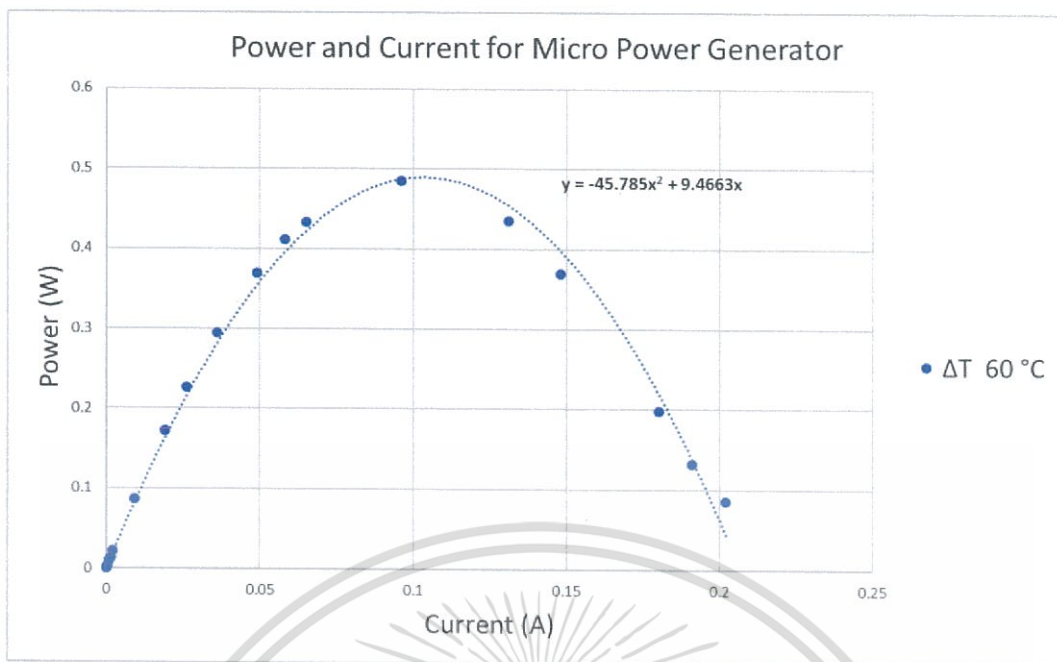


รูปที่ 4.7 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 4.8 กราฟคุณลักษณะแรงดัน-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลังไฟฟ้า จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

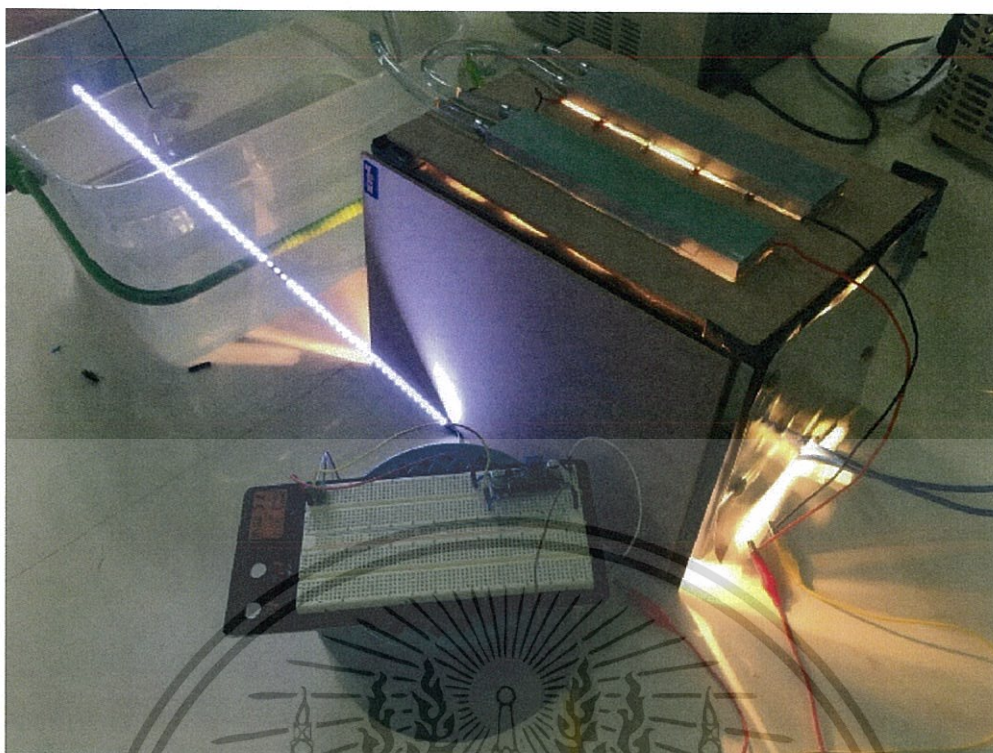
เช่นเดียวกับการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จากกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน จะได้สมการเชิงเส้นเพื่อการประมาณเส้นกราฟ ดังสมการที่ 4.7 และจุดที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของการผลิตไฟฟ้า เป็นไปตามตารางที่ 4.10

$$V = -49.843(I) + 10.077 \text{ ที่ } \Delta T = 60^\circ\text{C} \tag{4.7}$$

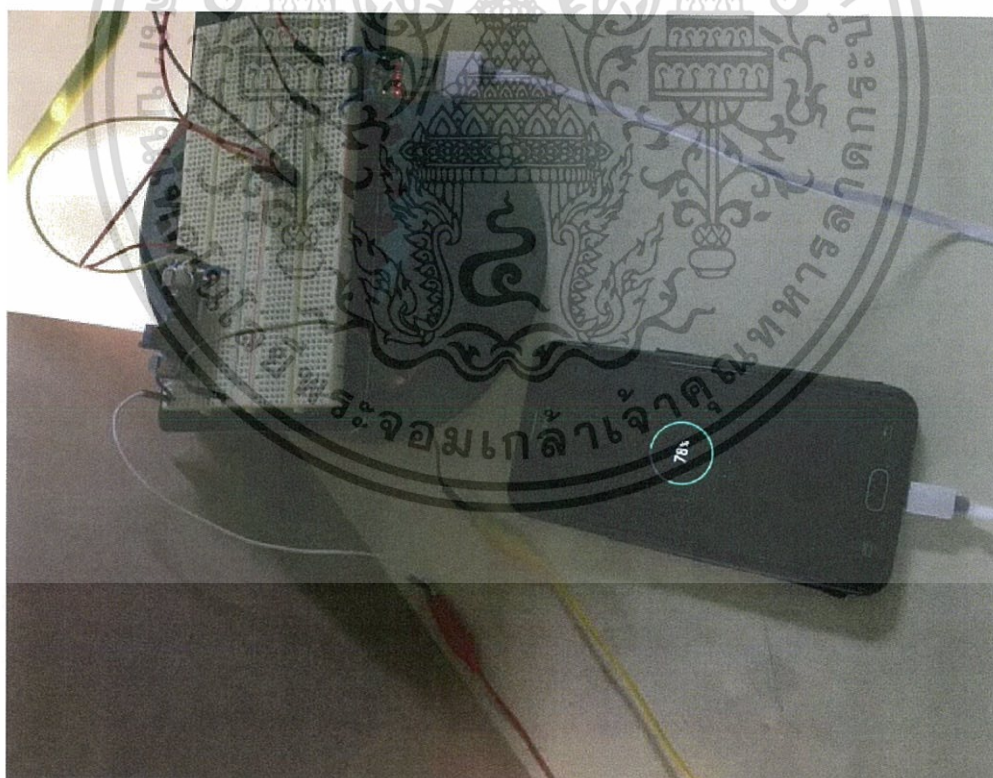
ตารางที่ 4.10 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ สำหรับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ΔT	I(A)	V(V)	R(โอห์ม)	$P_{MAX}(W)$
60	0.101	5.039	49.891	0.509

4.3.3 การทดลองต่อภาระทางไฟฟ้า สามารถขับแผงหลอดไฟแอลอีดี(LED strip) ได้ และสามารถชาร์ตมือถือแบบเข้าได้ ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ โดยขณะขับแผงหลอดแอลอีดี มีปริมาณต่างๆ ดังนี้ แรงดันไฟฟ้า 7.72 โวลต์ กระแส 30 มิลลิแอมป์ และกำลังไฟฟ้า 0.24 วัตต์



รูปที่ 4.10 การต่อหลอดแผงหลอดแอลอีดี(LED strip)



รูปที่ 4.11 การต่อหลอดแบบชาร์จแบตเตอรี่แบบซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ข้อจำกัดของการทดลอง

5.1.1 ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนของการทดสอบ

การจำลองอุณหภูมิด้านร้อนในการทดสอบ เป็นการจำลองอุณหภูมิโดยใช้ความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ 100 วัตต์จำนวน 4 หลอด ซึ่งด้วยวิธีการจำลองนี้มีข้อจำกัดคือ ทำให้อุณหภูมิที่สามารถทำได้นั้นถูกจำกัดด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าหลอดไฟ ซึ่งเพื่อความปลอดภัยของผู้ทดลองและอุปกรณ์การทดสอบจึงมีการจำกัดให้ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหลอดไฟ มีค่าไม่เกิน 220 โวลต์ ทำให้อุณหภูมิด้านร้อนที่สามารถทำได้ ในสภาวะห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิ 25 °C นั้นจะมีค่าไม่เกิน 120 °C และชุดจำลองนี้มีข้อจำกัดในเรื่องการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งควบคุมได้ยาก ทำให้มีข้อจำกัดในการเลือกค่าอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบมีจำนวนค่าที่น้อย เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีค่าที่ไม่ละเอียด

5.1.2 ชุดระบายความร้อนเพื่อคงที่อุณหภูมิด้านเย็น

ข้อจำกัดในเรื่องความแตกต่างของอุณหภูมิที่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากการให้ความร้อนในด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จะเกิดการถ่ายเทความร้อนมายังด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ส่งผลให้ต้องมีการทำระบบระบายความร้อนในด้านเย็นเพื่อให้มีความคงที่ของอุณหภูมิด้านเย็นมากที่สุด แต่การเพิ่มความร้อนที่มากขึ้นในด้านร้อนมีการส่งผลให้อุณหภูมิด้านเย็นเพิ่มขึ้นเช่นกัน และการระบายความร้อนวิธีที่ใช้พัดลมระบายความร้อนส่งผลกระทบบัให้อุณหภูมิด้านร้อนของแผ่นโมดูลลดลงอีกด้วย ทำให้การควบคุมอุณหภูมิเพื่อการทดสอบทำได้ยาก จึงทำให้การทดสอบจำลองความแตกต่างของอุณหภูมิได้ไม่หลากหลาย

5.1.3 เครื่องมือการวัด และบันทึกค่าผลการทดสอบ

ข้อจำกัดในการวัดอุณหภูมิ เนื่องจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิไม่สามารถวัดที่ผิวของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้โดยตรง เนื่องจากมีอุปกรณ์อื่นติดตั้งบริเวณผิวของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ทำให้การวัดอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบจะใช้วิธีการวัดอุณหภูมิรอบบริเวณเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแล้วหาค่าเฉลี่ยทั้งด้านร้อนและเย็น ซึ่งอาจมีการคลาดเคลื่อนเนื่องจากระบบระบายความร้อน หรืออุณหภูมิภายนอกซึ่งมีผลกระทบบักับผิวของโลหะด้านร้อนที่ไม่ถูกบดบังด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีค่าต่ำกว่าบริเวณผิวของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

5.2 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

5.2.1. สรุปผลการทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 1 โมดูล

จากผลการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 1 โมดูล ซึ่งในตอนเริ่มต้นของการทดลองได้ใช้อลูมิเนียมฮีทซิงค์ในการระบายความร้อนเท่านั้น และพบว่าความร้อนจากด้านร้อนเกือบทั้งหมดถ่ายเทมาด้านเย็น ทำให้ผลต่างอุณหภูมิที่จำลองได้มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ (กำลังที่ผลิตได้ในการทดลองแรก 3 mW) จึงมีการปรับปรุงโดยการเพิ่มพัดลมระบายความร้อนช่วยในระบบ ทำให้ผลต่างอุณหภูมิที่ทำได้มีค่าสูงขึ้น ณ สภาพแวดล้อมเดิม ดังผลการทดลองคือ ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่จำลองได้ 35°C จึงทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้คือ 30 mW ที่โหลดความต้านทานประมาณ 8 โอห์ม แต่อย่างไรก็ตามการระบายความร้อนแบบนี้ยังไม่สามารถใช้งานเป็นเวลานานได้เนื่องจากผลกระทบจากพัดลม ทำให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนถูกระบายด้วย จากปัญหานี้จึงนำมาพิจารณาเพื่อปรับปรุงระบบให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อไป

5.2.2 สรุปผลการทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 4 โมดูล

จากผลการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 4 โมดูล ซึ่งนำมาต่ออนุกรมกัน และใช้ระบบระบายความร้อนเป็นพัดลมระบายความร้อนร่วมกับฮีทซิงค์ แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตไฟฟ้าได้กำลังสูงสุดคือ 187 mW ที่ความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดที่จำลองได้ 35°C เมื่อต่อโหลดตัวต้านทาน 18 โอห์ม การทดสอบแบบใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 4 โมดูล เมื่อวัดกำลังไฟฟ้าต่อ 1 โมดูล พบว่า เมื่อวัดกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูลจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากบนระนาบของแผ่นความร้อนมีอุณหภูมิที่ไม่เท่ากัน และการวางตัวของโมดูลส่งผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทไปด้านเย็นของแผ่นโมดูล ซึ่งมีค่าลดลงจากการทดลองของ 1 โมดูล และอาจทำให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่สภาวะเดิม ทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นจากเดิมเล็กน้อย

5.3 สรุปผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Power Generator) จาก 10 โมดูล

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยทำขึ้นจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 10 โมดูล ซึ่งนำมาต่ออนุกรมกัน แต่มีการปรับปรุงระบบให้ความร้อน และระบบระบายความร้อนของชุดผลิตไฟฟ้า ดังนี้

ด้านร้อนของชุดผลิตไฟฟ้าเปลี่ยนจากแผ่นระนาบความร้อน เป็นใช้ฮีทซิงค์ติดที่ด้านร้อนของแต่ละโมดูลทั้ง 10 โมดูล เพื่อเป็นจุดดูดซับความร้อนและ แก้ปัญหาที่ตัวแผ่นระนาบความร้อนและแผ่นโมดูลมีการโก่งตัวจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งทำให้ความร้อนถูกดูดซับไว้นานและมากขึ้นเพิ่มประสิทธิภาพในด้านร้อนของชุดเครื่องกำเนิด

ด้านเย็นปรับปรุงระบบระบายความร้อนใหม่เป็นการใช้น้ำหล่อเย็น เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของอุณหภูมิให้คงที่มากที่สุด และลดปัญหาการระบายความร้อนแบบที่จะส่งผลกระทบต่อารดูดซับความร้อน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถได้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 60°C ที่สภาวะการทดลองเดิม ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้มีค่าเป็น 0.509 W ที่โหลดความต้านทาน 50 โอห์ม และค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้มีการทดสอบการต่อภาระทางไฟฟ้าอื่นๆ โดยใช้วงจรเพิ่มแรงดันช่วยในการควบคุมแรงดันขาออก ผลการทดสอบที่ได้คือ สามารถขับหลอดไฟแอลอีดีแบบแถว (LED Strip) ให้สว่างได้ และสามารถชาร์จแบตเตอรี่ของโทรศัพท์มือถือแบบชาร์จได้

5.4 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาโครงการนี้ พบว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่หลากหลายอุณหภูมิ แต่หากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีค่าสูง ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย (ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น) และเสถียรของอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก มีผลต่อความเสถียรภาพของการผลิตไฟฟ้า ทำให้การใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำ จำเป็นจะต้องคำนึงถึงวิธีการกักเก็บความร้อนเพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และระบบความเย็นที่จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านมีค่าสูงที่สุด โดยจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนด้วย อีกสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญคือ คุณภาพของไฟฟ้าที่ผลิตได้ เนื่องจากไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นก่อนการต่อภาระทางไฟฟ้าต้องผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมแรงดันให้ตรงตามที่ภาระทางไฟฟ้ากำหนด ดังนั้นเทคโนโลยีการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถเป็นทางเลือกในการนำความร้อนเหลือทิ้งที่เปล่าประโยชน์ ให้สามารถนำมาใช้งานได้ แต่ต้องศึกษาในเรื่องความคุ้มค่าในการลงทุนเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ข้อเสนอแนะในการต่อยอดโครงการ

1.ปรับปรุงการทดลองในส่วนของระบบจำลองอุณหภูมิ ซึ่งจากเดิมเป็นการใช้หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ให้แผ่ความร้อนออกมาเป็นการจำลองความร้อน ซึ่งเป็นการจำลองที่ให้ผลไม่แน่นอน และควบคุมอุณหภูมิได้ยาก ทำให้การเปลี่ยนระบบจำลองความร้อนให้ที่สามารถควบคุมให้มีความแม่นยำมากกว่านี้ จะทำให้ผลการทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น และการทดสอบทำได้สะดวกมากขึ้น โดยอาจเปลี่ยนแหล่งจำลองความร้อนเป็นเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ หรือใช้น้ำที่ควบคุมอุณหภูมิป้อนเข้าที่ด้านร้อนของแผ่นโมดูลแทน

2.ปรับปรุงการวัดค่าอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพื่อความแม่นยำจำเป็นต้องรู้ค่าของอุณหภูมิที่แน่นอนในขณะที่ทำการวัดค่าอื่นๆด้วย ดังนั้นการใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่มีความเสถียร และมีความไวในการวัดค่าที่มากกว่านี้ จะทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น

3.การทำระบบควบคุมการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Maximum Power Point Tracking: MPPT) เนื่องจากในแต่ละค่าความแตกต่างของอุณหภูมินั้นความสามารถในการผลิตไฟฟ้านั้น ยังขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดที่นำมาต่อ เพื่อให้ใช้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดได้จึงควรมีการสร้างชุดควบคุมให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอดเวลา

4.การนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง จัดหาแหล่งความร้อนที่มีคุณภาพในการผลิตไฟฟ้า และทำการออกแบบชุดติดตั้งในพื้นที่แหล่งความร้อนจริง เพื่อทดสอบและบันทึกผลเป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงพัฒนา ในการใช้งานในพื้นที่จริง เพื่อทำการแก้ไขให้เหมาะสมและใช้งานได้ต่อไป

5.ทำการประเมินความคุ้มค่าในการใช้งานเทคโนโลยีนี้ เพื่อหาจุดคุ้มทุนของการลงทุน โดยอาจจะประเมินอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปรียบเทียบกับปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการผลิต และหาจุดคุ้มทุนจากข้อมูลทั้งหมด เช่นจำนวนโมดูล ระบบระบายความร้อน ระบบดูดซับความร้อน และความสูญเสียในระบบ รวมทั้งอายุการใช้งานด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.M. Rowe, Ph.D., D.Sc., *Thermoelectric handbook : macro to nano*, CRC Press Taylor&Francis Group, 2006
- [2] เศรษฐา รัตนพันธ์, *เทอร์โมอิเล็กทริกส์ : ศาสตร์แห่งการคู่ควมระหว่างไฟฟ้าและความร้อนในวัสดุ*, กรุงเทพฯ, พิสิษฐ์ประยูรต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [3] ทศวรรษ สีตะวัน, *เทคโนโลยี เทอร์โมอิเล็กทริก*, พิมพ์ครั้งที่1., กรุงเทพฯ, สนพ.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [4] D.M. Rowe, *Thermoelectrics and its energy harvesting*, CRC Press Taylor&Francis Group, 2012
- [5] Callen, H.B., *Irreversible thermodynamics of thermoelectricity*, Rev. Mod. Phys., 26,237, 1954
- [6] Heikes, R.R., and Ure, R.W., *Thermoelectricity: Science and Engineering*, Interscience, New York, 1961.
- [7] Harman, T.C., and Honig, J.M., *Thermoelectric and Thermomagnetic Effect and Applications*, McGraw-Hill, New York, 1967.
- [8] Ioffe, A.F., *Semiconductor Thermoelement and Thermoelectric Cooling*, Infosearch, London, 1957
- [9] El-Genk, M.S. and Saber, H.H., *Energy Covers. Manger.*, 44, 1069, 2003.
- [10] Wensi Wang, Victor Cionca, Ningning Wang, Mike Hayes, Brendan O’Flynn, and Cian O’Mathuna, “Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol 2013, 2013, pp7-8.
- [11] รศ.ดร.วีรเชษฐ์ ชันเงิน และ ดร.วุฒิปด ธาราธิ์เรชษฐ์, *อิเล็กทรอนิกส์กำลัง*, พิมพ์ครั้งที่14, กรุงเทพฯ, สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินตติ้ง, 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

An Application of Thermoelectric Generator (TEG)

as Micro Power Generator from Waste Heat

กชวรรณ จันทนาภรณ์¹, จิรภัทร ดวงสุวรรณ¹, จิรภัทร ประภาศิริสุดี¹, ต๋อวงศ์ เลิศเด่นธรรม¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ดลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์โมดูลและประยุกต์ใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากการใช้ความร้อนเหลือทิ้ง ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำ(ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส) การศึกษานี้เป็นการใช้วิธีการทดลองในการหาพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูลและ 4 โมดูล โดยจำลองอุณหภูมิด้านร้อนขึ้น บนที่ก้นเพื่อนำไปวางกราฟพฤติกรรมของกระแสแรงดัน และหาจุดที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจากกราฟ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 10 25 และ 35 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงระบบสำหรับที่จะใช้สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กให้ดีขึ้น เช่น การปรับปรุงระบบให้ความร้อน การปรับปรุงระบบระบายความร้อน เป็นต้น เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถผลิตไฟฟ้าในปริมาณที่มากพอที่จะจ่ายให้กับโหลดขนาดเล็กได้ โดยผลการทดลองที่ได้คือ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระบบระบายความร้อนใช้พัดลมระบายอากาศร่วมกับฮีตซิงค์สำหรับ 1 โมดูล และ 4 โมดูล ได้ค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็น 30 และ 180 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเกิดจากการต่ออนุกรมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 10 โมดูล ใช้ระบบระบายความร้อนแบบใช้น้ำหล่อเย็น สามารถให้ผลต่างอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยที่ใช้เครื่องจำลองอุณหภูมิชุดเดียวกัน ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เป็น 0.509 วัตต์ ซึ่งที่อุณหภูมินี้การทดลองจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถขับแผงหลอดแอลอีดีและชาร์จแบตเตอรี่มือถือแบบซ้ำได้จากการศึกษาสรุปได้ว่าที่ผลต่างอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นใช้การต่ออนุกรมระหว่างโมดูลเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า การเพิ่มเสถียรภาพของการผลิตไฟฟ้าสามารถเพิ่มได้จากการเพิ่มเสถียรภาพของอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านของแผ่น โมดูลและจุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดเฉพาะที่ค่าความต้านทานค่าหนึ่งๆตามกราฟคุณลักษณะเท่านั้น

คำสำคัญ: วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก, ผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้ง

Abstract

This project is a study of Thermoelectric Generator module (TEG) to find characteristic of power generation and apply these devices to establish Micro Power Generator from waste heat. In this project, waste heat from low temperature (below 120°C) is designed as energy source. Experimentation has been performed to find characteristic by plot I-V Characteristic curve and its maximum power point of 1 module and 4 modules. A set of incandescent light bulbs was applied as thermal source to simulate the hot side temperature with different temperature of 10, 25 and 35 °C respectively. We use the result to analyze and improve system for establish Micro Power Generator (MPG) such as improve heating system and cooling system for transmit power to small scale electric load. The result shown that at different temperature 35 °C used cooling fan with heat sink for 1 module maximum power 30 mW and for 4 modules 180 mW. The MPG with 10 TEG modules using water cooling system at cold side gets different temperature 60°C while the same heating system. The maximum power 500 mW can drive 1 led strip and slow charging cell phone. The study indicated that at higher temperature the module generated more power. Get more power generation by series more modules. The stability of temperature both hot and cold side will improve stability of power generation and the maximum power point occurred at specific resistance following the curve.

Keywords: Thermoelectric generator, Generation from waste heat

1.ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการที่จะใช้พลังงานที่สะอาดมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกจึงเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากทำงานโดยใช้ปรากฏการณ์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้ไม่มีส่วนที่ต้องเคลื่อนที่ในการทำงาน ส่งผลให้มีการบำรุงรักษาน้อย อีกทั้งวัสดุนี้ยังสามารถ

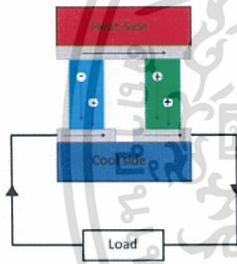
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้กับอุณหภูมิที่หลากหลาย แต่การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาที่อุณหภูมิต่ำเป็นหลัก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี และหลักการทํางานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น มีผู้ที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่ได้รับความร้อนมาเชื่อถืออยู่ 3 ปรากฏการณ์ คือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) และปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect) โดยรายละเอียดมีดังนี้

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ในปี ค.ศ.1821 นักฟิสิกส์ชื่อ โทมัส โยฮาน ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นที่รอยต่อของโลหะ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่รอยต่อของโลหะทั้งสองนั้น เนื่องจากประจุในโลหะที่ได้รับความร้อนจะได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้มีพลังงานจลน์สูงขึ้นจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุขึ้น ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งอธิบายการเกิดขั้ว บวก และลบ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของ โฮล และอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของประจุภายในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1834 โดย ฌอง เพลเทียร์ (Jean Peltier) ได้ทำการทดลองป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะทองแดงและบิสมัทซึ่งเชื่อมต่อถึงกัน ผลที่เกิดขึ้นคือ โลหะด้านหนึ่งร้อนขึ้นในขณะที่อีกด้านหนึ่งเย็นตัวลง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ย้อนกลับของซีเบค

2.1.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect) ความร้อนจะถูกดูดซับ หรือเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลลงวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งความร้อนมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์ทอมสันมีค่าสัมพันธ์กัน โดยใช้เทอร์โมไดนามิกส์

3. วิธีการออกแบบและทดสอบ

3.1 การออกแบบชุดจำลองอุณหภูมิ และการปรับปรุงระบบระบายความร้อนเพื่อการทดสอบ ทำชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนเพื่อทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยการใช้หลอดไฟแบบไส้ 100 วัตต์ 4 จากนั้นใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าปรับค่าได้จ่ายไฟให้กับหลอดไฟ จะทำให้ได้แหล่งความร้อนสำหรับทดสอบ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อน

3.1.1 การเลือกใช้อุปกรณ์ในการนำความร้อนระหว่างชุดจำลองอุณหภูมิ และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ในงานวิจัยนี้ใช้ภาวสองหน้า นำความร้อนในการทดสอบเพราะต้องการให้ชิ้นงานติดแน่น และทำให้การนำความร้อนทำได้เต็มที่

3.1.2 การปรับปรุง และพัฒนาในระบบระบายความร้อนของการทดสอบเพื่อคงที่อุณหภูมิด้านเย็น

- ขั้นที่1 ระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และอากาศธรรมชาติ ใช้ฮีทซิงค์เป็นตัวช่วยในการระบายความร้อนออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยใช้อากาศเป็นตัวพาความร้อนจากฮีทซิงค์ออกจากระบบ แต่การระบายความร้อนออกจากฮีทซิงค์ไม่คงที่ ส่งผลให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิได้

- ขั้นที่2 ระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์ร่วมกับพัดลมระบายความร้อน ใช้ฮีทซิงค์ติดกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อระบายความร้อน ร่วมกับการใช้พัดลมระบายความร้อนเป็นตัวช่วยให้ความร้อนถูกระบายออกเร็วขึ้น ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งการใช้พัดลมในการช่วยระบายความร้อนทำได้ดีกว่าการใช้อากาศธรรมชาติ แต่การระบายความร้อนก็ยังคงมีข้อจำกัดที่ส่งผลทำให้อุณหภูมิด้านร้อนเย็นลงเมื่อทำงานเป็นเวลานาน



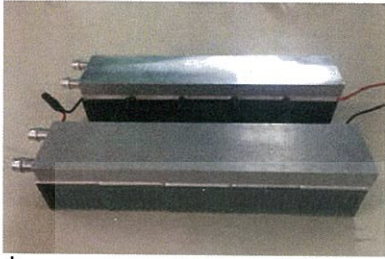
รูปที่ 3.2 ชุดระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์และพัดลม

- ขั้นที่3 ระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น ทำได้โดยติดตั้ง Water Cooling Block ที่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยจะใช้ปั๊มน้ำหล่อเย็นเป็นตัวสูบน้ำจากอ่างน้ำเข้า Water Cooling Block และน้ำออกจาก Water Cooling Block กลับเข้าสู่ถังน้ำ เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลทั้งหมด ทำให้อุณหภูมิด้านเย็นคงที่เท่ากับอุณหภูมิของน้ำ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถทำได้ดีมีเสถียรภาพมากกว่าแบบอื่นๆ และไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิด้านร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

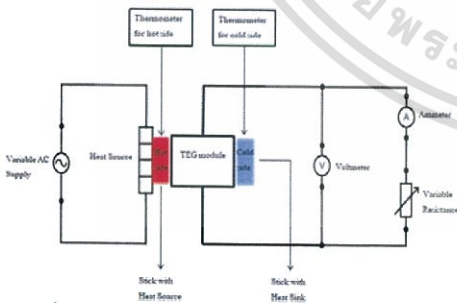
3.1.3 ปรับปรุงการให้ความร้อนของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก มีการปรับปรุงการให้ความร้อน โดยการใช้ฮีทซิงค์ติดในด้านร้อนของแผ่น โมดูลแต่ละแผ่น และให้ความร้อนกับฮีทซิงค์โดยตรงแทนการติดด้านร้อนของแผ่น โมดูลกับแผ่นโลหะนำความร้อน ดังรูป 3.3 ซึ่งการปรับปรุงนี้แก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของแผ่นเมื่อต้องต่อรวมกัน



รูปที่ 3.3 การปรับปรุงระบบรับและถ่ายเทความร้อน

3.2 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลจำนวน 1 โมดูล ทำการทดสอบการผลิตไฟฟ้าที่ความต่างอุณหภูมิต่างๆ 3 ค่า คือ 10, 25 และ 35°C ตามลำดับ ในทดสอบจะวัดค่าต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิด้านร้อน อุณหภูมิด้านเย็น แรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆ เพื่อนำค่าที่ได้ในการทดลองไปสร้างกราฟพฤติกรรมกระแส-แรงดันของการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ในการทดลองจะใช้ระบบระบายความร้อนด้วยฮีทซิงค์ร่วมกับพัดลมระบายความร้อน

3.2.1 การต่อวงจรทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล ดังรูปที่ 3.4 ใช้ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนเพื่อเป็นแหล่งความร้อนในการทดสอบ อีกด้านของแผ่น โมดูลจะมีการระบายความร้อนด้วยการต่อฮีทซิงค์ร่วมกับพัดลมระบายความร้อน จากนั้นต่ออนุกรมตัวเทอร์โมอิเล็กทริกกับตัวต้านทานค่าที่ต้องการทดสอบ



รูปที่ 3.4 วงจรเพื่อการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล

3.2.2 วิธีการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล โดยจะแบ่งออกเป็น การทดลอง 3 ครั้งตามผลต่างของอุณหภูมิ 10, 25 และ 35 °C ตามลำดับ มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

I.ต่อค่าความต้านทานที่ต้องการทดลองตามตาราง

II.ช้อนแรงดันป้อนเข้าหลอดไฟให้หลอดไฟฟ้าสว่างและรอจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ แล้ววัดอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น จากนั้นจึงปรับเพิ่มหรือลดแรงดัน จนได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ต้องการ

III.เมื่อได้ผลต่างอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ ทำการบันทึกค่าความต้านทาน แรงดัน ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ขณะนั้นลงในตาราง

IV.เปลี่ยนค่าความต้านทาน ที่ค่าผลต่างอุณหภูมิเดิม จากนั้นวัดและบันทึกค่าความต้านทานที่ใช้ แรงดัน ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ขณะนั้น

V.ทำการทดลองตามข้อ II-IV จนครบทุกผลต่างอุณหภูมิ

VI.นำค่าที่ได้จากการทดลองไปทำกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ทั้ง 3 ค่าผลต่างของอุณหภูมิ โดยพล็อตระหว่างแรงดัน และกระแส

VII.เมื่อได้กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันแล้ว ทำการหาสมการเชิงเส้นที่ใช้ในการประมาณกราฟคุณลักษณะ นำสมการที่ได้จากการประมาณทั้ง 3 สมการ หาจุดที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวโมดูลผลิตออกมา

3.3 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลจำนวน 4 โมดูล

3.3.1 การต่อวงจรเพื่อการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล 4 โมดูลต่ออนุกรมกัน

3.3.2 วิธีการทดสอบพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของ 4 โมดูล ให้ทำการทดลองตามการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล 1 โมดูล

3.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Power Generator) จาก 10 โมดูล

3.4.1 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และการปรับปรุงระบบระบายความร้อน ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล 10 โมดูลนำมาต่ออนุกรมกัน ใช้การระบายความร้อนด้วย Water Cooling Block และปั๊มน้ำหล่อเย็น เพราะสามารถควบคุมอุณหภูมิด้านเย็นได้ดี ผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้มาก

3.4.2 การต่อวงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล 10 โมดูลต่ออนุกรมกัน โดยจะใช้ชุดจำลองอุณหภูมิด้านร้อนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน และใช้ระบบ Water Cooling Block เป็นระบบระบายความร้อน

3.4.3 วิธีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทำการทดสอบโดยใช้วงจรกระดับแรงดันต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก แล้วจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้อุปกรณ์ไฟฟ้า 2 ชนิด คือ หลอดหลอดแอลอีดี และชาร์ตแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือแบบซ้ำ

4. การแสดงผลข้อมูล

ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าของโมดูลได้ผลดังตาราง

ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับ 1 โมดูล

ΔT	I(mA)	V(mV)	R(โอห์ม)	P _{MAX} (mW)
10	15.96	136.875	8.576	2.185
25	42.64	344.09	8.070	14.671
35	65.62	514.55	7.841	33.765

ตารางที่ 4.2 การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับ 4 โมดูล

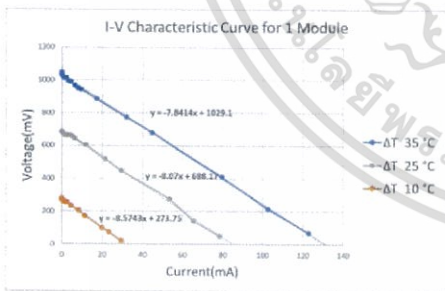
ΔT	I(mA)	V(mV)	R(โอห์ม)	P _{MAX} (mW)
10	26.663	449.27	16.85	11.979
25	71.912	1267.95	17.632	91.181
35	100.994	1854.95	18.367	187.339

ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากต่ออนุกรม 10 โมดูล ดังตารางที่ 4.3 ที่สภาพแวดล้อมการทดลองเดิม แต่ได้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ 60 °C จากการปรับปรุงระบบระบายความร้อนเป็นแบบน้ำหล่อเย็น และระบบให้ความร้อนแบบใช้ฮีทซิงค์

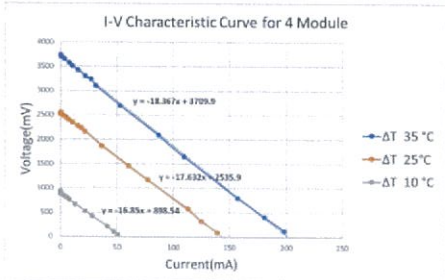
ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ΔT	I(A)	V(V)	R(โอห์ม)	P _{MAX} (W)
60	0.101	5.039	49.891	0.509

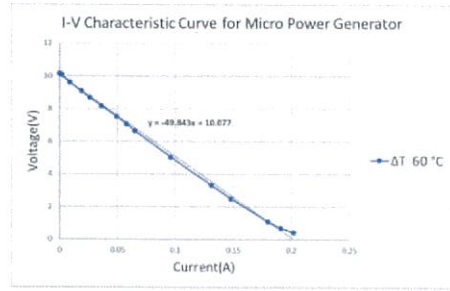
กราฟพฤติกรรมที่ได้จากการทดสอบได้ผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 กราฟกระแส-แรงดัน ของการทดสอบ 1 โมดูล



รูปที่ 4.2 กราฟกระแส-แรงดัน ของการทดสอบ 4 โมดูล



รูปที่ 4.3 กราฟกระแส-แรงดัน ของการทดสอบเครื่องกำเนิดขนาดเล็ก

5. สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาพบว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่หลากหลายอุณหภูมิแต่หากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีค่าสูงปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วยและประสิทธิภาพของอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก มีผลต่อความมีเสถียรภาพของการผลิตไฟฟ้าทำให้การใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำจำเป็นต้องคำนึงถึงวิธีการกักเก็บความร้อนเพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและระบบความเย็นที่จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านมีค่าสูงที่สุด โดยจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนด้วยอีกสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญคือ คุณภาพของไฟฟ้าที่ผลิตได้ เนื่องจากไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นก่อนการต่อภาระทางไฟฟ้าต้องผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมแรงดันให้ตรงตามที่ภาระทางไฟฟ้ากำหนด ดังนั้นเทคโนโลยีการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถเป็นทางเลือกในการนำความร้อนเหลือทิ้งที่เปล่าประโยชน์ ให้สามารถนำมาใช้งานได้ แต่ต้องศึกษาในเรื่องความคุ้มค่าในการลงทุนเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. นิรุช จิรสุวรรณกุล และคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในด้านเครื่องมือการทดลอง ที่ขยันขันแข็งทางคณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านการศึกษา การเงิน รวมทั้งให้กำลังใจ ซึ่งทำให้โครงการนี้สามารถประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] D.M. Rowe, Ph.D., D.Sc., Thermoelectric handbook : macro to nano, CRC Press Taylor&Francis Group, 2006
 [2] D.M. Rowe, Thermoelectrics and its energy harvesting, CRC Press Taylor&Francis Group, 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermoelectric Power Generator TEG Module

Specifications:

Material: Ceramic / Bismuth Telluride Color: White

Parametric model: SP1848-27145 Temperature(C): 150 degrees Open-circuit voltage(V): 4.8V

Current(MA): 20/0.97/225; 40/1.8/368; 60/2.4/469; 80/3.6/559; 100/4.8/669

Module weight: 25g / 0.89oz

Module size: 4 * 4 * 0.4cm / 1.6 * 1.6 * 0.2inch (L * W * H) Package weight: 26g / 0.92oz

Package size: 14.5 * 10 * 0.4cm / 5.7 * 4 * 0.2inch (L * W * H)

Features:

Small and lightweight, convenient for use. Designed specifically for power generation.

Sealed for moisture protection and contain thermal elements formulated for optimum Seebeck power generation.

High temperature 150 °C, with NM static protection.



Standard A-shape clear

Standard 100W E27 230V A60 CL U 1SL/100

Conventional pear-shaped incandescent lamps

Product data

General Information		Approval and Application	
Cap-Base	E27 E27	Energy Efficiency Label (EEL)	F
Operating Position	UNIVERSAL Any or Universal (U)	Product Data	
Nominal Lifetime (Nom)	1000 h	Full product code	872790007505200
Light Technical		Order product name	Standard 100W E27 230V A60 CL U 1SL/100
Luminous Flux (Nom)	1350 lm	EAN/UPC - Product	8727900075052
Color Rendering Index (Nom)	100	Order code	925221244298
Operating and Electrical		Numerator - Quantity Per Pack	1
Power (Rated) (Nom)	100 W	Numerator - Packs per outer box	100
Voltage (Nom)	230 V	Material Nr. (12NC)	925221244298
Controls and Dimming		Net Weight (Piece)	0.026 kg
Dimmable	Yes	Mechanical and Housing	
Mechanical and Housing		Bulb Finish	
		Clear	

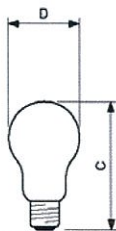
Datasheet, 2016, October 10

data subject to change

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Standard A-shape clear

Dimensional drawing



STD 100W E27 230V A80 CL

Product	D (max)	D	C (max)
Standard 100W E27 230V A80 CL U 1SU/100	61 mm	60 mm	107 mm



© 2016 Philips Lighting Holding B.V. All rights reserved. Philips Lighting reserves the right to make changes in specifications and/or to discontinue any product at any time without notice or obligation and will not be liable for any consequences resulting from the use of this publication.

www.lighting.philips.com
2016, October 10 - data subject to change

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC-DC XL6009E1

This DC-DC Module is based on IC XL6009E1 which is a high-performance step-up switching current (BOOST) module. The module uses the second generation of high- frequency switching technology XL6009E1 core chip that offers superior performance over the first-generation technology LM2577. XL6009 replaces LM2577 module as LM2577 is about to be phased out.

Features

- Wide input voltage range of 3V – 32V (optimum operating voltage range is 5 – 32V)
- Wide Output voltage range of 5V – 35V (Adjustable using on board preset)
- Built in 4A MOSFET switches enables efficiency of up to 94% (LM2577 current is 3A)
- High switching frequency of 400KHz, can use a small-capacity filter capacitor that can achieve very good results (LM2577 switching frequency is only 50KHz)

Specifications	Value
Type	Non-Isolated Boost (BOOST)
Rectification	Non-synchronous rectification
Input Range	3V ~ 32V
Output Range	5V ~ 35V
Input Current	4A (maximum), load 18mA (5Vinput, 8V output, no-load is less than 18mA. The higher the voltage, the load current increases.)
Conversion efficiency	<94% (the greater the current, the lower the efficiency)
Switching frequency	400KHz
Output ripple	50mV (the higher the voltage, the greater the current, the greater ripple)
Load Regulation	± 0.5%
Voltage	± 0.5%
Working	-40 ° C ~ +85 ° C
Dimensions	43mm * 21mm * 14mm (length * width* height)

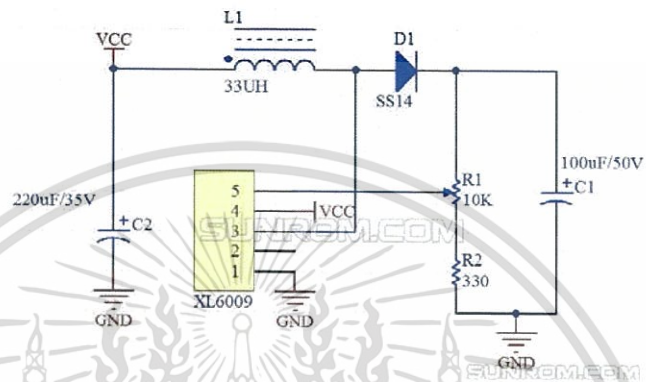
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ไม่สามารถนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นได้ชัด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

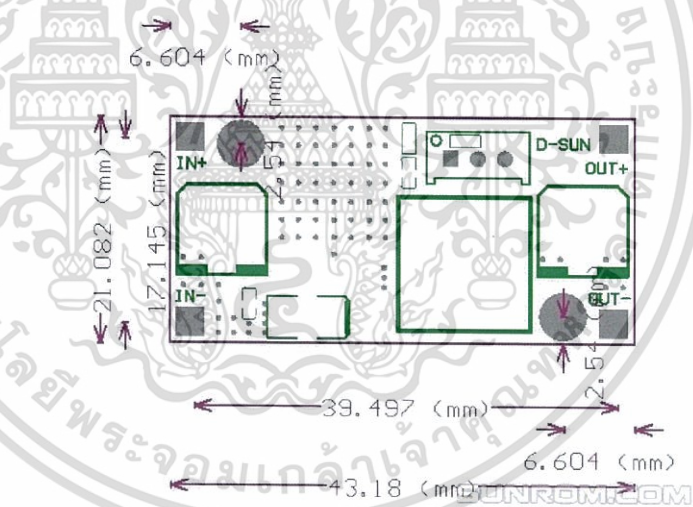
Pins

- IN+ input positive
- IN- input negative!
- OUT+ output positive
- OUT- output negative

Module Schematic



Dimensions



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SMALL PACKAGE PFM CONTROL STEP-UP DC/DC CONVERTER

CE8301 Series

■ Introduction

The **CE8301 Series** is a CMOS PFM-control step-up switching DC/DC converter that mainly consists of a reference voltage source, an oscillator, and a comparator. The PFM controller allows the duty ratio to be automatically switched according to the load (light load: 50%, high output current: 75%), enabling products with a low ripple over a wide range, high efficiency, and high output current. With the CE8301 Series, a step-up switching DC/DC converter can be configured by using an external coil, capacitor, and diode. The built-in MOS FET is turned off by a protection circuit when the voltage at the LX pin exceeds the limit to prevent it from being damaged. This feature, along with the mini package and low current consumption, makes the CE8301 Series ideal for applications such as the power supply unit of portable equipment.

■ Applications

- Power supply for portable equipment such as digital cameras, electronic notebooks, and PDAs
- Power supply for audio equipment such as portable CD/MD players
- Constant voltage power supply for cameras, video equipment, and communications equipment
- Power supply for microcomputers

■ Features

- Low voltage operation: Startup at 0.9 V min. ($I_{OUT} = 1 \text{ mA}$) guaranteed
- Duty ratio: 66/78%, builtin auto switching type PFM controller
- External parts: Coil, capacitor, diode
- Output voltage: Settable to between 1.8 to 6.5 V in 0.1 V steps
- Accuracy of $\pm 2\%$
- High efficiency: 85% (typ.)
- Standard function (product type A)
- Shutdown function (product type C、D)
- Output voltage Adjustable type (product type E、F)
- External transistor type available (product type B、E、F)

■ Ordering Information

CE8301 X X X X

Package :

P -SOT89

M -SOT23

T -TO92

Output voltage:

18 : 1.8V

:

50 : 5.0V

Series :

A : Standard LX

B : Standard EXT

C : With shutdown, LX

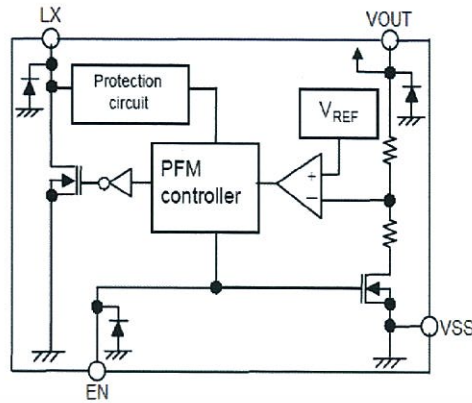
D : Withshutdown, EXT

E : Output voltage Adjustable,LX

F : Output voltage Adjustable,EXT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ Block Diagrams



Pin Assignment

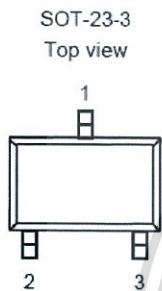


Table 1 CE8301A Series (SOT-23-3 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	V _{OUT}	Output voltage pin
2	V _{SS}	GND pin
3	LX	External inductor connection pin

Table 2 CE8301B Series (SOT-23-3 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	V _{OUT}	Output voltage pin
2	V _{SS}	GND pin
3	EXT	External transistor connection pin

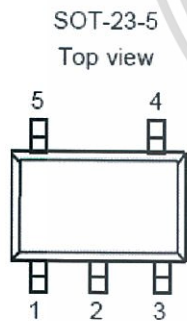


Table 3 CE8301C Series (SOT-23-5 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	EN	Shutdown pin "H": Normal operation "L": Step-up stopped
2	V _{OUT}	Output voltage pin
3	NC	(N.C.)
4	V _{SS}	GND pin
5	LX	External transistor connection pin

Table 4 CE8301D Series (SOT-23-5 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	EN	Shutdown pin "H": Normal operation "L": Step-up stopped
2	V _{OUT}	Output voltage pin
3	NC	(N.C.)
4	V _{SS}	GND pin
5	EXT	External transistor connection pin

Table 5 CE8301 ESeries (SOT-23-5 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	V _{OUT} (FB)	Output voltage fixed output type; Output voltage monitoring pin (Output voltage external setting type; Feedback pin)
2	V _{DD}	IC power supply pin
3	NC	(N.C.)
4	V _{SS}	GND pin
5	LX	External transistor connection pin

Table 6 CE8301 FSeries (SOT-23-5 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	V _{OUT} (FB)	Output voltage fixed output type; Output voltage monitoring pin (Output voltage external setting type; Feedback pin)
2	V _{DD}	IC power supply pin
3	NC	(N.C.)
4	V _{SS}	GND pin
5	EXT	External transistor connection pin

Table 7 CE8301A Series (SOT-89-3 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	V _{SS}	GND pin
2	V _{OUT}	Output voltage pin
3	LX	External inductor connection pin

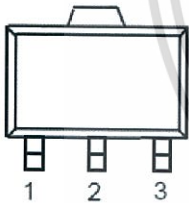
SOT-89-3
Top view

Table 8 CE8301B Series (SOT-89-3 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	V _{SS}	GND pin
2	V _{OUT}	Output voltage pin
3	EXT	External transistor connection pin

Table 9 CE8301E Series (SOT-89-5 PKG)

Pin No.	Pin Name	Functions
1	NC	(N.C.)
2	V _{DD}	IC power supply pin
3	V _{OUT} (FB)	Output voltage fixed output type; Output voltage monitoring pin (Output voltage external setting type; Feedback pin)
4	LX	External transistor connection pin
5	V _{SS}	GND pin

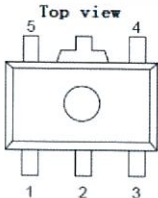
• SOT-89-5
Top view

Table 10 CE8301F Series (SOT-89-5 PKG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin No.	Pin Name	Functions
1	NC	(N.C.)
2	V _{DD}	IC power supply pin
3	V _{OUT} (FB)	Output voltage fixed output type; Output voltage monitoring pin (Output voltage external setting type; Feedback pin)
4	EXT	External transistor connection pin
5	V _{SS}	GND pin

■ Absolute Maximum Ratings

(Unless otherwise specified, Ta=25 °C)

Parameter	Symbol	Rated	Unit
V _{OUT} pin voltage	V _{OUT}	V _{SS} - 0.3 ~ V _{SS} + 10	V
EN pin voltage	EN	V _{SS} - 0.3 ~ V _{SS} + 10	V
LX pin voltage	V _{LX}	V _{SS} - 0.3 ~ V _{SS} + 10	V
LX pin current	I _{LX}	1000	mA
Power dissipation	SOT-23-3	250	mW
	SOT-23-5	250	mW
	SOT-89-3	500	mW
Operating temperature	T _{opr}	-40 ~ +85	°C
Storage temperature	T _{stg}	-40 ~ +125	°C

■ Electrical Characteristics

(Unless otherwise specified, Ta = 25 °C)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output voltage	V _{OUT}	—	V _{OUT(S)} ×0.98	V _{OUT}	V _{OUT(S)} ×1.02	V
Input voltage	V _{IN}	—	—	—	10	V
Operation start voltage	V _{ST1}	I _{OUT} = 1 mA	—	—	0.9	V
Oscillation start voltage	V _{ST2}	No external parts, voltage applied to V _{OUT} LX pulled up to V _{OUT} via 300Ω resistor	—	—	0.8	V
Current consumption 1	I _{SS1}	V _{OUT} = 0.95 × V _{OUT}	—	30	40	μA
		V _{OUT} : 3.0V V _{OUT} : 5.0V	—	50	60	μA
Current consumption 2	I _{SS2}	V _{OUT} = V _{OUT} + 0.5 V	—	6	10	μA
Current consumption during shutdown	I _{SSS}	V _{EN} = 0 V	—	—	0.5	μA
Switching current	I _{SW}	V _{LX} = 0.4 V	100	200	—	mA
Switching transistor leakage current	I _{SWQ}	No external parts, V _{LX} = V _{OUT} = 10 V, V _{EN} = 0 V	—	—	0.5	μA
Line regulation	ΔV _{OUT1}	V _{IN} = 0.4 × V _{OUT} ~ 0.6 × V _{OUT}	—	20	50	mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load regulation	ΔV_{OUT2}	$I_{OUT} = 10 \mu A \sim 50mA$	—	20	50	mV
Maximum Oscillation frequency	f_{OSC}	$V_{OUT} = 0.95 \times V_{OUT}$, measure waveform at LX pin		100		kHz
Duty ratio 1	Duty1	$V_{OUT} = 0.95 \times V_{OUT}$, measure waveform at LX pin	70	78	85	%
Duty ratio 2	Duty2	Measure waveform at LX pin with light load	—	66	—	%
Efficiency	EFFI			85		%
Shutdown pin input voltage	V_{SH}	$V_{OUT} = 0.95 \times V_{OUT}$, judge oscillation at LX pin	0.75	—	—	V
	V_{SL1}	$V_{OUT} = 0.95 \times V_{OUT}$, judge stop at LX pin	—	—	0.3	V
Shutdown pin input current	I_{SH}	$V_{EN} = 10V$	-0.1	—	0.1	μA
	I_{SL}	$V_{EN} = 0V$	-0.1	—	0.1	μA

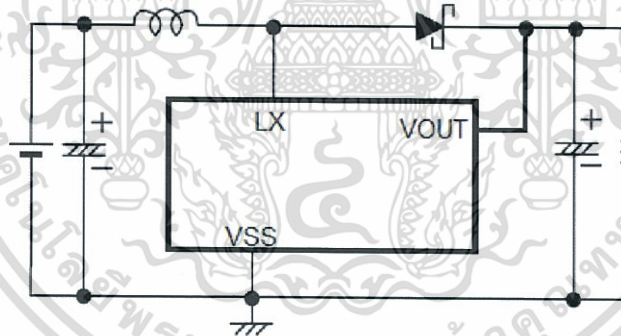
Remark: $V_{IN} = V_{OUT(S)} \times 0.6$ applied, $I_{OUT} = V_{OUT(S)} / 250 \Omega$

Shutdown function built-in type: EN pin is connected to V_{OUT}

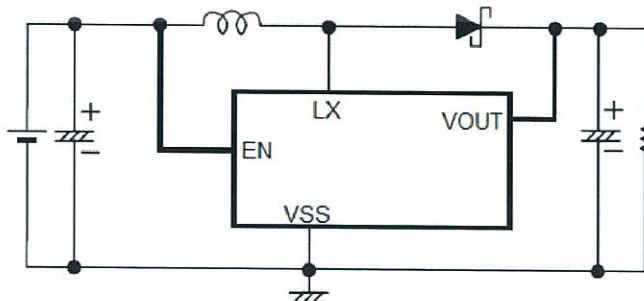
$V_{OUT(S)}$ specified above is the set output voltage value, and V_{OUT} is the typical value of the actual output voltage.

■ Standard Circuits

1、CE8301A Circuits:

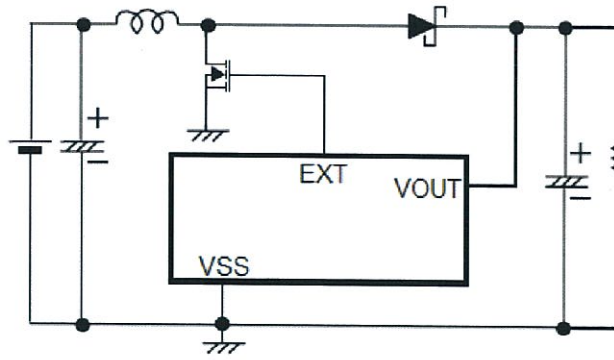


2、CE8301C Circuits:

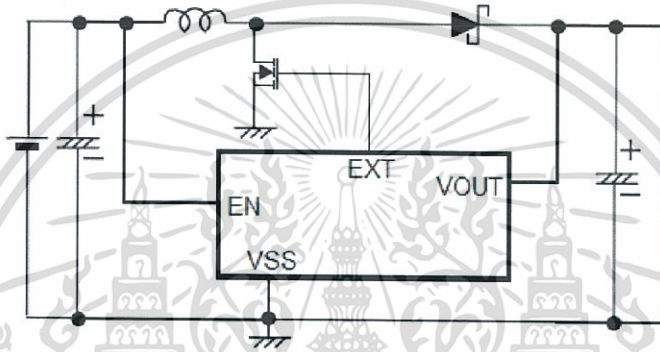


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

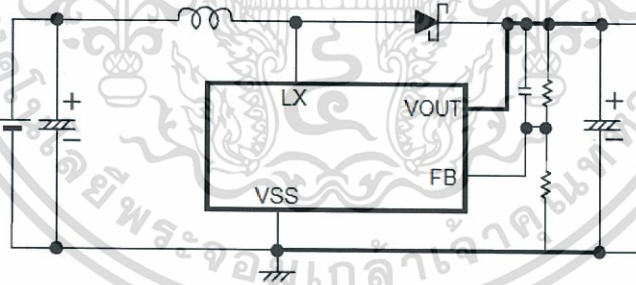
3、CE8301B Circuits:



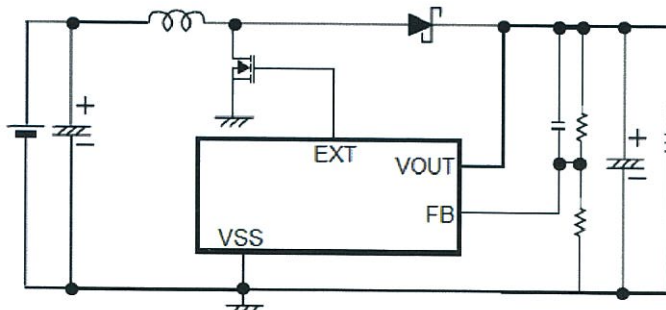
4、CE8301D Circuits:



5、CE8301E Circuits:



6、CE8301F Circuits:

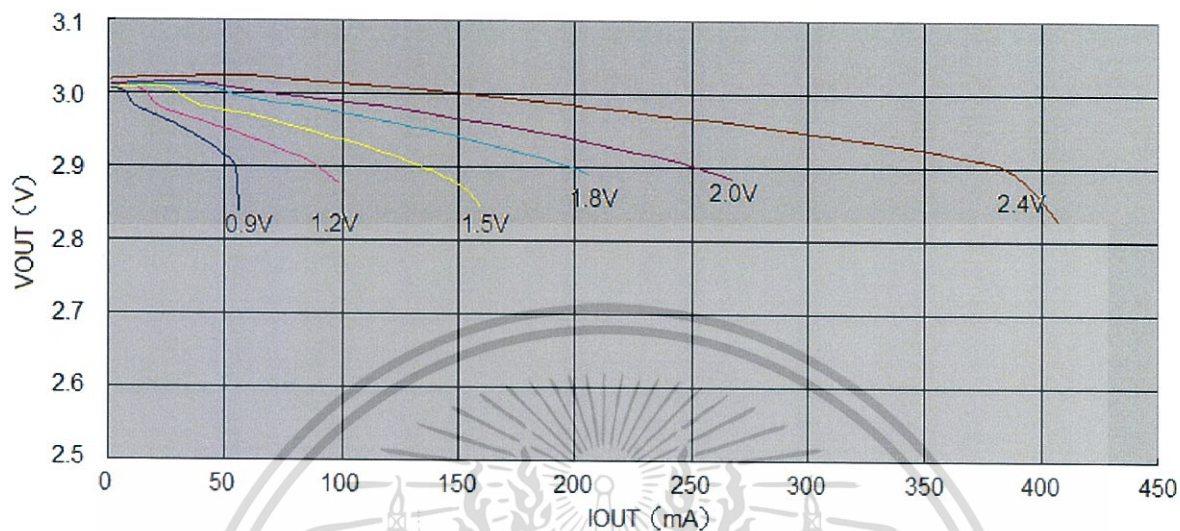


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

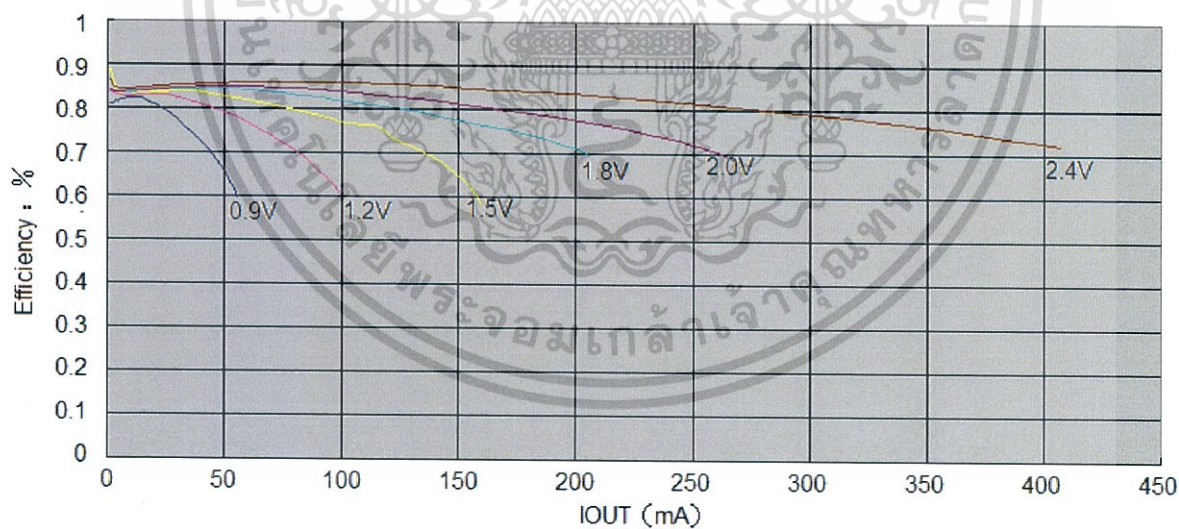
■ Characteristics

1. CE8301A30P:

a. V_{OUT} vs. I_{OUT} :

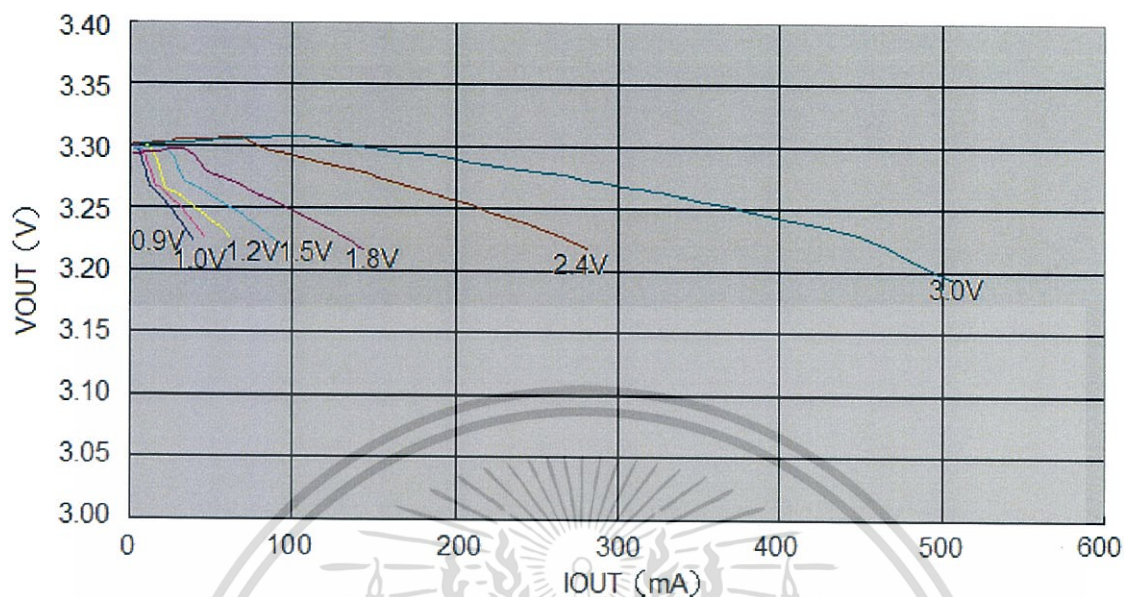
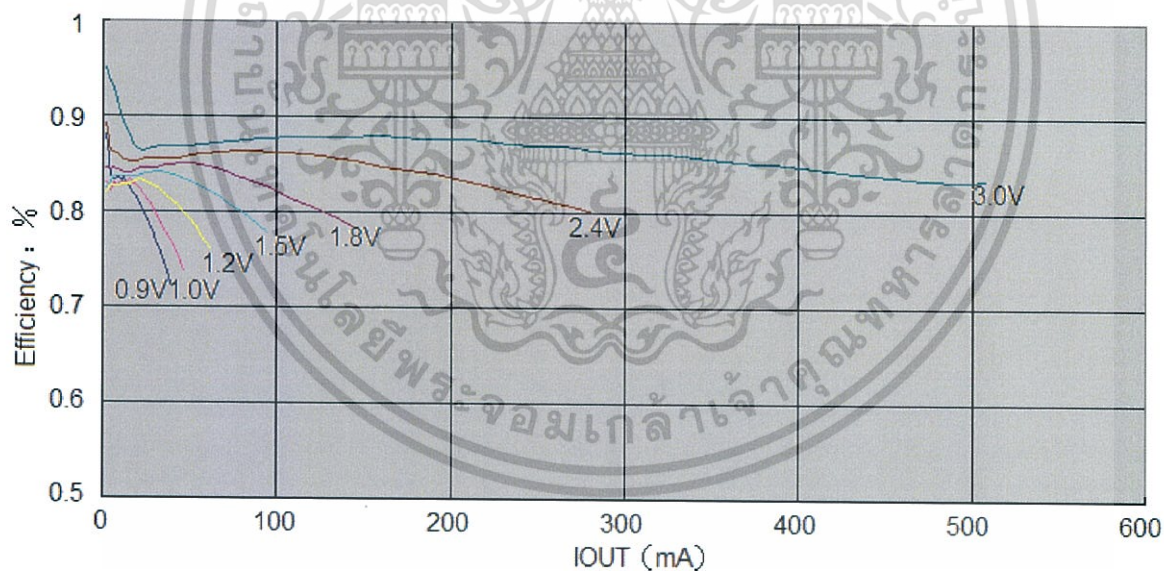


b. Efficiency vs. I_{OUT} :



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

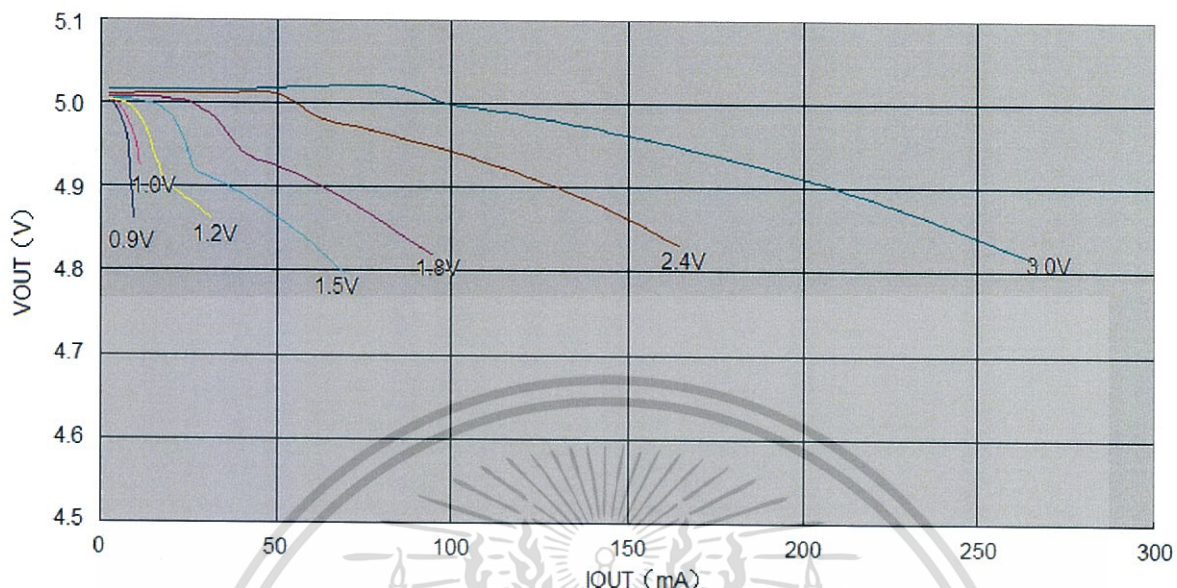
2. CE8301A33P:

a. V_{OUT} vs. I_{OUT} :b. Efficiency vs. I_{OUT} :

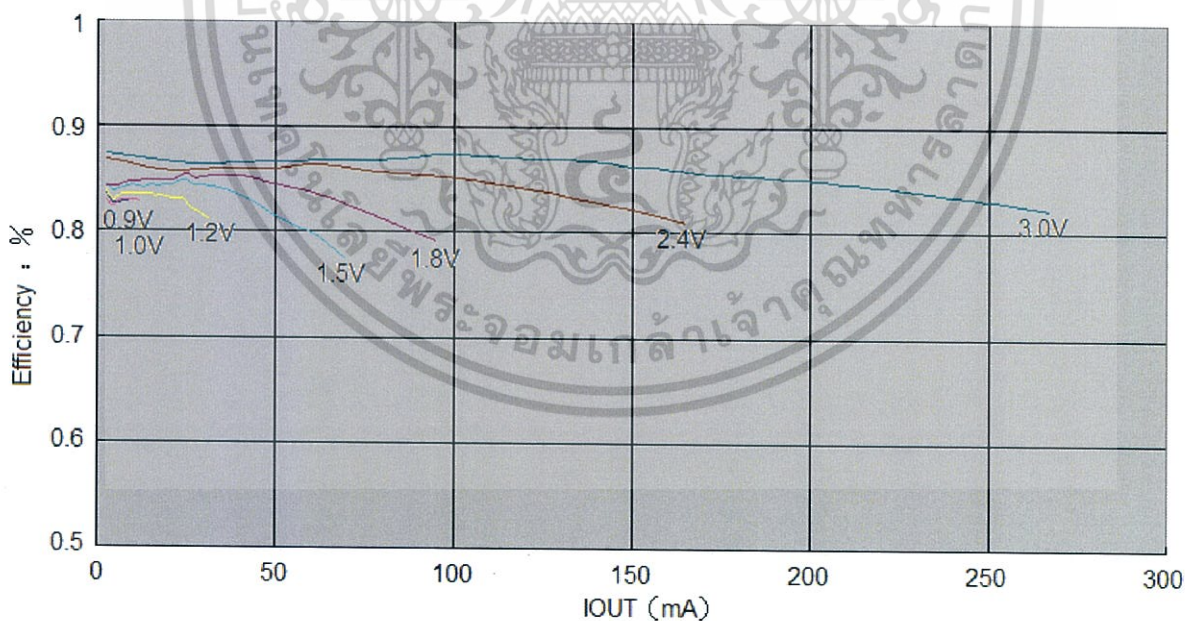
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. CE8301A50P:

a. V_{OUT} vs. I_{OUT} :



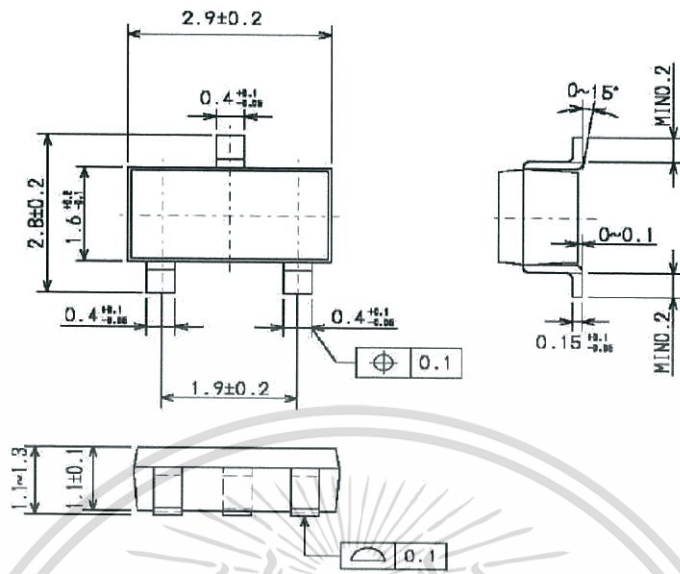
b. Efficiency vs. I_{OUT} :



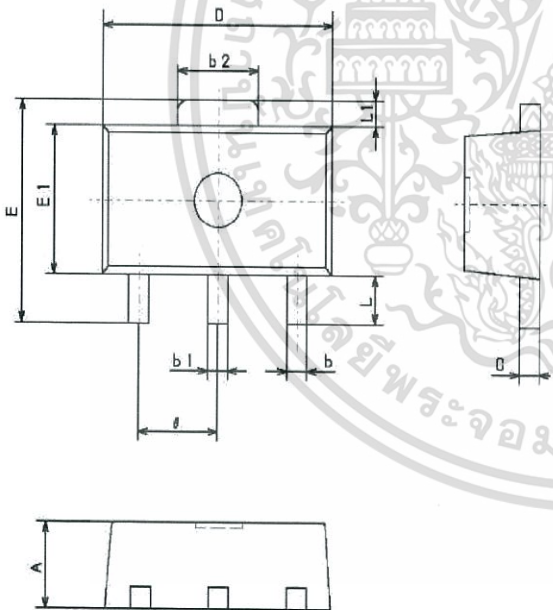
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ Package information

● SOT-23



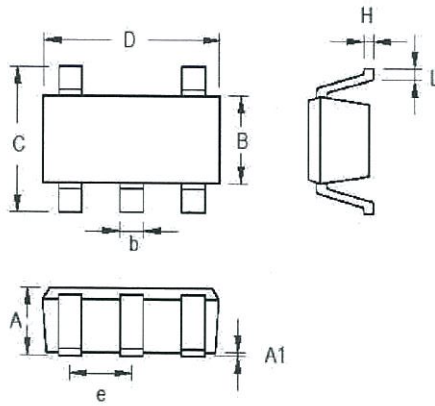
● SOT-89



Symbols	Dimensions in millimeters		
	Min	Nom	Max
A	1.40	1.50	1.60
b	0.36	0.42	0.48
b1	0.41	0.47	0.53
b2	1.40	1.60	1.75
C	0.38	0.40	0.43
D	4.40	4.50	4.60
E	—	—	4.25
E1	2.40	2.50	2.60
θ	1.40	1.50	1.60
L	1.80	—	—
L1	—	0.40	—

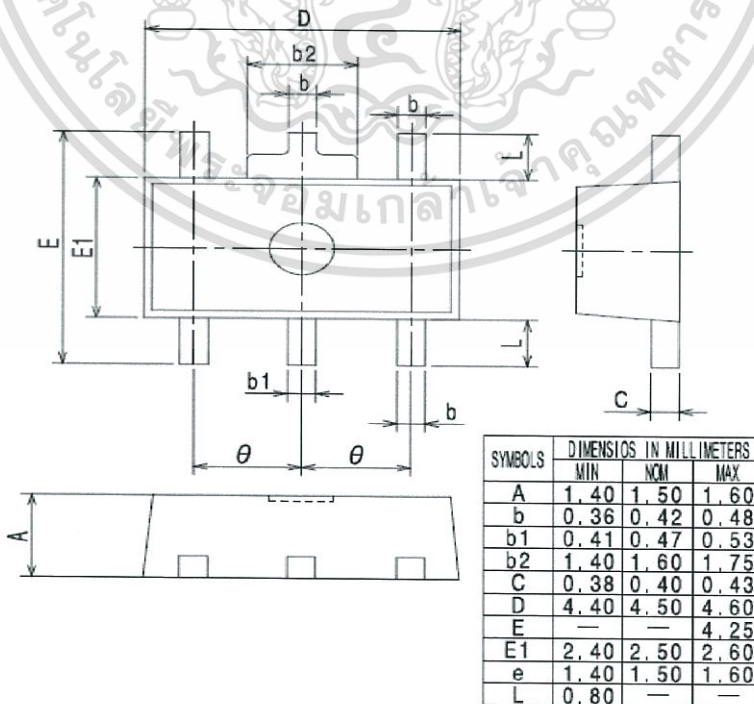
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• SOT- 23- 5



Symbol	Dimensions In Millimeters		Dimensions In Inches	
	Min	Max	Min	Max
A	0.889	1.295	0.035	0.051
A1	0.000	0.152	0.000	0.006
B	1.397	1.803	0.055	0.071
b	0.356	0.559	0.014	0.022
C	2.591	2.997	0.102	0.118
D	2.692	3.099	0.106	0.122
e	0.838	1.041	0.033	0.041
H	0.080	0.254	0.003	0.010
L	0.300	0.610	0.012	0.024

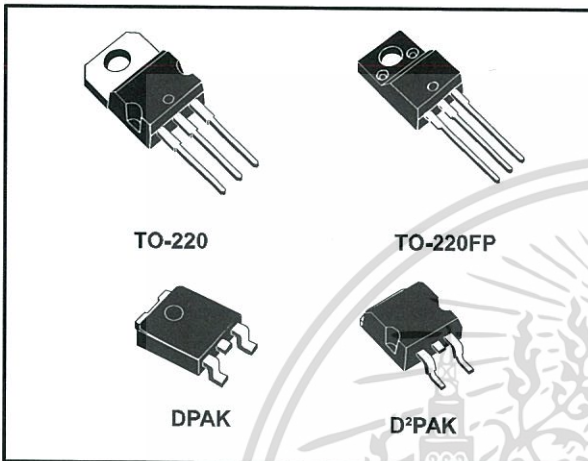
• SOT- 89- 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Positive voltage regulator ICs

Datasheet - production data



Description

The L78 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, D²PAK and DPAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications.

These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type embeds internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1 A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.

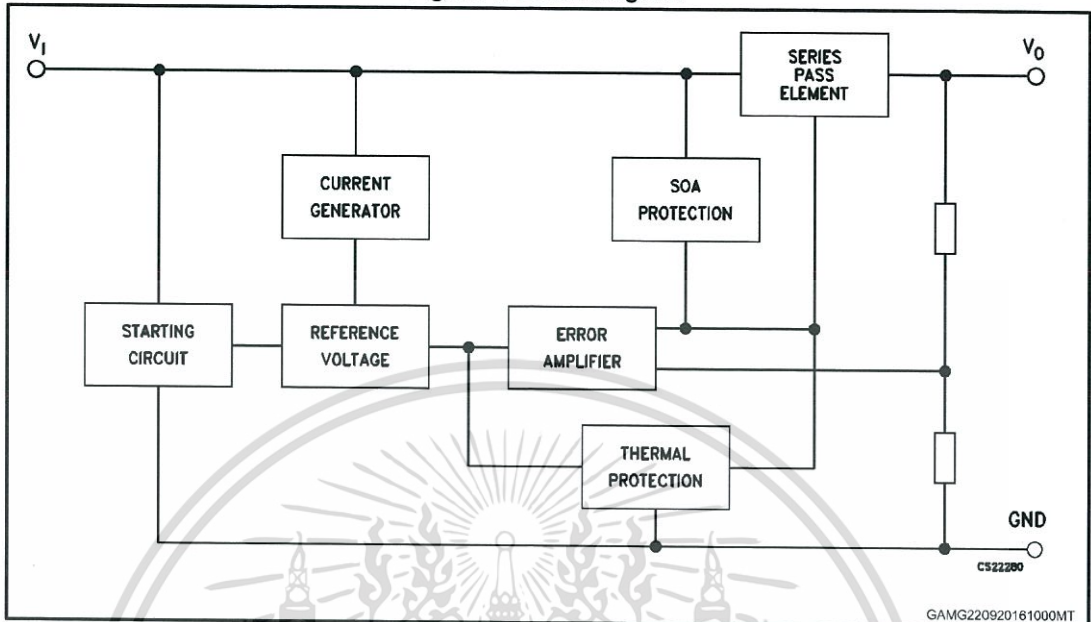
Features

- Output current up to 1.5 A
- Output voltages of 5; 6; 8; 8.5; 9; 12; 15; 18; 24 V
- Thermal overload protection
- Short circuit protection
- Output transition SOA protection
- 2 % output voltage tolerance (A version)
- Guaranteed in extended temperature range (A version)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 Diagram

Figure 1: Block diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 Pin configuration

Figure 2: Pin connections (top view)

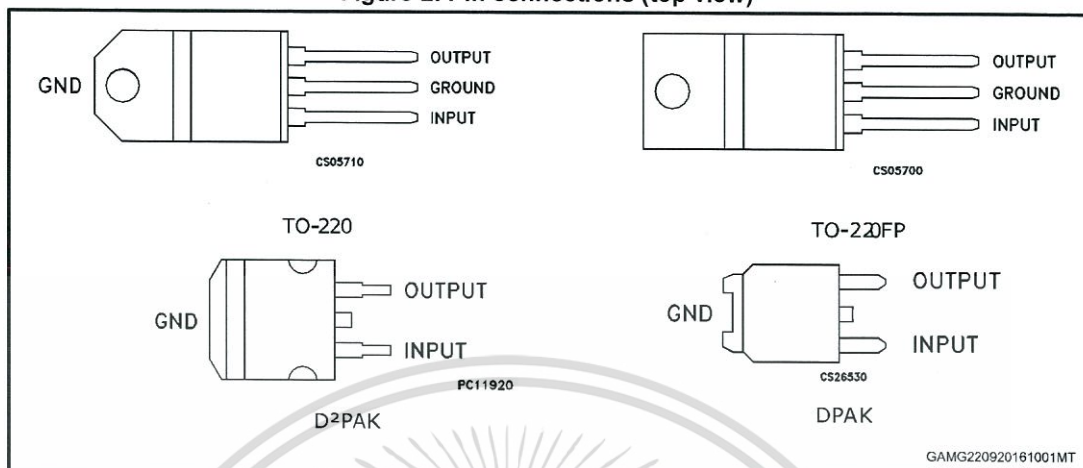
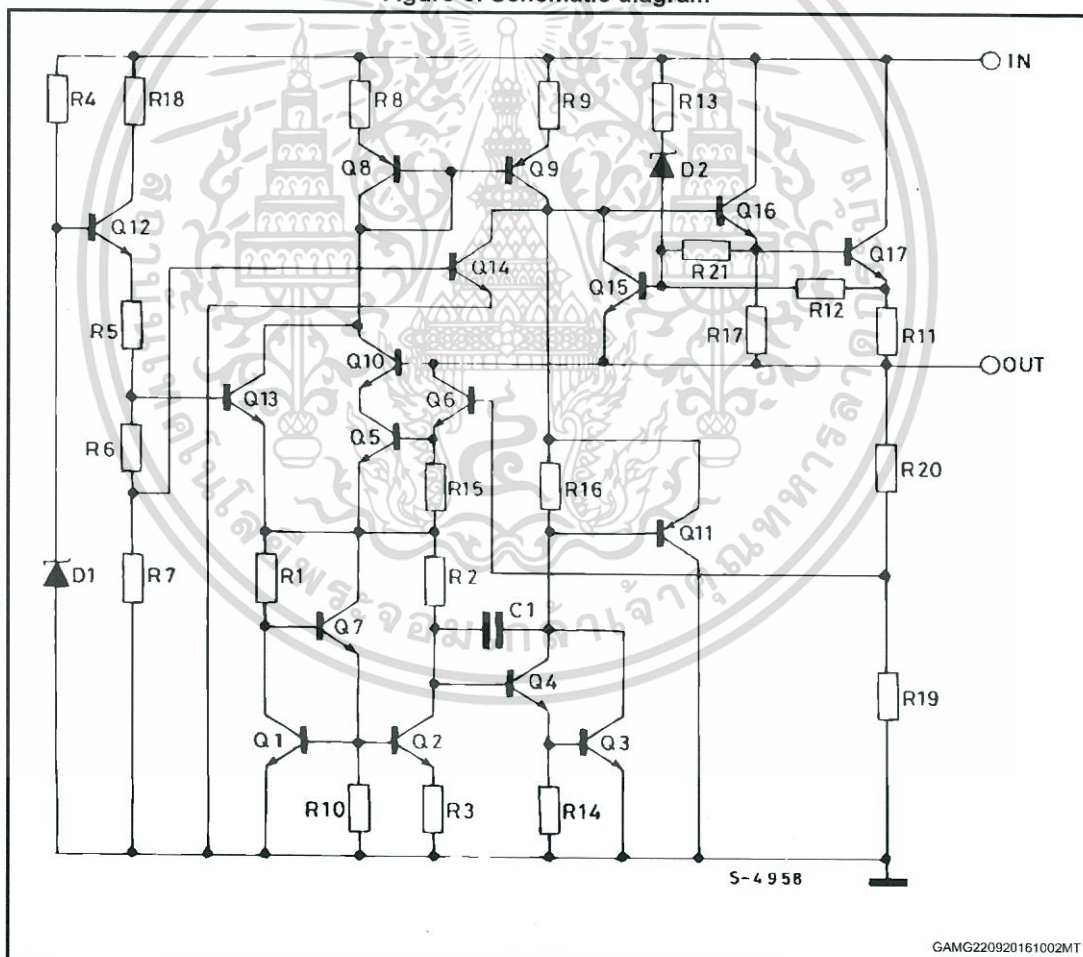


Figure 3: Schematic diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 Maximum ratings

Table 1: Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter		Value	Unit
V_I	DC input voltage	for $V_O = 5$ to 18 V	35	V
		for $V_O = 20, 24$ V	40	
I_O	Output current		Internally limited	
P_D	Power dissipation		Internally limited	
T_{STG}	Storage temperature range		-65 to 150	°C
T_{OP}	Operating junction temperature range	for L78xxC, L78xxAC	0 to 125	°C
		for L78xxAB	-40 to 125	

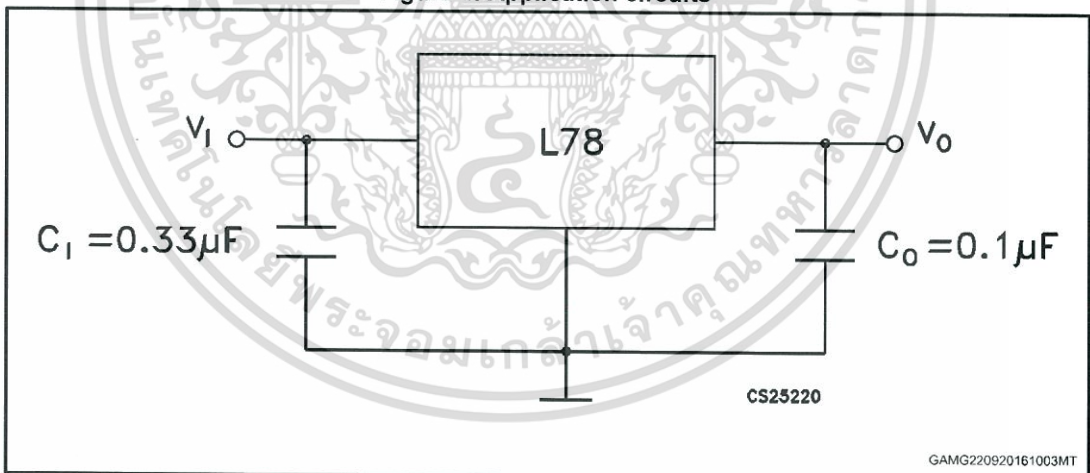


Absolute maximum ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

Table 2: Thermal data

Symbol	Parameter	D ² PAK	PAK	TO-220	TO-220FP	Unit
R_{thJC}	Thermal resistance junction-case	3	8	5	5	°C/W
R_{thJA}	Thermal resistance junction-ambient	62.5	100	50	60	°C/W

Figure 4: Application circuits



GAMG220920161003MT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 Test circuits

Figure 5: DC parameter

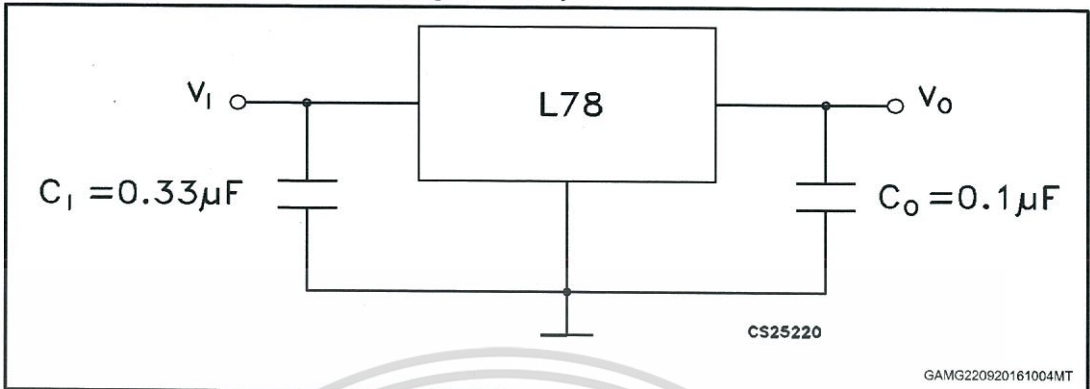


Figure 6: Load regulation

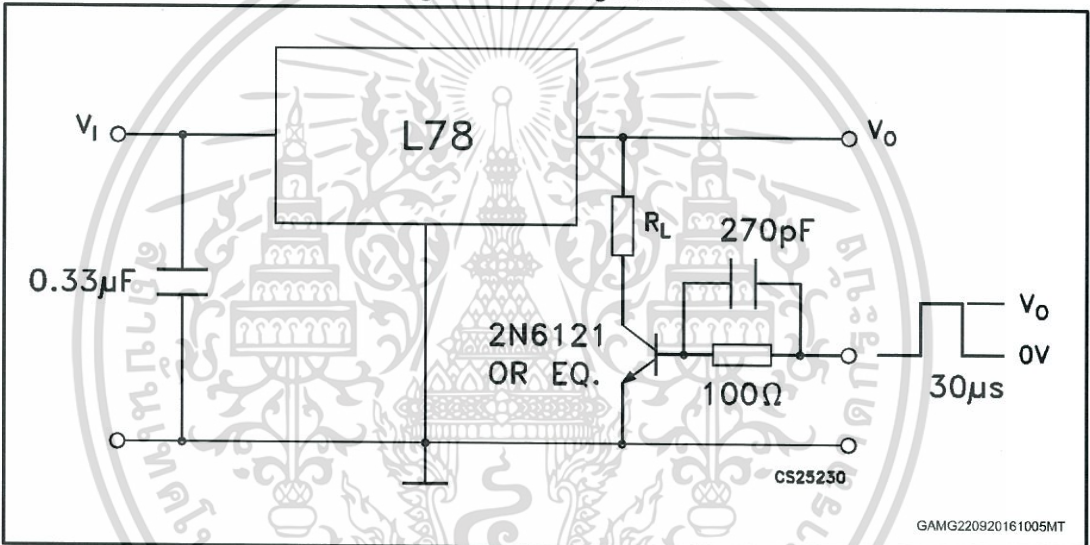
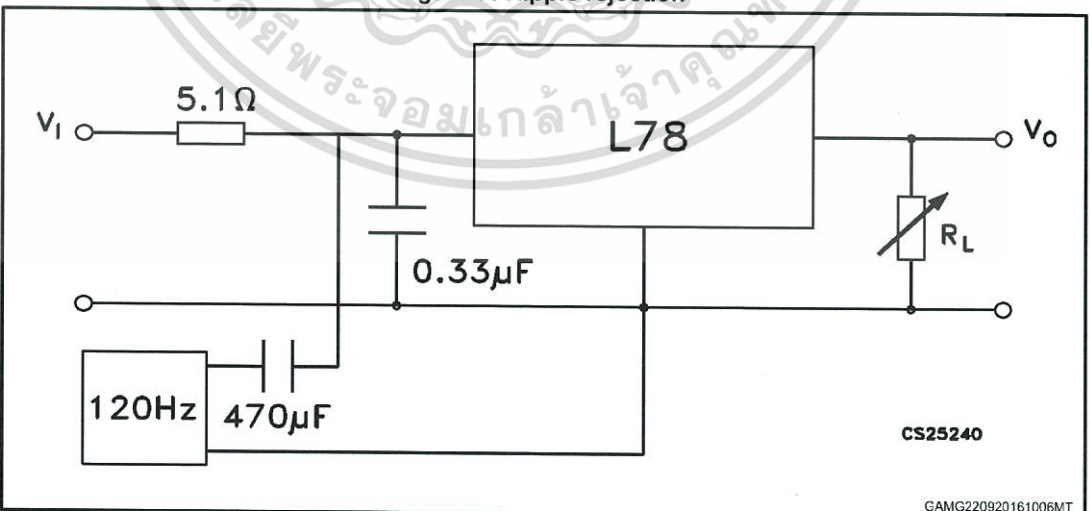


Figure 7: Ripple rejection



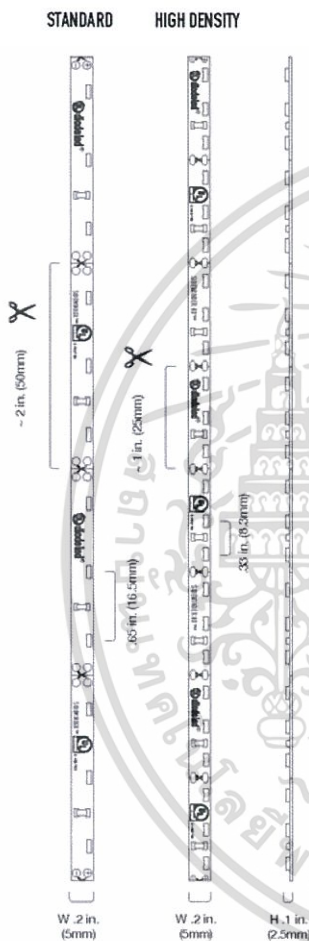
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SIDEWINDER™ 12V LED TAPE LIGHT

SPECIFICATION SHEET

- Low to medium brightness
- 16.4 ft. maximum run
- UL Listed & R/C SAM Manual
- Suitable for closet use
- 5-Year limited warranty



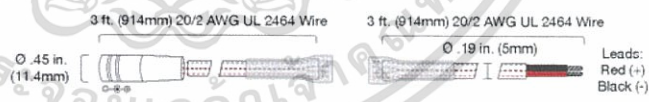
SPECIFICATIONS

Input Voltage: 12VDC Constant Voltage
Power Consumption / ft.: 1.44W / 120mA (STD), 2.88W / 240mA (HD)
LED Chip Type: Epistar 335 SMD Chip
LED Chip Beam Angle: 120°
LED Chips / ft.: 18 (STD), 35 (HD)
Mounting: 3M™ 55280 Adhesive
Field Cutable: ~ 2 in. (STD), ~ 1 in. (HD)
Maximum Run*: 16.4 ft.
Connections*: 3 ft. Female DC plug on end. 3 ft. hard-wire lead opposing end. Leads: 20/2 AWG

Dimmable: Yes
Ambient Temp*: -4 ~ 122°F (-20 ~ 50°C)
Operating Temp*: -4 ~ 176°F (-20 ~ 80°C)
Environment*: Indoor / dry location
Dimensions: 2 x .1 in. (W x H)
Certifications: UL Listed 2108, UL 1598 / CSA 250.0-08, UL 8750, UL 879 / CAN/CSA-C22.2 no. 207-M89, E469769 (UL Listed), E469770 (SAMS Manual). Suitable for installation in a clothes closet.

Item #	CCT (Kelvin) *	Lumens / ft. †	CR1	Efficacy (lm/W) ‡
DI-12V-0025 (STD 16.4 ft)	3000K	114	70	79.1
DI-12V-1571 (HD 16.4 ft)	3000K	217	70	150.6
DI-12V-1570 (HD 16.4 ft)	6300K	226	70	156.9

- Note 1:** Each maximum run requires a dedicated power feed from the driver. Do not extend beyond the recommended maximum run length.
- Note 2:** Wire, leads and accessories are not rated for in-wall installation unless otherwise noted. Attached wire, leads and connections are field-cutable.
- Note 3:** Do not install product in an environment outside the listed ambient temperature. Exceeding the maximum ambient temperature may damage LED chips, reduce the total lamp life, lumen output, and/or adversely impact color consistency.
- Note 4:** Operating temperature is measured according to the minimum and maximum ambient temperature environment.
- Note 5:** Do not install in environment where LED chips are exposed to direct sunlight as damage to the photodiode will occur.
- Note 6:** Epistar 335 SMD Chip binning ranges: (3000K 70+ CRI: 2000-3100K), (6300K 70+ CRI: 6000-7000K).
- Note 7:** Lumen value measured in accordance to IES LM-79-08, LED chips have a luminous flux range with a tolerance of +/- 5%.
- Note 8:** Actual efficacy value is dependant to specified LED driver (power supply). An estimated efficacy value has been provided and calculated as follows: Lumen value measured in accordance to IES LM-79-08 divided by average power consumption per foot.



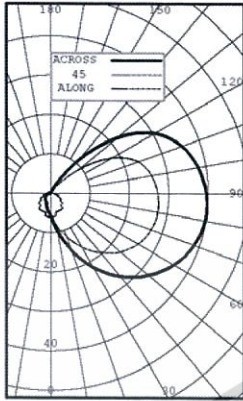
Item #: _____ Project: _____

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOMETRICS*

SIDEWINDER™ 3000K
DI-12V-0025

POLAR CANDELA DISTRIBUTION GRAPH



INTENSITY (CANDLEPOWER) SUMMARY

ANGLE ALONG	67.5	45	22.5	ACROSS
0	6	6	6	6
5	6	6	6	6
15	5	7	10	12
25	5	9	14	18
35	5	11	19	23
45	4	12	22	28
55	3	13	25	32
65	2	14	27	35
75	2	14	28	37
85	1	14	28	37
90	0	13	27	37
95	0	13	27	36
105	0	11	25	34
115	0	5	21	31
125	0	1	14	24
135	0	0	6	14
145	0	0	1	4
155	0	0	0	0
165	0	0	0	0
175	0	0	0	0
180	0	0	0	0

ZONAL LUMENS AND PERCENTAGES

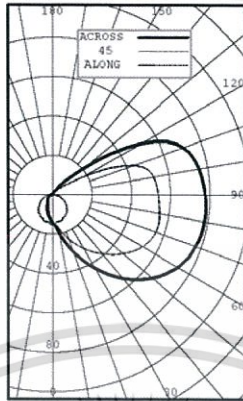
ZONE	LUMENS	% LUMINAIRE
0-30	6	5.57
0-40	12	10.88
0-60	32	27.71
0-90	71	62.29
90-90	40	34.41
60-90	40	34.58
90-180	43	37.71
0-180	114	100.00

Cone Of Light Tabulation

Mounting Height (Feet)	Footcandles at Nadir	Diameter (Feet)
4.00	0.248	10.2
5.00	0.154	15.3
8.00	0.096	20.3
10.0	0.0554	25.4
12.0	0.0365	30.5
14.0	0.0271	35.6
18.0	0.0210	40.7

SIDEWINDER™ HD 3000K
DI-12V-1571

POLAR CANDELA DISTRIBUTION GRAPH



INTENSITY (CANDLEPOWER) SUMMARY

ANGLE ALONG	67.5	45	22.5	ACROSS
0	14	14	14	14
5	15	15	15	16
15	14	16	20	24
25	13	19	28	37
35	12	22	36	46
45	10	24	43	56
55	8	27	50	65
65	6	29	55	70
75	4	30	56	72
85	1	27	54	72
90	0	26	53	71
95	0	15	50	68
105	0	4	42	52
115	0	1	30	37
125	0	1	3	11
135	0	0	1	3
145	0	0	0	1
155	0	0	0	0
165	0	0	0	0
175	0	0	0	0
180	0	0	0	0

ZONAL LUMENS AND PERCENTAGES

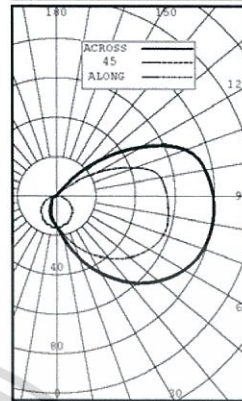
ZONE	LUMENS	% LUMINAIRE
0-30	14	6.44
0-40	27	12.73
0-60	66	30.32
0-90	145	66.70
90-90	119	54.97
60-90	79	36.36
90-180	72	33.20
0-180	217	100.00

Cone Of Light Tabulation

Mounting Height (Feet)	Footcandles at Nadir	Diameter (Feet)
4.00	0.801	8.84
5.00	0.400	11.0
8.00	0.225	17.3
10.0	0.144	21.6
12.0	0.100	25.9
14.0	0.0735	30.2
18.0	0.0563	34.8

SIDEWINDER™ HD 5000K
DI-12V-1570

POLAR CANDELA DISTRIBUTION GRAPH



INTENSITY (CANDLEPOWER) SUMMARY

ANGLE ALONG	67.5	45	22.5	ACROSS
0	16	16	16	16
5	16	16	17	18
15	15	18	23	27
25	14	21	30	37
35	13	24	38	49
45	11	26	45	59
55	9	28	52	66
65	7	30	60	72
75	4	32	58	74
85	1	29	57	74
90	0	28	56	73
95	0	27	55	72
105	0	17	50	68
115	0	4	33	54
125	0	1	15	33
135	0	0	2	12
145	0	0	1	3
155	0	0	0	1
165	0	0	0	0
175	0	0	0	0
180	0	0	0	0

ZONAL LUMENS AND PERCENTAGES

ZONE	LUMENS	% LUMINAIRE
0-30	15	6.81
0-40	32	12.74
0-60	70	30.74
0-90	151	66.89
90-90	123	54.15
60-90	82	36.11
90-180	75	32.11
0-180	226	100.00

Cone Of Light Tabulation

Mounting Height (Feet)	Footcandles at Nadir	Diameter (Feet)
4.00	0.854	10.1
5.00	0.528	15.1
8.00	0.313	20.2
10.0	0.205	25.2
12.0	0.152	30.2
14.0	0.114	35.3
18.0	0.089	40.3

* Photometric data complies with LM-79-08, ANSI C82.77-02.

SWITCHES, CONTROLS, LED DRIVERS, & SYSTEM DIAGRAMS

We offer a variety of switches, controls, and LED drivers (power supplies) to address all common light installations. For additional information, please see the additional component sections of our website or catalog. See the 'Solid Color Tape Light Installation Guide' for system diagrams and installation instructions. For additional questions and concerns please contact technical support.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADDITIONAL RESOURCES

Visit the on line product page at www.DiodeLED.com for additional resources including:

- **SOLID COLOR LED TAPE LIGHT Installation Guide**
For system diagrams and full installation instructions.
- **Voltage Drop Charts**
Use to specify appropriate wire gauge for installation. Available at the 'Tools & Resources' page at www.DiodeLED.com.

SAFETY & DISCLOSURES

- Install in accordance with the National Electric Code and local regulations.
- This product is intended to be installed and serviced by a qualified, licensed electrician.
- This product requires a compatible LED driver for proper configuration. Do not connect directly to high voltage 120-277V AC power.
- The UL Listing of this product requires the fixture to be powered with a compatible Class 2 DC constant voltage LED driver (power supply).
- It is generally recommended to load the driver no more than 80% the labeled rating for maximum performance and longevity. However, see each driver specification sheet for exact minimum and maximum loading values.
- Do not install product in an environment outside the listed ambient temperature. Exceeding the maximum ambient temperature may damage LED chips, reduce the total lamp life, lumen output, and/or adversely impact color consistency.
- Operating temperature is measured according to the minimum and maximum ambient temperature environment.
- Do not install in environment where LED chips are exposed to direct sunlight as damage to the phosphor will occur.
- Do not power tape light on the plastic spool or when tightly coiled. Excess heat may melt the spool and/or cause damage to the product.
- Each maximum run requires a dedicated power feed from the driver. Do not extend beyond the recommended maximum run length.
- Ensure applicable wire is installed between driver, fixture, and any controls in-between. When choosing wire, factor in voltage drop, amperage rating, and type (in-wall rated, wet location rated, etc.). Inadequate wire installation could overheat wires, and cause fire.
- Attached wire leads or wire accessories are not rated for in-wall installation unless otherwise noted.
- 'Voltage drop' is a gradual decrease in voltage along a conductor through which current is flowing. When specifying an LED system, ensure to calculate voltage drop appropriately. Voltage drop calculators will suggest the proper gauge wire and distance to install the driver from the fixture. To meet maximum performance, the beginning of the tape light should be receiving no less than 3% of input power rating.
- Tape light must be handled with care. Excessive handling, bending, and pressure may damage the product, voiding the warranty.
- Tape light, attached wire leads, and additional extension cables, connectors, etc., are not rated for in-wall installation unless otherwise noted.
- All fixture accessories including CLICKTIGHT™ connectors, DC connections, etc. have a Class 2 amperage rating unless otherwise noted (60W/5A @ 12V DC; 100W/4.17A @ 24V DC).
- Ensure wire leads at opposing ends of the tape light are not crossed when the fixture is turned on. It is acceptable to modify the length or cut off the attached wire leads and DC connections in the field.
- Actual color may vary from what is pictured on this sheet and other print materials due to the limitations of photographic processes.
- Lighting technology has some amount of gradual light degradation (output and/or color) over the lifespan of the products. Diode LED products are designed to minimize degradation, but some light degradation and color shift is a normal part of the life span of any LED lighting system.
- We reserve the right to modify and improve the design of our fixtures without prior notice. We cannot guarantee to match existing installed fixtures for subsequent orders or replacements in regards to product appearance, CCT, or lumen output.

WARRANTY INFORMATION

Limited Warranty

This LED fixture has a five (5) year limited warranty from the date of shipment. This warranty does not include the additional accessories referenced in this specification sheet. Complete warranty details for fixtures and additional accessories are available at www.DiodeLED.com under the 'Tools & Resources' tab. For warranty related questions, please contact customer service.

Consumer's Acknowledgment

Diode LED stands behind its products when they are used properly and according to our specifications. By purchasing our products, the purchaser agrees and acknowledges that lighting design, configuration and installation is a complex process, wherein seemingly minor factors or changes in layout and infield adjustments can have a significant impact on an entire system. Choosing the right components is essential. Diode LED is able to work with the original purchaser to make an appropriate product selection to the extent of the limited information that the customer can provide, but it is virtually impossible for Diode LED to design a system that foresees every unknown factor. For this reason, this Warranty does not cover problems caused by improper design, configuration or installation issues. Any statement from a Diode LED employee or agent regarding a customer's bill of goods and/or purchase order is NOT an acknowledgment that the products purchased are designed and configured correctly. The purchaser agrees and acknowledges that it is the customer's responsibility to adhere strictly to all information contained in the Product Specification Sheets.

There is often more than one way to design, configure and layout an LED lighting application properly to achieve the same lighting effect. Diode LED strongly recommends that licensed professionals be used in the design and installation of lighting systems that include Diode LED products. The specifications include important information that a designer and installer should carefully review and strictly follow. Qualified designers and certified and/or licensed installers, with access to the final installation environment, customer goals, and Diode LED product specifications can make the requisite decisions appropriate for a successful finished lighting application.



Toll Free: 877.817.6028 | Fax: 415.592.1696 | www.DiodeLED.com | info@DiodeLED.com
© 2014 Elemental LED, Inc. dba Diode LED. All rights reserved. Specifications are subject to change without notice.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาวชวรรณ จันทนาภรณ์
 วัน เดือน ปีเกิด 7 สิงหาคม 2538
 ที่อยู่ 33/115 ซอยกาญจนาภิเษก005/1 ถนนกาญจนาภิเษก
 แขวงหลักสอง เขตบางแค กรุงเทพมหานคร 10160

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนปัญญาราคุม
 ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัท ซีพี ออลล์ จำกัด (มหาชน)



ชื่อ-นามสกุล นายจิรภัทร ดวงสุวรรณ
 วัน เดือน ปีเกิด 1 ตุลาคม 2538
 ที่อยู่ 90/5 ซอยสมประสงค์13 ถนนสายวัดโคก
 ตำบลบางปรอก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย นนทบุรี
 ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัท ฝาจิบ จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล นายจิรภัทร ประภาศิริสุลี
 วัน เดือน ปีเกิด 19 สิงหาคม 2538
 ที่อยู่ 17 ซอยบางแวก73 แขวงบางแวก เขตภาษีเจริญ
 กรุงเทพมหานคร 10160

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนเทพศิรินทร์
 ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัท ซีโน-ไทย เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)



ชื่อ-นามสกุล นายต่อวงศ์ เลิศเด่นธรรม
 วัน เดือน ปีเกิด 10 กรกฎาคม 2539
 ที่อยู่ 108/164 หมู่บ้านศุภภาลย์วิลล์ หมู่5 ถนนพระรามที่2
 ตำบลพันท้ายนรสิงห์ อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัด
 สมุทรสาคร 74000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนปัญญาวรคุณ
 ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัท ผลิตไฟฟ้า จำกัด (มหาชน) หรือ เอ็กโก กรุ๊ป (EGCO Group)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้