

การศึกษาการประจุแบตเตอรี่ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

โดยใช้เทคนิครบกวนและสังเกต

THE STUDY OF THERMOELECTRIC BATTERY-CHARGE
WITH PERTURB AND OBSERVE TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2559

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาการประจุแบตเตอรี่ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก
โดยใช้เทคนิครบกวนและสังเกต

The Study of Thermoelectric Batter-Charge With Perturb
and Observe Technique

ชื่อนักศึกษา

วรวัฒน์ วัชรทัศนกุล รหัสประจำตัว 56051206

อลิษา ผลเกลี้ยง รหัสประจำตัว 56051248

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์




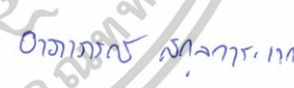
ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ราชศักดิ์ คักदानุภาพ ประธานกรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.กาญจน์ปัญญา สุวรรณสุข กรรมการ	
ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและดึงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการประจุแบตเตอรี่ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้เทคนิค รบกวนและสังเกต
ชื่อนักศึกษา	นายวรวัฒน์ วัชรทัศนกุล รหัสนักศึกษา 56051206 นางสาวอลิษา ผลเกลี้ยง รหัสนักศึกษา 56051248
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร อภาภรณ์ สกฤตการเวก

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบประจุไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ลงในแบตเตอรี่โดยใช้เทคนิควิธีรบกวนและสังเกต (PERTURB AND OBSERVE) ในขั้นตอนการวิจัยโครงการพิเศษนี้จะเริ่มจากใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการผลิตแรงดันไฟฟ้าโดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเข้าสู่วงจรแปลงกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost converter) เพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดสูงมากพอที่จะประจุลงแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 12 โวลต์ ในขั้นตอนการประจุนี้ จะใช้บอร์ดอะดุยโน (Arduino) ในการควบคุมการประจุ ซึ่งในการวิจัยจะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประจุโดยใช้เทคนิควิธีการรบกวนและสังเกต และการประจูดัวยวิธีการกำหนดค่า Duty cycle ซึ่งในการวิจัยจะพบว่าวิธีการประจูดัวยเทคนิควิธีรบกวนและสังเกต (PERTURB AND OBSERVE) มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการประจูดัวยวิธีการกำหนดค่า Duty cycle

คำสำคัญ : เทคนิควิธีรบกวนและสังเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	The Study of Thermoelectric Batter-Charge With Perturb and Observe Technique
Students	Mr. Worawat Watcharatassanakul Student ID 56051118 Miss. Alisa Phonkleing Student ID 56051130
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Asst Prof.Dr.Aparporn Sakulalavek

Abstract

This special project aims to design a system of electrical capacitors from thermoelectric generators into battery technology using Perturb and Observe technique in the research phase, this special project starts with the use of thermocouple to produce voltage using different temperature differences. The output voltage sent into Boost converter to increase of the voltage to a size that is high enough to charge the 12 volt lead acid battery in this process of charging. Arduino boards are used to control the charge. In this research, we compare the efficiency of the charge by using interference and observation techniques. And charging with Duty cycle configuration method in the research will find is Perturb and Observe technique it is more efficient than the charging method with the Duty cycle.

Keywords : PERTURB AND OBSERVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ช่วยเหลือ และได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย ดร. อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้และให้คำปรึกษาในการสร้างเครื่องมือซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำโครงการพิเศษนี้และยังเป็นประโยชน์ในการนำความรู้และเทคนิคต่างๆ ไปใช้ในหน้าที่การงานในอนาคตได้อีกด้วย อีกทั้งยังอดทนให้ออกาสคนไม่ขยันได้ทำงานต่อจนสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี จนเกิดความรู้ความสามารถในด้านใหม่ๆที่ไม่เคยสามารถทำได้มาก่อนจึงกราบ ขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย พี่อานันท์ กังวาลไกล ผู้ซึ่งคอยสนับสนุนการทำโครงการพิเศษนี้ในทุกๆ ด้าน ทั้งด้านทักษะความรู้ความสามารถในการทำงานและสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆในการ ทำงานให้เป็นอย่างดีจึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย เพื่อนร่วมงานในห้องปฏิบัติการที่ทำงาน ร่วมกัน ให้ความช่วยเหลือระหว่างการทำงานหลายอย่าง อีกทั้งยังให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำงานใน ด้านต่างๆจึงขอกล่าวขอบคุณในน้ำใจของเพื่อนๆร่วมงานไว้ ณ ที่นี้ด้วย สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บุคคลผู้ที่มีความสำคัญที่สุดในชีวิต ได้แก่ บิดา มารดา และครอบครัวที่อบอุ่น ผู้คอยอบรมเลี้ยงดู สนับสนุนการกระทำทุกอย่างในทางที่ดีอย่างเต็มที่ ในระหว่างการทำโครงการพิเศษนี้มีปัญหาต่างๆ มากมายซึ่งบั่นทอนกำลังใจในการทำงานเป็นอย่างมากแต่เนื่องจากกำลังใจของท่านเหล่านี้จึงทำให้ โครงการพิเศษนี้สามารถดำเนินต่อและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอกล่าวขอบพระคุณท่านไว้ใน โอกาสนี้ด้วย

วรวิวัฒน์ วัชรทัตศนกุล
อลิษา ผลเกลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)	3
2.2 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	3
2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)	4
2.2.2 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)	5
2.3 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	6
2.4 จุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT)	7
2.5 หลักการทำงานของ Maximum Power Point Tracking (MPPT)	8
2.6 เทคนิคที่ใช้ในการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด	9
2.6.1 เทคนิค Perturb and Observe (P&O)	10
2.6.2 เทคนิคการเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance ; INC)	11
2.6.3 เทคนิคอัตราส่วนแรงดันเปิดวงจร	12
2.6.4 เทคนิคอัตราส่วนกระแสลัดวงจร	13
2.6.5 เทคนิคการกวาดกระแส (Current Sweep)	13
2.6.6 เทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีอื่นๆ	13
2.7 วงจรแปรผันกระแสตรง (DC-DC Converter)	14
2.7.1 วงจรแปรผันกระแสตรง	14
2.7.2 วงจรแปรผันกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter)	14
2.7.3 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	14
2.7.4 หลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	15
2.7.4.1 ขณะสวิตช์นำกระแส	15
2.7.4.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส	16
2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	20
2.9.1 วัสดุทำปฏิกิริยา	21
2.9.2 โครงแผ่นธาตุ	21
2.9.3 แผ่นกั้น (Separator)	22
2.9.4 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)	23
2.9.5 หม้อแบตเตอรี่ (Container)	23
2.10 ประเภทของการประจุ	25
2.9.1 การประแบบแรงดันคงที่	25
2.9.2 การประจุแบบกระแสคงที่	25
2.9.3 การประจุแบบแท็บ	26
2.11 สถานะการประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	26
2.12 หลักการชาร์จแบตเตอรี่แบบ 3 สถานะ	26
2.12.1 สถานะชาร์จหนัก (Bulk mode)	26
2.12.2 สถานะดูดซึม (Absorption mode)	26
2.12.3 รักษาประจุ (Float mode)	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	29
3.2 การหาค่าParameter ของ เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	29
3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง	29
3.2.1.1 TEG รุ่น 1-2456-1.2	29
3.2.1.2 Heater	31
3.2.1.3 Thermocouple ชนิด Type K	31
3.2.1.4 Heat sink	32
3.2.1.5 Chiller	32
3.2.1.6 Pump	33
3.2.1.7 Temperature Control	34
3.2.2 ขั้นตอนการประกอบชุดการทดลอง	34
3.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง	34
3.2.3 การหาค่าParameter ของ เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	35
3.3 การคำนวณค่าของอุปกรณ์ในวงจร Boost converter	35
3.3.1 การเลือกอุปกรณ์ในวงจรทบระดับ	35
3.4 Arduino	36
3.5 การสร้างวงจร Boost converter	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การสร้างระบบประจุแบตเตอรี่	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	41
4.1 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	41
4.1.1 สัมประสิทธิ์ซีเบคของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	41
4.1.2 ค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์	41
4.2 ผลการ step up แรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก TEG โดยวงจร Boost converter	42
4.3 ผลการประจุไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก TEG ลงแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 12 โวลต์	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก	53
ภาคผนวก ข	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค P&O	10
ตารางที่ 2.2 หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค INC	12
ตารางที่ 3.1 ลักษณะจำเพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล	30
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของฮีตเตอร์	31
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองที่ตั้งอุณหภูมิเทอร์โมสตัท 150 องศาเซลเซียส	43
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองที่ตั้งอุณหภูมิเทอร์โมสตัท 200 องศาเซลเซียส	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรเทอร์โมคัปเปิลแบบปิดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I ไหลวน	4
2.2 วงจรเทอร์โมคัปเปิลแบบเปิดทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า V ตกคร่อม	4
2.3 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์	6
2.4 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก	7
2.5 จุดให้กำลังสูงสุดตามทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด	8
2.6 วงจรการทำงานของ Maximum Power Point Tracking	9
2.7 เทคนิค Perturb and Observe (P&O)	11
2.8 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	15
2.9 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส	15
2.10 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส	16
2.11 บอร์ด Arduino R3	18
2.12 เลือกรุ่นบอร์ด Arduino และ เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด	19
2.13 การตรวจสอบความถูกต้องและอัปโหลดโค้ดโปรแกรม	20
2.14 โครงสร้างของแบตเตอรี่ตะกั่ว - กรด	21
2.15 โครงสร้างแผ่นธาตุ	22
2.16 แผ่นกั้น (Separator)	23
2.17 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	24
2.18 การชาร์จแบตเตอรี่ 3 สถานะ	27
3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-12456-1.2	30
3.2 ฮีตเตอร์	31
3.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K	32
3.4 ฮีทซิงค์	32
3.5 chiller	33
3.6 Pump	34
3.7 Temperature control	35
3.8 สร้างวงจร Boost Converter ด้วยโปรแกรม ORCAD	38
3.9 ขั้นตอนการประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันคงที่	39
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า และ ความต้านทานภายนอก	41
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V)กับโหนด(ohm)	44
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P)กับอุณหภูมิ	45
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส(I)กับโหนด(ohm)	46
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P)กับเวลา(s)ที่ $\Delta T=150$	47
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P)กับเวลา(s)ที่ $\Delta T=200$	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งพลังงานนั้นมีหลายรูปแบบแตกต่างกันไป แต่ในการผลิตพลังงานต่างๆเราต้องมีเชื้อเพลิงเพื่อนำมาผลิตพลังงานไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ หรือเชื้อเพลิงหมุนเวียนซึ่งก็คือพลังงานทดแทน เช่น ชีวมวล น้ำ ลม และแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไปนั้นเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตพลังงาน ส่วนใหญ่ในขั้นตอนของการผลิตพลังงานเมื่อเราได้พลังงานที่ต้องการแล้ว แต่เราก็จะมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งซึ่งพลังงานส่วนนี้มักจะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน ไม่ว่าจะเป็นการทำอาหารในครัวเรือน การทำงานของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ต่างๆ และแม้กระทั่งในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะพบว่าในขั้นตอนการทำงานนั้นมักจะมีพลังงานความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียพลังงานของระบบเกิดขึ้นด้วย ทำให้พลังงานความร้อนนี้เป็นพลังงานอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ด้วยสาเหตุนี้เองจึงมีการค้นคว้าและพัฒนาอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อที่จะใช้ประโยชน์จากพลังงานให้ได้มากที่สุด โดยปัจจุบันเราสามารถนำพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ อุปกรณ์ที่มีชื่อว่าเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric generator ; TEG) ซึ่งทำได้โดยการนำเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ไปรับพลังงานความร้อน เพื่อทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งด้านบนและด้านล่างเกิดความแตกต่างกันขึ้น จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะภายในเทอร์โมอิเล็กทริก และทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น เมื่อนำตัวต้านทานมาต่อให้ครบวงจรก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจร

เนื่องจากพลังงานที่ได้เป็นพลังงานไฟฟ้า เราสามารถนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ได้โดยตรงหรือเราจะนำมาชาร์จลงในแบตเตอรี่เพื่อเก็บไว้ใช้ก็ได้ แต่ในการชาร์จลงแบตเตอรี่โดยตรงจากเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นยังไม่สามารถเก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากนัก ทั้งยังส่งผลให้แบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีอายุการใช้งานที่สั้นลง จึงมีการพัฒนาวงจรและกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่เพื่อทำให้การชาร์จนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยกระบวนการชาร์จที่เรากล่าวถึงนั้นก็คือ กระบวนการการหาจุดจ่ายโวลต์กำลังสูงสุด (Maximum power point tracking หรือ MPPT) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC converter) เพื่อทำให้สามารถปรับความเข้ากันได้ (Impedance Matching) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดของระบบ เนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะให้กำลังสูงสุดได้ ก็ต่อเมื่อความต้านทานของแหล่งกำเนิดมีค่าใกล้เคียงกับโหลด

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาระบบในการชาร์จแบตเตอรี่จากเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการควบคุมการหาจุดจ่ายโวลต์กำลังสูงสุดที่ให้กับแบตเตอรี่ โดยผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประจุแบตเตอรี่ด้วยวิธีการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดโดยซีเทคนิควิธีรบกวนและสังเกต และการประจุแบตเตอรี่โดยการกำหนดค่า Duty cycle

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการชาร์จแบตเตอรี่
- 2) ออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบแรงดัน
- 3) สร้างระบบการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 12 โวลต์ ด้วยวิธีการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์

1.4 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัย	เดือน									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
1.ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■	■	■	■	■	■				
2.ออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง	■	■	■	■	■	■				
3.สร้างโปรแกรมหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด										
4.ประกอบระบบชาร์จแบตเตอรี่								■		
5.ทดสอบระบบชาร์จแบตเตอรี่								■	■	
6.วิเคราะห์และสรุปงานวิจัย										■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจหลักการการทำงานเบื้องต้นของเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) เข้าใจกระบวนการทำงานของระบบการชาร์จแบตเตอรี่รบกวนและสังเกต
- 3) เข้าใจกระบวนการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดด้วยเทคนิควิธี
- 4) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการชาร์จแบตเตอรี่และยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล คือ อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นความเย็นได้ โดยภายในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประกอบไปด้วยวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น (N-type) และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี (P-type) เรียงกันเป็นคู่ๆ วางสลับกัน โดยมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมทั้งคู่เข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวสุดท้าย เมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (Load) หากมีกระแสไฟฟ้าก็จะไหลครบวงจรพอดี ที่ด้านบนและด้านล่างถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก ปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลผลิตได้เนื่องจากความต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นด้านบนและด้านล่างขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของ เอ็น-พี ในโมดูลนั้น ในเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์นั้น การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 โหมด ดังนี้ โหมดแรก เรียกว่า “โหมดผลิตไฟฟ้า (Generator mode)” โดยให้ความต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ด้านบนและด้านล่าง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากการไหลของพาหะในสารกึ่งตัวนำเอ็นและพี ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งมีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน (Electron) หรือประจุลบ เมื่อความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง การไหลของความร้อนจะทำให้เกิดการไหลของพาหะข้างมากเหล่านั้น อิเล็กตรอนจะไหลจากผิวด้านบนไปสู่ด้านล่าง ส่วนในสารกึ่งตัวนำพี มีพาหะข้างมากเป็นโฮล (Hole) หรือประจุบวก เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง โฮลก็จะไหลจากผิวด้านบนไปด้านล่างเช่นเดียวกัน ดังนั้นทิศทางของกระแสไฟฟ้าในเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์จึงไหลไปทางทิศเดียวกัน ส่วนการทำงานอีกโหมดหนึ่งในทางกลับกัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์จะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่าง เรียกว่า “โหมดผลิตความเย็นด้วยไฟฟ้า (Refrigerator mode)” เมื่อมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก เช่น แบตเตอรี่ จะทำให้เกิดความแตกต่างของความร้อนและความเย็นที่ผิวแต่ละด้าน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดการนำความร้อนจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง

2.2 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ คือ ปรากฏการณ์ในการแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ได้แก่ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) ทั้งสามปรากฏการณ์นี้ คือการแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า หรืออาจแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนได้ แต่ในงานวิจัยนี้เราศึกษาเฉพาะเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน ที่มาจากปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) และปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

ในปี 1821 โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันกล่าวว่า “เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด” ปรากฏการณ์ซีเบค เป็นการแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ความสำคัญทางกายภาพของมันเห็นได้โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ ของการบังคับผิวหน้าของอุณหภูมิสม่ำเสมอ ให้ไหลไปตามตัวนำ ซึ่งในตอนเริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายอย่างสม่ำเสมอของตัวพาหะประจุ แต่ภายใต้ผิวหน้าอุณหภูมิ หนึ่งพาหะอิสระต่างๆ ที่ปลายด้านร้อน (Hot end) จะมีพลังงานจลน์มากกว่าปลายด้านเย็น (Cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การเกิดขึ้นของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back electromotive force หรือ back e.m.f) ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลของประจุ ความต่างศักย์วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหลเกิดขึ้น [1] ดังรูป



เมื่อศึกษาในรายละเอียด พบว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่สามารถแปลงความแตกต่างทางอุณหภูมิ (Temperature gradient) ไปสู่ความต่างศักย์ (Voltage) เมื่อปลายด้านหนึ่งของวัสดุตั้งกล้ำร้อนและอีกด้านหนึ่งเย็น ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นสามารถนำไปสู่กำลังไฟฟ้าได้ ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกกำหนดโดยค่า คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก(ZT) สามารถคำนวณโดย

$$ZT = \frac{S^2}{\rho K} \cdot T \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ซึ่งจะมีค่าสูงในกรณีที่วัสดุเป็นฉนวนและมีค่าต่ำในกรณีโลหะ

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity)

K คือ สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity)

จากปริมาณเหล่านี้จะเห็นว่าวัสดุที่มีประสิทธิภาพที่ควรมีสัมประสิทธิ์ซีเบค และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพนำความร้อนที่ต่ำ

ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ผลักดันให้เกิดการเคลื่อนตัวของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสามารถคำนวณได้จาก

$$S = \Delta V / \Delta T \quad (2.2)$$

โดยที่ ΔV คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างด้านทั้งสองของ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างด้านทั้งสองของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

2.2.2 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) หรือ หลอดเคลวิน (Lord Kelvin) นักฟิสิกส์ชาวสก็อตได้กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับกรไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อน หรือจากจุดร้อนไปจุดเย็น” หรือก็คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณสูงไปยังอุณหภูมิต่ำของวัสดุ และมีการดูดกลืนความร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

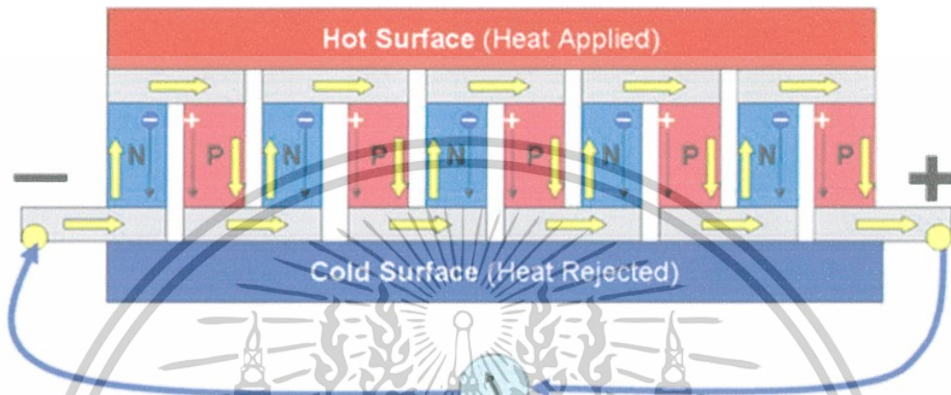
$$Q = B_T I \Delta T \quad (2.3)$$

เมื่อ B_T คือ สัมประสิทธิ์ทอมสัน (VK^{-1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์

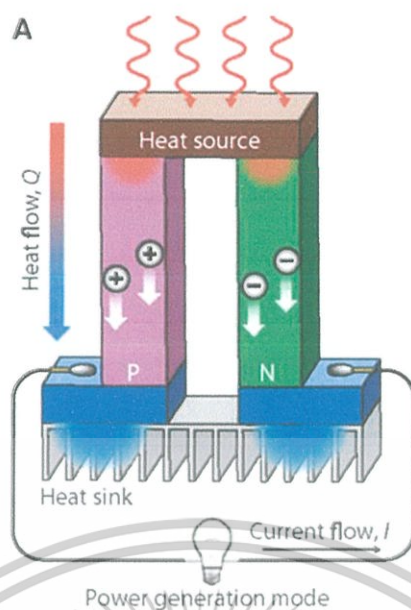
การประกอบ “วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก” ให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานเป็นแหล่งพลังงานได้ เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)” เริ่มต้นจากการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็น (N-type) และชนิดพี (P-type) ชิ้นเล็กๆมาต่อกันเป็นคู่ๆ โดยวางสลับกัน และมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการเชื่อมกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวสุดท้าย โดยที่ด้านบนและด้านล่างจะถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์

ในการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องมีแหล่งความร้อน จากนั้นทำให้ปลายด้านบนและด้านล่างมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยให้ปลายด้านบนมีอุณหภูมิสูงกว่าปลายด้านล่าง จากนั้นอุณหภูมิสูงจะไหลไปสู่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงเกิดการไหลของพาหะ ทำให้พาหะอิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) เคลื่อนที่ลงด้านล่าง การที่พาหะเกิดการเคลื่อนที่จะทำให้ปลายทั้งสองด้านมีปริมาณพาหะที่ต่างกัน เมื่อทั้งสองด้านมีพาหะไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น และเมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (Load) จะมีกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร ซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลไหลในทิศทางเดียวกับการไหลของโฮล เราจึงเปลี่ยนพลังงานความร้อนมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



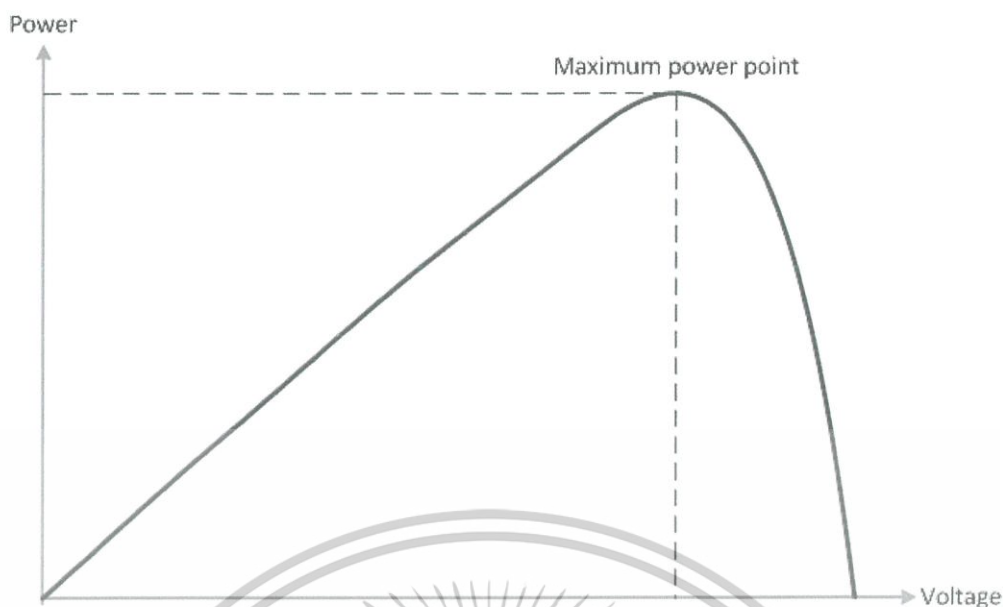
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ที่ผลิตได้เกิดจากความต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นเซรามิคด้านบนและด้านล่างของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์และขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของ เอ็น-พี ในเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์นั้น [2]

2.4 จุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT)

Maximum Power Point Tracking(MPPT) คือ อัลกอริธึมหรือรูปแบบการคำนวณอย่างหนึ่ง ที่นำมาใช้กับการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก (แผงโซลาร์เซลล์ หรือ กังหันลม ผลิตกระแสไฟฟ้า) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพมากขึ้น เพราะในความเป็นจริงพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก มีค่าไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับปริมาณของพลังงานความร้อนจากแหล่งกำเนิดเป็นหลัก ส่วนการบอกขนาดตาม spec. ที่ออกมาเป็นวัตต์นั้นหมายถึง W_{mppt} คือ วัตต์จุดที่เทอร์โมอิเล็กทริก ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point หรือ MPP) เป็นค่าที่เป็นจุดสูงสุดของกราฟ I-V Curve เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 จุดให้กำลังสูงสุดตามทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด

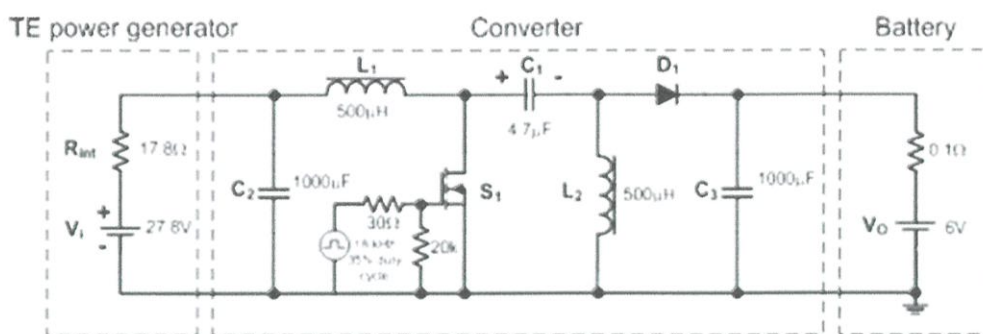
ดังนั้นการนำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกมาชาร์จไฟให้กับแบตเตอรี่โดยผ่านตัวควบคุมแบบธรรมดา จึงทำให้เกิดการสูญเสียและทำให้แบตเตอรี่อายุสั้นกว่าที่ควรจะเป็น

2.5 หลักการทำงานของ Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) มีหลักการทำงานคือ มีระบบไมโครโพรเซสเซอร์ หรือตัวตรวจจับสัญญาณ คอยควบคุมดูแลสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก เปรียบเทียบกับ แรงดันกระแสในแบตเตอรี่ และเลือกจุดที่มีกำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจุดที่มี กำลังสูงสุดในการชาร์จคือจุดที่ output impedance ของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ไปเท่ากับ input impedance ของ dc-dc converter เพื่อประจุลงในแบตเตอรี่ให้เต็มตลอดเวลาและทำให้ การชาร์จนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นกระบวนการนี้จะเป็นการแก้ไขปัญหาในเรื่องอุณหภูมิ ทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกไม่คงที่ หรือความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริก ที่มีเปลี่ยนแปลง

ในการส่งกำลังจากแหล่งพลังงานจะถูกใช้ เพื่อให้แน่ใจว่ากำลังที่แหล่งพลังงานให้สามารถถ่าย โอนไปยังโหลดได้มากที่สุด ทำให้มีการพัฒนารูปแบบของวงจรรวมทั้งการสร้างโปรแกรมที่ควบคุม วงจร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรการทำงานของ Maximum Power Point Tracking

ในการปรับ output impedance ของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนเรเตอร์ ให้ไปเท่ากับ input impedance ของ dc-dc converter เพื่อหาจุดที่มีกำลังสูงสุดในการชาร์จนั้น สามารถควบคุมได้ โดยการปรับ Duty cycle ของ gate drive signal โดยกระบวนการปรับ Duty cycle เรียกว่า “Pulse Width Modulation (PWM)”

ซึ่งดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) คืออัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ หรือช่วงที่มีพัลส์ต่อคาบเวลาของพัลส์ (Pulse periode อ่านว่า พัลส์ พีเรียด) โดยมีการคิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{Duty cycle} = (t_{\text{on}}/T) \quad (2.4)$$

โดย Duty cycle คือ อัตราส่วนระหว่างช่วงที่มีพัลส์ต่อคาบเวลาของพัลส์

t_{on} คือ อัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ หรือช่วงที่มีพัลส์

T (Pulse period time) คือ หน่วยความกว้างของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม 1 ลูก

2.6 เทคนิคที่ใช้ในการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด

กำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับจุดทำงานที่ค่ากระแสและแรงดันต่างๆ แต่จะมีเพียงจุดเดียวเท่านั้นที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) จึงถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อให้ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานที่จุดนั้นและนำพลังงานไฟฟ้าออกมาใช้งานให้ได้มากที่สุด ในปัจจุบันเทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดถูกนำเสนอขึ้นมากมาย ซึ่งมีความแตกต่างกันในด้านต่างๆเช่น ความซับซ้อน, จำนวนเซนเซอร์ที่ใช้งาน, ความเร็วในการลู่เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด, ราคา, ฯลฯ ในหัวข้อนี้จะแนะนำเทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบต่างๆโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 เทคนิค Perturb and Observe (P&O)

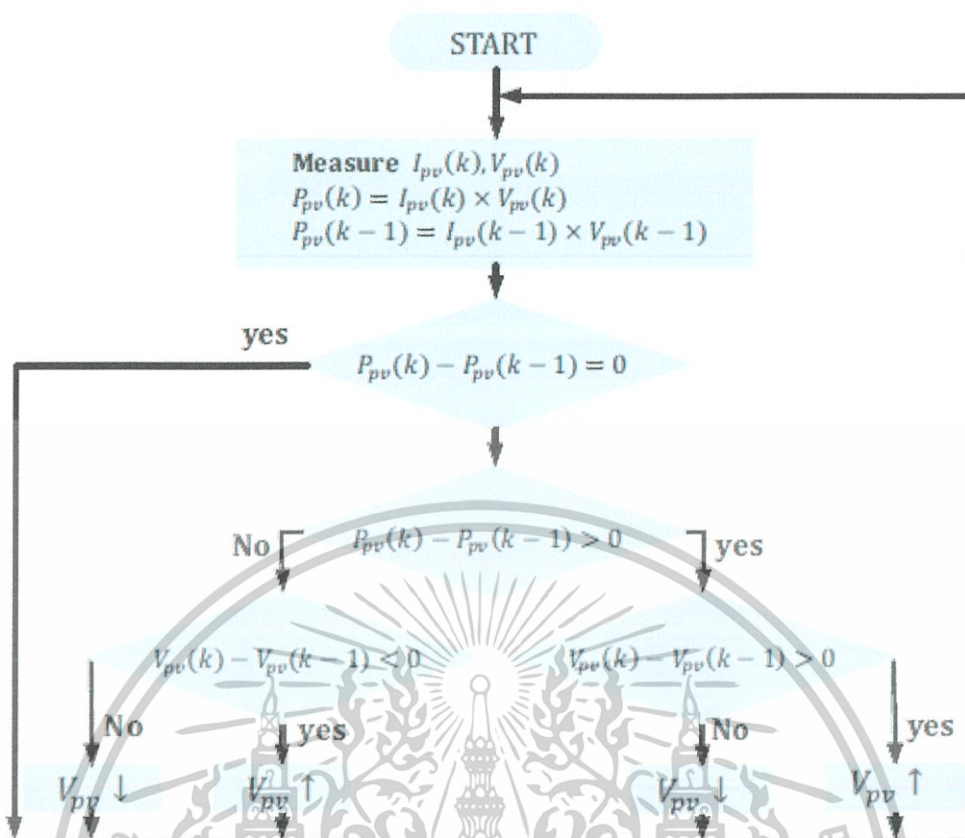
เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เทคนิค P&O จะเป็นการปรับค่าแรงดันของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกไปในทิศทางที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาไปตามกราฟคุณลักษณะ เมื่อถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (จุดยอด) ค่าแรงดันยังคงเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และแกว่งอยู่รอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง

ตารางที่ 2.1 หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค P&O [3]

ทิศทางการเปลี่ยนแปลงแรงดัน	ทิศทางการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า	ทิศทางการเปลี่ยนแปลงแรงดันครั้งต่อไป
เพิ่ม	เพิ่ม	เพิ่ม
เพิ่ม	ลด	ลด
ลด	เพิ่ม	ลด
ลด	ลด	เพิ่ม

จากตารางที่ 1 หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค P&O จะเห็นว่าถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงไปจากเดิม ระบบจะเปลี่ยนทิศทางการเปลี่ยนแปลงแรงดันไปในทิศทางตรงกันข้าม ทั้งนี้ ก็เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั่นเอง เนื่องจากกระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำไปซ้ำมา จนในที่สุดค่ากำลังไฟฟ้าของระบบจะแกว่งอยู่รอบๆจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งสามารถลดค่าการแกว่งนี้ได้โดยการลดค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลง (ΔV) อย่างไรก็ตามการลดค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้การลู่เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดช้าลง แนวทางการแก้ปัญหาหนึ่งที่จะจัดการกับปัญหานี้ก็คือทำให้มีขนาดของ ΔV ที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยให้ค่า ΔV น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดที่ว่า ไม่สามารถตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงได้เนื่องจากติดปัญหา Local Maxima

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เทคนิค Perturb and Observe (P&O)

2.6.2 เทคนิคการเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance ; INC)

เทคนิคนี้พิจารณาจากความชันของกราฟคุณลักษณะระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดัน

ของระบบ

$$dV/dp = 0 \text{ ที่จุด MPP}$$

$$dV/dp > 0 \text{ ด้านซ้ายมือของจุด MPP}$$

$$dV/dp < 0 \text{ ด้านขวามือของจุด MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{1}{V}$$

การตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค INC สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบค่า Conductance ขณะนั้นๆ (V/I) กับค่า Conductance ที่เปลี่ยนแปลง ($\Delta I/\Delta V$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค INC [4]

เงื่อนไข	ทิศทางการเปลี่ยนแปลงแรงดัน
$\Delta I / \Delta V = -I / V$	ไม่เปลี่ยนแปลง
$\Delta I / \Delta V > -I / V$	เพิ่ม
$\Delta I / \Delta V < -I / V$	ลด
$\Delta V = 0, \Delta I = 0$	ไม่เปลี่ยนแปลง
$\Delta V = 0, \Delta I > 0$	เพิ่ม
$\Delta V = 0, \Delta I < 0$	ลด

จากตารางที่ 2 หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค INC การทำงานของระบบจะถูกคงค่าให้ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงของกระแส (ΔI) เป็นตัวบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ เมื่อกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่แรงดันคงที่ ($\Delta V = 0$) ระบบจะกลับมาหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่อีกครั้ง อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดที่ว่า ไม่สามารถตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเนื่องจากติดปัญหา Local Maxima

2.6.3 เทคนิคอัตราส่วนแรงดันเปิดวงจร (Fractional Open-Circuit Voltage)

เทคนิคนี้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่าแรงดันเปิดวงจรของระบบดังสมการ

$$M_{pp} \approx V_{oc} k_1 \quad (2.5)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเซลล์พลังงาน

ค่า k_1 จะถูกคำนวณจากการสังเกตค่าสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับค่าแรงดันเปิดวงจรจากการทดสอบเซลล์พลังงาน

อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จำเป็นต้องทำการเปิดวงจรเพื่อวัดค่าแรงดันเปิดวงจรของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าไปชั่วขณะ และตำแหน่งของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดย่อมไม่แน่นอนจึงไม่สามารถตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 เทคนิคอัตราส่วนกระแสลัดวงจร (Fractional Short-Circuit Current)

เทคนิคนี้คล้ายกันกับเทคนิคอัตราส่วนแรงดันเปิดวงจรแต่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับค่ากระแสลัดวงจรของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แทนดังสมการ

$$I_{MPP} \approx k_2 I_{SC} \quad (2.6)$$

เมื่อ k_2 คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเซลล์พลังงาน

ค่า k_2 จะถูกคำนวณจากการสังเกตค่าสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับค่าแรงดันเปิดวงจรจากการทดสอบเซลล์พลังงานที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จำเป็นต้องทำการลัดวงจรเพื่อวัดค่ากระแสลัดวงจรของระบบเซลล์พลังงานทำให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าไป

2.6.5 เทคนิคการกวาดกระแส (Current Sweep)

เทคนิคการกวาดกระแสใช้การปรับค่ากระแสของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่ากระแสลัดวงจรเพื่อทำการบันทึกกราฟคุณลักษณะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกราฟ I-V, P-V และ P-I ทำให้สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงได้ เทคนิคนี้สามารถทำได้หลายรูปแบบเช่นการกวาดกระแสโดยวงจร RC และการกวาดกระแสด้วยการปรับค่า duty cycle ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จำเป็นต้องใช้เวลาในการกวาดกระแสทำให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าไปชั่วขณะ และจำเป็นต้องทำการเปิดวงจรไฟฟ้าในกรณีที่ทำการกวาดกระแสโดยใช้วงจร RC

2.6.6 เทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีอื่นๆ

นอกจากเทคนิคที่กล่าวไปข้างต้นแล้วยังมีเทคนิคการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดอื่นๆเกิดขึ้น อีกมากมาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้ Fuzzy Logic Control, Neural Network, Particle Swarm Optimization, RCC, OCC ฯลฯ ซึ่งจะมีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งงานวิจัยในระยะหลังๆจะมุ่งเน้นให้ความสำคัญต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงเพื่อให้สามารถตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงได้ (Global MPP หรือ True MPP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7. วงจรแปลงผันกระแสตรง (DC-DC Converter)

2.7.1 วงจรแปลงผันกระแสตรง

วงจรแปลงผันหลายแบบสามารถใช้ในการให้กำลังสูงสุดจากทรานซิสเตอร์ได้ เช่น วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทอนระดับ วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ และวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทอนและทบระดับ แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดพลังงานในงานวิจัยนี้เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่สร้างแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่าแรงดันแบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีแรงดันถึง 12 โวลต์ แต่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตแรงดันได้เพียง 4 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ประจุสามารถ เคลื่อนที่ไปยังแบตเตอรี่ได้ แรงดันของแหล่งจ่ายจะต้องสูงกว่าแรงดันที่ของแหล่งเก็บประจุ ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter) เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงมากพอให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้

2.7.2 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter)

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) เป็นวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ในการเพิ่มค่าระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่ โดยการ

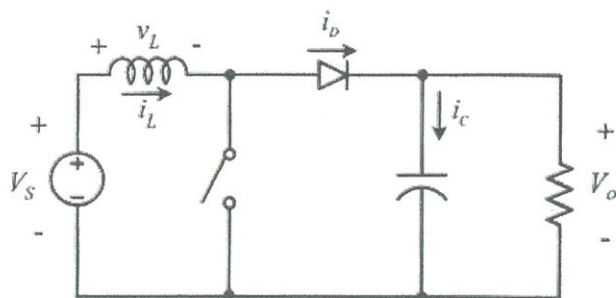
ทำงานของวงจร (Boost Converter) นี้ จะทำงานตามสัญญาณพัลส์แบบ PWM (Pulse Width Modulation) ที่สร้างจากไอซี TL494 ซึ่งสัญญาณ PWM นี้สามารถปรับความถี่และความกว้างของสัญญาณพัลส์นี้ได้โดยการปรับค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ในวงจรเมื่อได้สัญญาณ PWM แล้วจะส่งผ่านไปยังวงจรขับเกต (Gate Drive Circuit) เพื่อไปขับนำสวิทช์ POWER MOSFET เบอร์ IRFP460 ให้ทำงานโดยมีลักษณะของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 12 Vdc ให้สูงขึ้นมีค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 310 Vdc (เป็นขีดจำกัดของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์) เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป

2.7.3 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัวจะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ จุดตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากัน และมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณ ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา ในแต่ละคาบเท่ากับศูนย์
3. ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



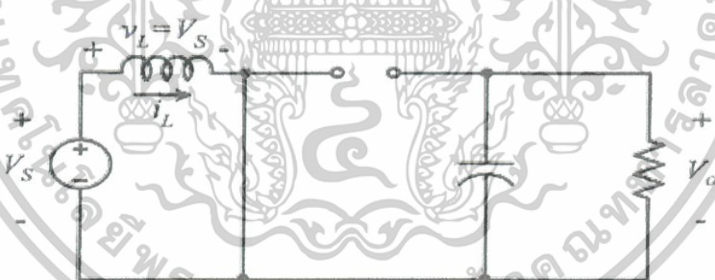
รูปที่ 2.8 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

2.7.4 หลักการทำงานของวงจบบัสต์คอนเวอร์เตอร์

หลักการทำงานของวงจบบัสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์และสามารถหากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดัง

2.7.4.1 ขณะสวิตช์นำกระแส

กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้รูป จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

$$-V_s + v_L = 0 \quad (2.7)$$

$$v_L = V_s = L \frac{di}{dt} \quad (2.8)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.9)$$

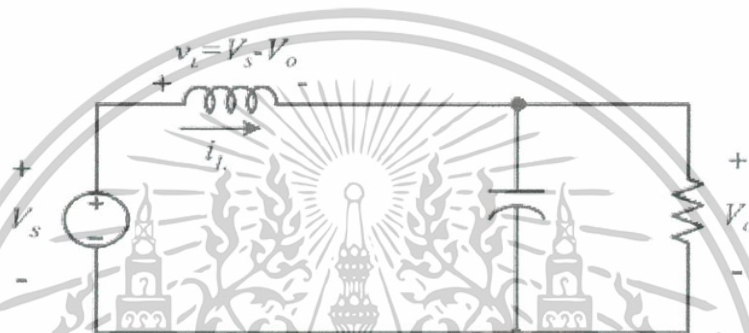
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,ON} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.10)$$

โดย Δi หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

2.7.4.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้กระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมุติว่าแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-V_s + V_L + V_o = 0 \quad (2.11)$$

$$V_L = V_s - V_o \quad (2.12)$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.13)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้นทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{l,off} = \left[\frac{V_s - V_o}{L} \right] (1-D)T \quad (2.15)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$\Delta i_{l,on} + \Delta i_{l,off} = 0 \quad (2.16)$$

$$\left[\frac{V_s}{L} \right] DT + \frac{V_s - V_o(1-D)T}{L} \quad (2.17)$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0 \quad (2.18)$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0 \quad (2.19)$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.21)$$

จากการหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เรียกว่า อัตราขยายแรงดัน สามารถหาได้โดยวิธีง่าย ๆ โดยใช้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_{L,av} = V_{L,on}(t_{on}) + V_{L,off}(t_{off}) = 0 \quad (2.22)$$

จากสมการ

$$V_{L,on} = V_s \quad (2.23)$$

และจากสมการ

$$V_{L,off} = V_s - V_o \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{L,av} = (V_s)(t_{on}) + (V_s - V_o)(t_{off}) \quad (2.25)$$

$$(V_s)(DT) + (V_s - V_o)(1-D)T = 0 \quad (2.26)$$

$$V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0 \quad (2.27)$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0 \quad (2.28)$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0 \quad (2.29)$$

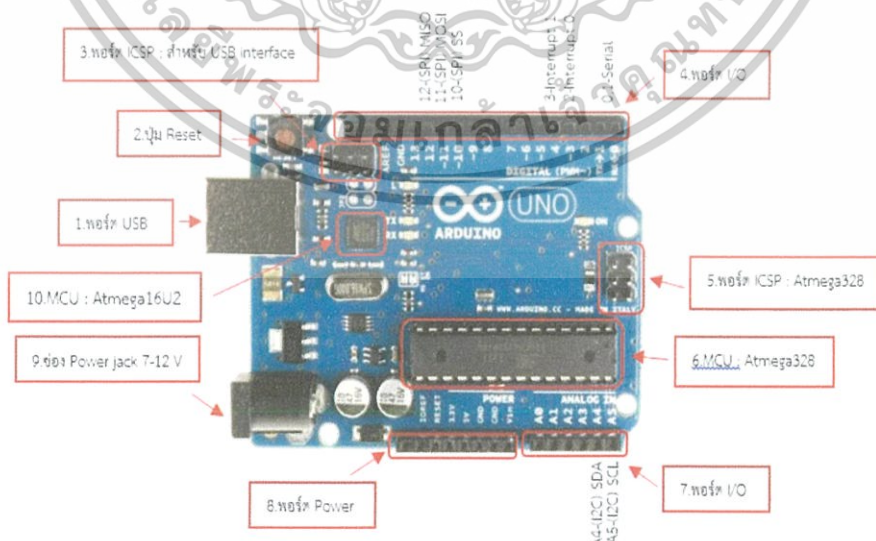
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.30)$$

2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์

Arduino หรือ อาดูยโต้ เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบเปิดเผย ข้อมูลด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้มีจุดเด่นได้แก่

- 1.) ยง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐานไม่สลับซับซ้อน
- 2.) Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแรง
- 3.) Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้านราคาไม่แพง

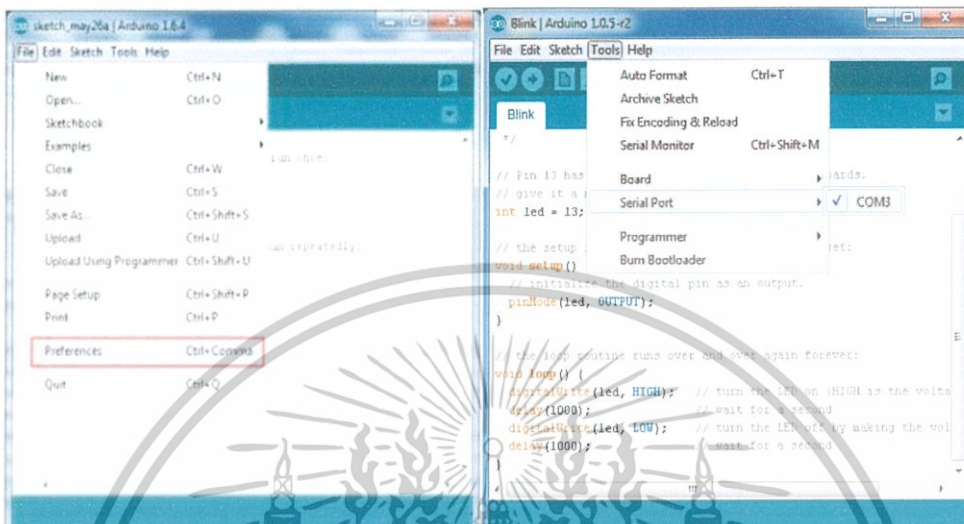
Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้ โดยในส่วนของประกอบของบอร์ดอาดูยโต้ (R3) นั้นจะถูกแสดงดังรูปที่ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.11 บอร์ด Arduino R3
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

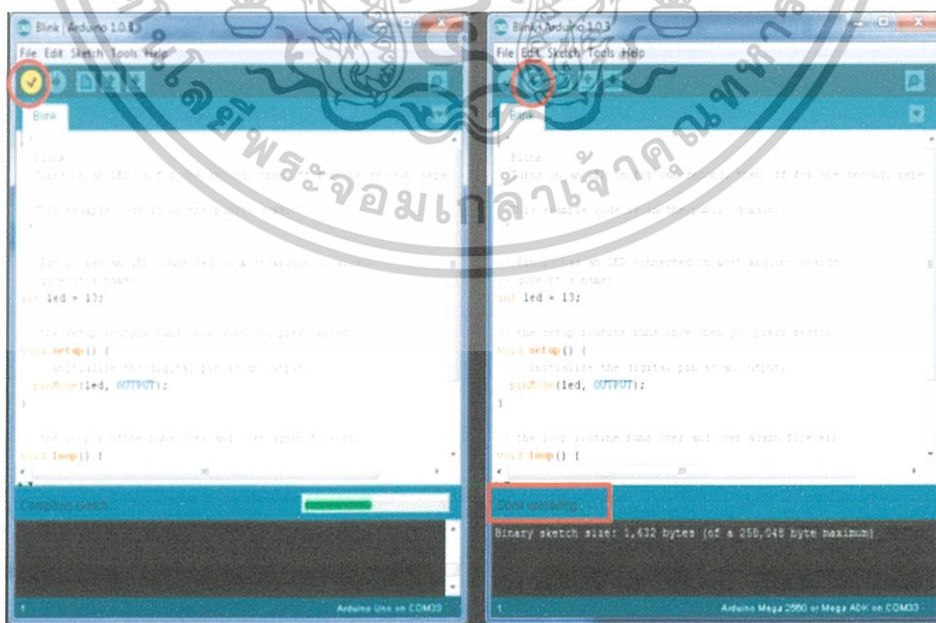
ขั้นตอนพื้นฐานของการเขียนโปรแกรมบนบอร์ด Arduino คือ

เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม Arduino IDE หลังจากที่เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้และหมายเลข Com port



รูปที่ 2.12 เลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload และ เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด

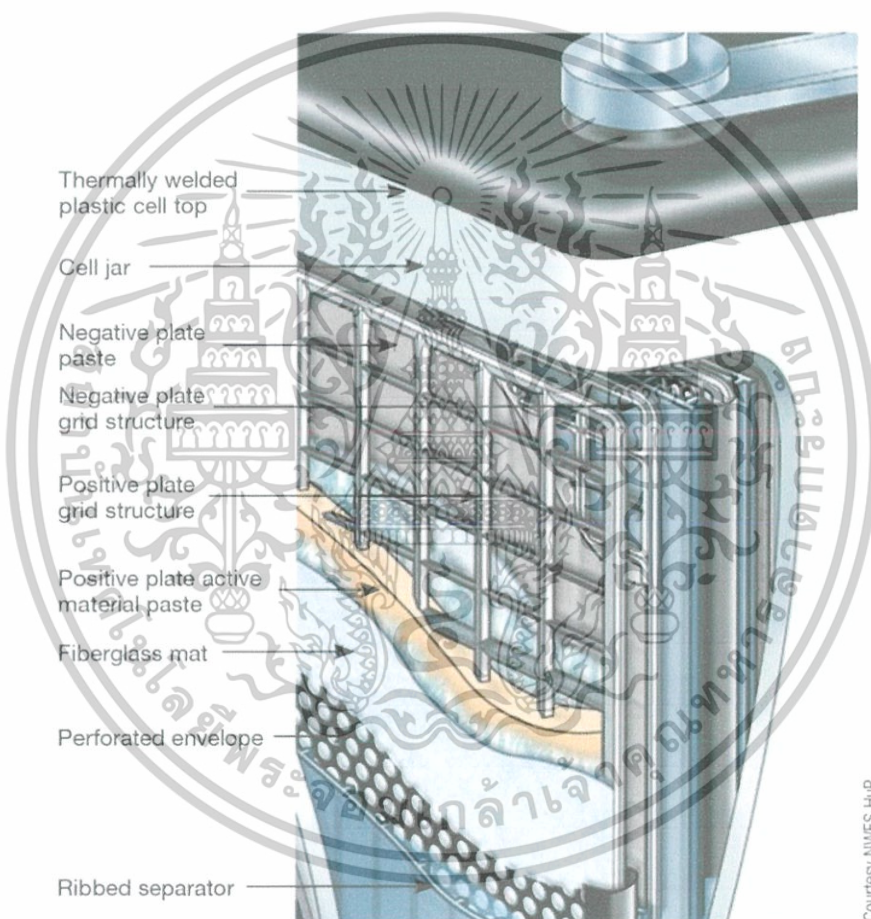
กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม Upload โค้ดโปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบล่าง Done uploading และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การตรวจสอบความถูกต้องและอัปโหลดโค้ดโปรแกรมใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมีส่วนประกอบสำคัญภายใน ดังรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วย แผ่นตะกั่วที่เป็นขั้วบวก และลบจุ่มอยู่ในสารละลายกรดซัลฟูริกหรือเรียกวาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อเซลล์มีการจ่ายประจุ โมเลกุลของซัลเฟอร์จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะติดอยู่กับแผ่นตะกั่ว และปล่อยอิเล็กตรอนออกมามากมาย เมื่อเซลล์มีการประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่อิเล็กตรอนจำนวนมากจะกลับเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แบตเตอรี่จึงเกิดแรงดันได้จากปฏิกิริยาเคมีนี้เอง และไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่ให้แรงดัน 2 โวลต์ต่อเซลล์แบตเตอรี่ 12 V จึงมี 6 เซลล์ต่อกันแบบอนุกรมเซลล์ทั้งหมดอาจบรรจุอยู่ภายในกล่องเดี่ยวหรือแยกกล่องก็ได้[5]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของแบตเตอรี่ตะกั่ว – กรด

ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด วัสดุภายในที่นำมาให้อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทงานที่นำไปใช้งาน และการออกแบบของผู้ผลิต แต่จะมีส่วนประกอบหลักที่เหมือนกัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 วัสดุทำปฏิกิริยา (Active Material)

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นจะประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบซึ่งเป็นวัสดุต่างชนิดกันเป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง สำหรับแบตเตอรี่ชนิด ตะกั่ว-กรดนั้น แผนธาตุบวกจะเป็น PbO₂ ผงตะกั่วออกไซด์มีสีน้ำตาลฉาบอยู่ในโครงแผนธาตุ ในขณะที่ขั้วลบจะเป็น Pb ผงตะกั่วมีสีเทาฉาบบน โครงแผนธาตุเช่นกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรไลต์กับวัสดุทำปฏิกิริยาและลดการตกลงของแรงดันอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์Polarisation

2.9.2 โครงแผนธาตุ (Support Grids)

โครงแผนธาตุ ดังรูปที่ 3.2 จะทำจากตะกั่วผสมอาจเป็น พลวง (Antimony) ดีบุก (Tin) บิสมัท (Bismuth) แคลเซียม (Calcium) ซีลีเนียม (Selenium) ซึ่งตะกั่ว-พลวงเป็นโลหะผสมที่ใช้กับแบตเตอรี่ชนิดแรกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของตะกั่วโดยใช้ประมาณ 1.5 – 1.8 % เพอร์เซ็นต์แต่ทำให้เกิดผลเสียคือเพิ่มความต้านทานในเซลล์ ทำให้เกิดการคายประจุในตัวเองเร็วขึ้น และอายุการใช้งานสั้น ในระหว่างการประจุใหม่จะทำให้เกิดการก่อตัวของแก๊สพิษ SbH₃ จากการค้นคว้าทำให้เราทราบว่า ตะกั่ว-แคลเซียม มีข้อได้เปรียบมากกว่า ตะกั่ว-พลวง ในกรณีแผนธาตุชนิดพลวงจะเจือซีลีเนียมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล เช่นกัน

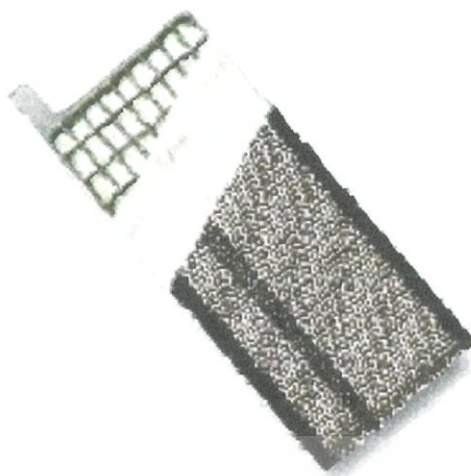


รูปที่ 2.15 โครงสร้างแผนธาตุ

2.9.3 แฉกั้น (Separator)

แฉกั้นดังรูปที่ 3.2 มีหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกัน โดยตรงของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง คุณสมบัติที่ดีของแฉกั้นนั้น จะต้องมีความต้านทานการไหลของไอออนในสารละลายต่ำ นั่นก็หมายถึงต้องมีความพรุนให้อิออนผ่านได้สะดวกและไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือแผนธาตุในระบบด้วย ในช่วงแรกนั้นแฉกั้นจะทำจากวัสดุจำพวกไม้ fir และ Cedar โดยนำยางไม่ออกก่อน ต่อมาก็ใช้ยางตามธรรมชาติอบซึ่งให้ความพรุนมากกว่าแต่ในปัจจุบันมักนิยมใช้ยางสังเคราะห์ที่เป็นรูพรุนอันเนื่องมาจากกรรมวิธีการผลิตจำพวกโพลีไวนิลคลอไรด์หรือโพลีเอทิลีน แต่แบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานสั้น เช่นแบตเตอรี่รถยนต์การใส่แฉกั้นที่เป็นกระดาษจะคุ้มทุนกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แผ่นกั้น (Separator)

2.9.4 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

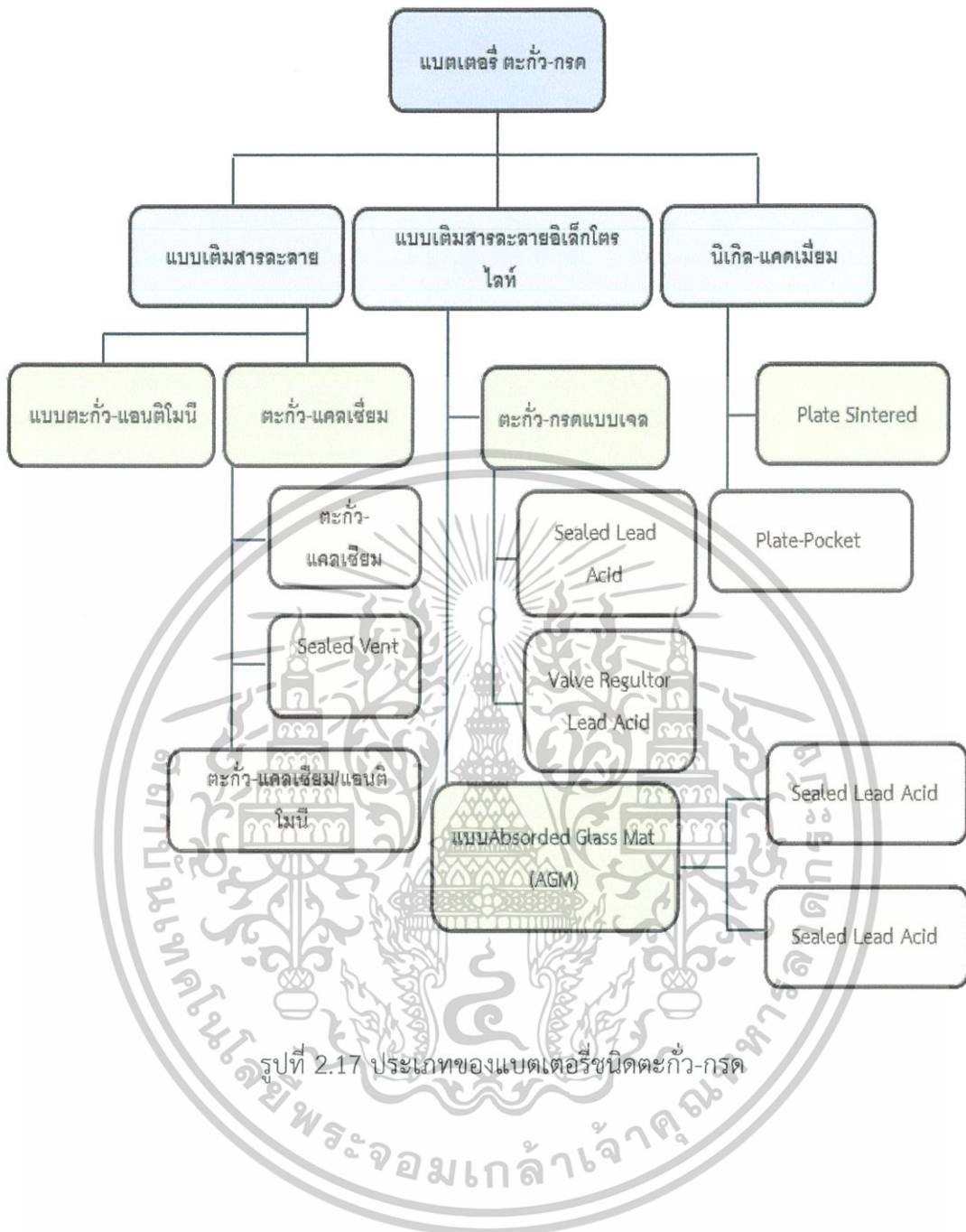
สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.210 – 1.300 แต่จะขึ้นอยู่กับกรอกแบบและประเภทการใช้งาน และสภาพภูมิอากาศ ถ้าใช้สารละลายที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียหลายอย่าง เช่น การคายประจุในตัวเองและการผุกร่อนของแผ่นธาตุ

2.8.5 หมอแบตเตอรี่ (Container)

หมอแบตเตอรี่มีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องจากไม้ แก้ว เซรามิกพลาสติก ซึ่งปัจจุบันนิยมทำมาจากพลาสติกจำพวก PVC หรือไมกไฟลีโอทิลีน และแบ่งออกเป็นช่องๆ ขึ้นกับการออกแบบ โดยกำหนดให้หนึ่งช่องเซลล์มีความต่างศักย์ประมาณ 2 V และต่อกัน

ในการเลือกวัสดุนั้นจะต้องเลือกวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและไม่มีผลต่อปฏิกิริยาในระบบ ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้โลหะแต่สำหรับในแบตเตอรี่รถยนต์จะใช้โลหะด้านนอกเพื่อความแข็งแรงแต่ด้านในจะเป็นพลาสติก แบตเตอรี่ชนิดกันแมจะมีความจุเท่ากันก็อาจมีขนาดตัวถังต่างกันเนื่องด้วยปริมาณสารละลายต่างกัน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ประเภทของการประจุ

การประจุแบตเตอรี่หัตถิยภูมินั้น มีวิธีอยู่หลายวิธี เป้าหมายของการประจุก็คือการจ่ายกระแสเข้าสู่แบตเตอรี่ ในทิศทางตรงกันข้ามกับการคายประจุ การประจุแรงดันคงที่ นิยมใช้กันทั่วไป แต่ก็ยังมีการประจุแบบกระแสคงที่ที่ใช้กันอยู่ รวมทั้งเครื่องมือประจุแบบแท็บ สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกเครื่องมือประจุคือ การถูกคายประจุ เวลาที่ใช้ในการคายประจุ อุณหภูมิที่สูงขึ้น และจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ [7]

2.10.1 การประจุแบบแรงดันคงที่

การประจุแบบแรงดันคงที่หมายถึง การประจุด้วยค่าหนึ่งถึงแรงดันเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงกระแสประจุ ปริมาณของกระแสประจุจะขึ้นอยู่กับ ความต่างศักย์ระหว่างแรงดันเครื่องประจุกับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นการชาร์จ กระแสจึงค่อนข้างสูง และจะลดลงเมื่อแบตเตอรี่มีสถานะการประจุเข้าใกล้ 100% เนื่องจากแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่สูงขึ้น เครื่องประจุโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบคือ Fast charge จะประจุที่แรงดันสูง กระแสที่ประจุจึงสูงตามเวลาที่ใช้ประจุจะเร็ว แต่ว่า ก็เสี่ยงต่อความเสียหายในเซลล์แบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานน้อยลง อีกแบบหนึ่งก็คือการประจุแบบ Float คือการประจุที่แรงดันสูงกว่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่เล็กน้อย กระแสประจุจึงไม่สูงแต่ก็ใช้เวลาประจุก่อนข้างนาน จะเห็นได้ว่ามีข้อดีข้อเสียต่างกันดังนั้นจึงมีการประยุกต์ให้การประจุแบบแรงดัน คงที่นี้ให้เป็นแบบ Dual step charging คือเริ่มแรกจะประจุแบบเร็วไปก่อนเพื่อแก้ไขจุดอ่อนในเรื่องเวลาในการประจุ เมื่อเวลาผ่านไปสถานะการประจุเริ่มสูงขึ้นก็ให้เปลี่ยนระดับแรงดันเป็นแบบ Float เพื่อทำให้กระแสที่สถานะการประจุด้วยกระแสสูงมากกว่าปกติไม่สูงมากเพื่อยืดอายุการใช้งานให้สูงขึ้น การประจุแบบ Dual step charging จะมีประสิทธิภาพสูงมาก

2.10.2 การประจุแบบกระแสคงที่

การประจุแบบกระแสคงที่นั้นเป็นวิธีที่ควรนำมาใช้งานมากที่สุดเพราะเป็นวิธีที่คืนพลังงานให้แบตเตอรี่ได้เร็วโดยไม่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ การประจุแบบกระแสคงที่ที่ทำงานได้ดีกับการต่ออนุกรมกันของเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลกัน

การประจุแบบกระแสคงที่นั้น เป็นการประจุที่ทำการรักษาระดับของกระแสไม่ได้ คำนึงถึงสถานะการประจุ หรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากรูป 2.21 แสดงคุณลักษณะของกราฟแสดง ค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความจุในแบตเตอรี่สูงขึ้น และจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อแบตเตอรี่เข้าสู่สถานะการประจุด้วยกระแสสูงมากกว่าปกติ ดังนั้นในการประจุแบบกระแสคงที่จึงต้องมีการควบคุมการประจุกรณีเกิดการประจุด้วยกระแสสูงมากกว่าปกติ

การเลือกระดับของกระแสประจุนั้น เป็นการตัดสินใจที่สำคัญมาก เพราะว่ามันจะส่งผลไปยังอายุการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะมีขีดจำกัดของกระแสสูงสุดที่ใช้ในการประจุกอยู่ โดยทั่วไปทางผู้ผลิตจะต้องบอกกระแสประจุสูงสุดไว้ เพื่อใช้ในการออกแบบหรือเลือกกระแสประจุ การใช้งานจริงนั้นก็จะมีทั้งแบบกระแสประจุนั้นๆ และแบบกระแสประจุหลายระดับ ในแบบหลายระดับนั้นเริ่มแรกก็จะประจุที่ที่ประจุนั้นๆ สูง หรือประจุนั้นๆ กลางก่อน เมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็มแล้วก็จะทำการเปลี่ยนกระแสประจุเป็นแบบ ประจุนั้นๆ ต่ำจากนั้นก็จะมีวงจรในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 การประจุแบบแท็บ

การประจุแบบแท็บจะนิยมเป็นอย่างมากในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่ใช้งานแบบพกพา เครื่องประจุแบบแท็บจะไม่มีการรักษาแรงดันหรือระดับกระแสแต่จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงแท็บของหม้อแปลงในการเปลี่ยนระดับแรงดันการประจุ ซึ่งวงจรของวันจะต้องมีวงจรเรียงกระแสจากไฟกระแสสลับ เป็นกระแสตรงเมื่อจะประจุก็ทำการเปลี่ยนแท็บ ให้แรงดันที่เครื่องประจุสูงกว่าขั้วแบตเตอรี่ เมื่อประจุไปสักกระยะหนึ่ง ที่ขั้วแบตเตอรี่จะมีแรงดันสูงกว่าเครื่องประจุแล้วก็จะให้เปลี่ยนแท็บจนแรงดันสูงกว่าแบตเตอรี่อีกทีทำแบบนี้ไปจนแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่อยู่ที่แรงดันปกติ

2.11 สถานะการประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

สถานะการประจุของแบตเตอรี่จะแสดงความสามารถในการจุของแบตเตอรี่ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ตดยแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของจุสูงสุดที่มีอยู่ ทำให้เราสามารถทราบได้ว่า พลังงานได้คายประจุออกไปแล้วเท่าใด และใช้ในการเปรียบเทียบพลังงานเมื่อผู้ใช้งานจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ ทำให้รู้ว่าเราสามารถจะใช้แบตเตอรี่ไปได้นานเท่าใดถึงควรที่จะทำการประจุเข้าไปใหม่อีกครั้ง และรู้ว่าควรจุเป็นเวลานานเท่าใดสถานะการประจุของแบตเตอรี่ถึงจะเป็น 100% เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดชนิดอื่นแล้ว สถานการณ์ประจุของแบตเตอรี่ก็เปรียบเสมือนกับแกว้วัดปริมาณน้ำมันในถังเชื้อเพลิงของรถยนต์

2.12 หลักการชาร์จแบตเตอรี่แบบ 3 สถานะ

การชาร์จแบตเตอรี่ที่นิยมใช้กันคือ การชาร์จ 3 สถานะ ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการประจุกลับไปยังแบตเตอรี่ให้เต็มและยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

2.12.1 สถานะชาร์จหนัก (Bulk mode)

เป็นการชาร์จในโหมดกระแสคงตัว ในขณะที่แรงดันไฟของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นโดยแบตเตอรี่จะถูกประจุกลับไปในแบตเตอรี่ถึง 80% ในสถานะนี้

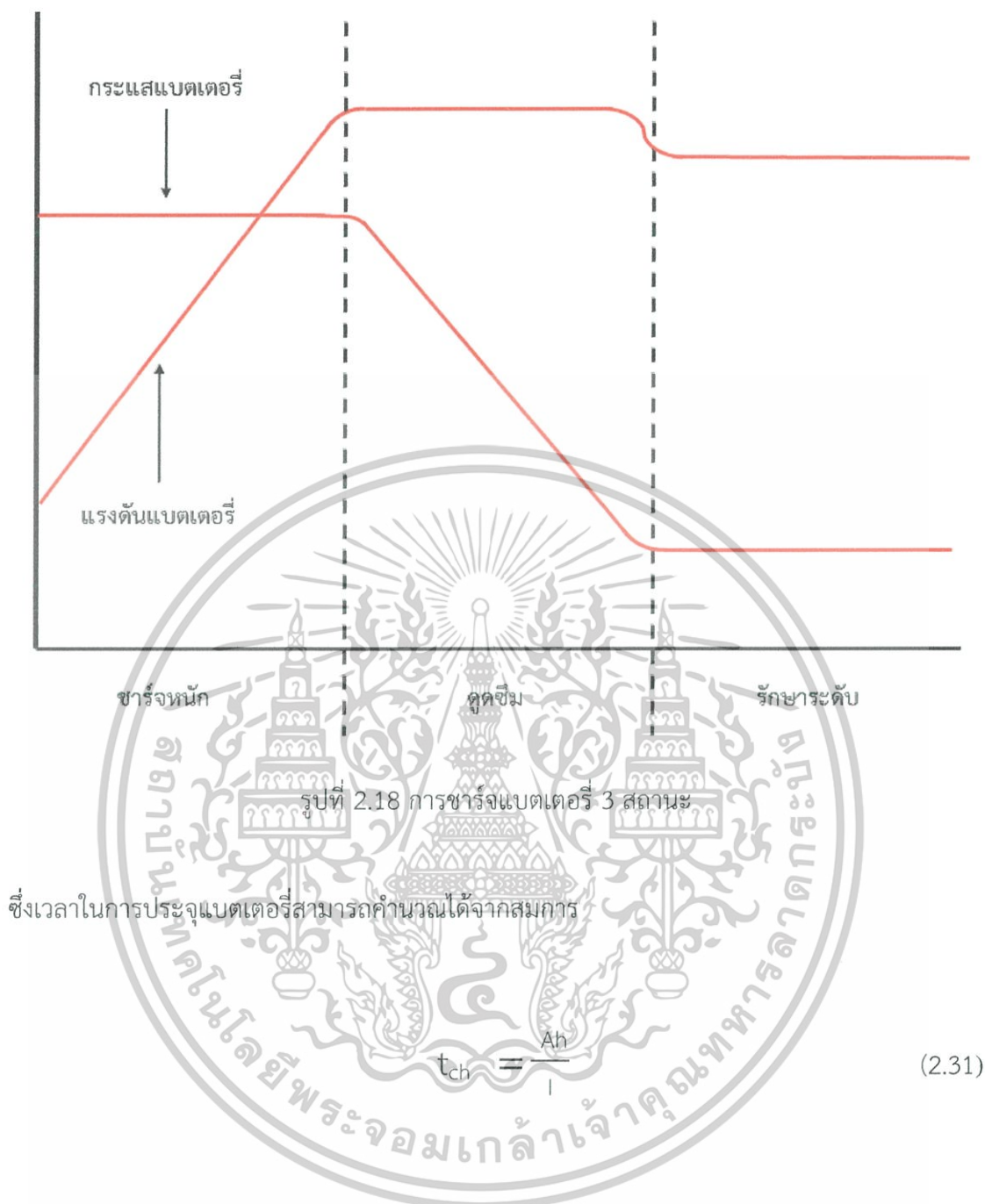
2.12.2 สถานะดูดซึม(Absorption mode)

เป็นการชาร์จอย่างต่อเนื่อง ในสถานะนี้แบตเตอรี่ จะถูกประจุกลับเข้าไปอีก 20% เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่าประมาณ 2.4 โวลต์ต่อเซลล์หรือ 14.6 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าจะรักษาระดับในขณะที่กระแสไฟฟ้าจะถูก ลดลงเรื่อยๆ

2.12.3 รักษาประจุ(Float mode)

เป็นโหมดที่แรงดันไฟฟ้าบนแบตเตอรี่ถูกรักษาระดับที่ประมาณ 2.25 โวลต์ต่อเซลล์ หรือ 13.5 โวลต์ โดยกระแสมีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของความจุในแบตเตอรี่ สำหรับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ โดยจะเริ่มเข้าสู่สถานะนี้เมื่อประจุแบตเตอรี่มีค่าได้ 85 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้าจะถูกรักษาสภาพในแบตเตอรี่ให้การชาร์จสมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยปราศจากการเดือดของอิเล็กโทรไลต์หรือการชาร์จเกิน(Over Charge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ t_{ch} คือ เวลาในการประจุแบตเตอรี่ (hour, h)
 Ah คือ ค่ากระแสชั่วโมงแบตเตอรี่ (Ah)
 I คือ กระแสในการชาร์จ (A)

ตามข้อกำหนดของผู้ผลิตแบตเตอรี่กำหนดให้แรงดันตันกระเพื่อมกระแสสลับ (AC Cripple voltage) ควรมีค่าไม่เกิน 0.5% ของแรงดัน Float voltage กล่าวคือเท่ากับ $2.25 \text{ V} \times 0.5\% = 0.01125$ โวลตต่อเซลล์สำหรับ mono-block 12 V แบตเตอรี่ แรงดัน AC = 0.0675 โวลต

เอกสารต่อเซลล์ที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ขั้นที่ 1 นั้นจะเริ่มจากการหาค่าParameter ของเทอร์โมอิเล็กทริก โดยการเก็บค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ TEG ผลิตได้ที่ผลต่างอุณหภูมิใดๆ สัญญาณทางไฟฟ้าทั้งหมดจะเข้าสู่ Data Logger เพื่อทำการแปลงผลข้อมูลเหล่านั้นแล้วแสดงผลทางโปรแกรม Lab View

ขั้นที่ 2 การคำนวณค่าอุปกรณ์แปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter)

ขั้นที่ 3 Arduino เป็นส่วนของ microcontroller ที่ใช้ควบคุมการ ประจุแบตเตอรี่

ขั้นที่ 4 การสร้างวงจร Boost converter

ขั้นที่ 5 การสร้างระบบประจุแบตเตอรี่

ขั้นที่ 6 ผลการทดลองการประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิควิธีรบกวนและสังเกต

ในการประจุแบตเตอรี่นั้นจะใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบแห้งซึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ขนาดกระแสไฟฟ้า 7 แอมป์ ซึ่งจะทำให้การประจุโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการประจุแบบแม็กซ์ิมัมพาวเวอร์พอยท์แทร็คกิ้ง (MAXIMUM POWER POIN TRACKING) โดยใช้เทคนิควิธีรบกวนและสังเกต (PERTURB AND OBSERVE) และ วิธีการกำหนดค่า Duty Cycle ในขั้นตอนการประจุนี้จะใช้บอร์ดArduino R3 ในการควบคุมระบบการประจุแบตเตอรี่ด้วย

3.2 การหาค่าParameter ของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.2.1.1 Thermoelectric Generator รุ่น TEHP1-12456-1.2

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45 คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ถูกประกอบขึ้นจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีที่ถูกนำมาเรียงต่อกัน และแต่ละด้านมีเซรามิกทำหน้าที่เป็นฉนวน ประกอบอยู่ทั้งสองด้าน เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดได้เมื่อมีผลต่าง ของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ลักษณะจำเพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

TEHP1-12456-1.2 Size: 56 mm x 56 mm	
อุณหภูมิด้านร้อน (°C)	300
อุณหภูมิด้านเย็น (°C)	30
แรงดันขณะปิดวงจร (volts)	14.4
ความต้านทานขาออกที่เหมาะสม (ohms)	2.4
ศักย์ไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (volts)	7.2
กระแสไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (amperes)	3.0
กำลังไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (watts)	21.6
ความร้อนที่ไหลผ่านโมดูล (watts)	365
ฮีทฟลักซ์ (watts/cm ²)	13.2



รูปที่ 3.1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEHP1-12456-1.2

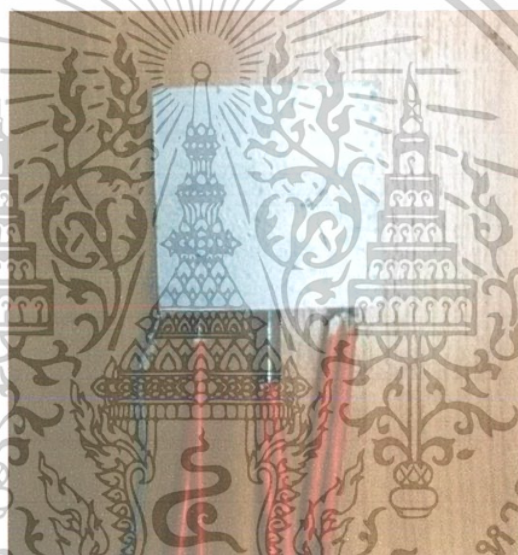
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 Heater

ฮีตเตอร์แผ่น (Heater) มีลักษณะเป็นแท่ง เหมาะสำหรับใช้ให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก อลูมิเนียม หรือโลหะต่างๆ ลักษณะการใช้งานทั่วไปของฮีตเตอร์แท่งคือ ใส่ไว้ช่องที่ถูกเจาะไว้ในวัตถุ ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากฮีตเตอร์ไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของฮีตเตอร์

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)	6.0
ความยาวของท่อฮีตเตอร์ (mm)	50
แรงดัน (V)	220
กำลังวัตต์ (W)	200

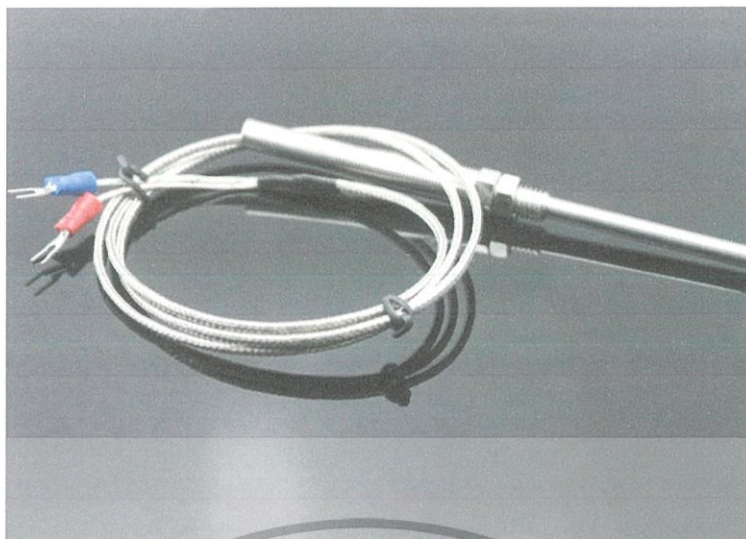


รูปที่ 3.2 ฮีตเตอร์

3.2.1.3 Thermocouple ชนิด type K

เทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -250 ถึง 1300 °C มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง (ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นหรือมีค่าความชันใกล้ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K

3.2.1.4 Heat sink

ฮีทซิงค์(Heat Sink) เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนออกจากตัวอุปกรณ์โดยอาศัยหลักของการถ่ายเทความร้อน โดยมากทำมาจากวัสดุประเภทโลหะ ประสิทธิภาพของฮีทซิงค์จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) พื้นที่ผิวสัมผัส การออกแบบรูปร่าง และจำนวนครีระบายความร้อนที่เหมาะสม

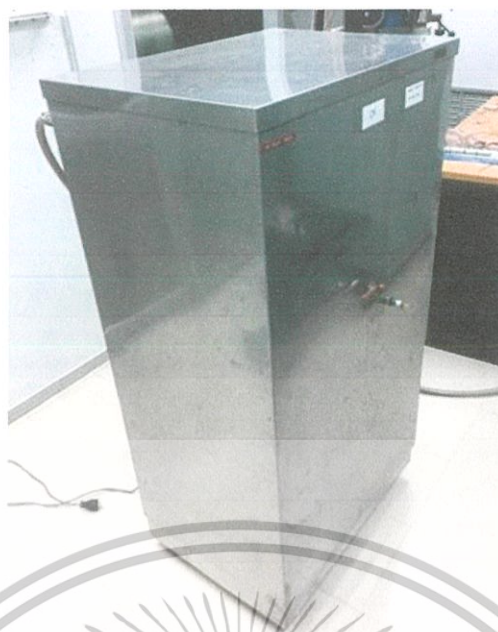


รูปที่ 3.4 ฮีทซิงค์

3.2.1.5 Chiller

Chiller คือ เครื่องทำความเย็นมีหน้าที่ในการผลิตน้ำเย็น หรือปรับอุณหภูมิ น้ำเย็นมีปั๊มปรับเย็นได้ 7 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 chiller

3.2.1.6 Pump

ปั๊ม เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยส่งผ่านพลังงานจากแหล่งต้นกำเนิดไปยังของเหลว เพื่อให้ของเหลวเคลื่อนที่จากเครื่อง Chiller ไปยังฮีตซิงค์

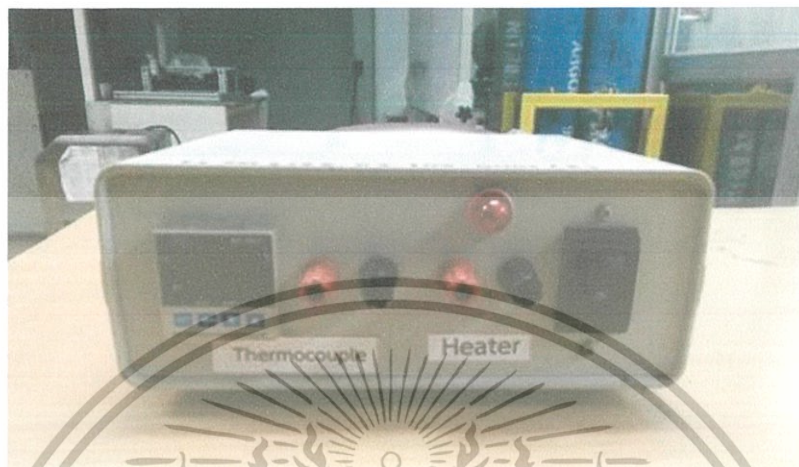


รูปที่ 3.6 Pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.7 Temperature control

เครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ต่อเข้ากับเทอร์โมคัปเปิลและฮีตเตอร์ สามารถใช้วัดอุณหภูมิของวัตถุที่สัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิล และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ ทำให้ฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามที่คุณต้องการ



รูปที่ 3.7 Temperature control

3.2.2 ขั้นตอนการประกอบชุดการทดลอง

- 1) ต่อเครื่องทำความเย็นเข้ากับปั๊ม จากนั้นต่อทางเข้าและ ทางออกของน้ำที่ฮีตซิงค์เข้ากับเครื่องทำความเย็น
- 2) ต่อเทอร์โมคัปเปิลของฮีตซิงค์ทั้งด้านบนและด้านล่างเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล NI9211
- 3) นำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล มาวางบริเวณตรงกลางของฮีตซิงค์
- 4) นำระบบทำความร้อนมาวางบนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 5) ต่อฮีตเตอร์และเทอร์โมคัปเปิลของระบบทำความร้อนเข้ากับเครื่องกำเนิดความร้อน

3.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เติมน้ำลงในเครื่องทำความเย็นจนเต็ม จากนั้นเสียบปลั๊กให้เครื่องทำความเย็นทำงานรอจนน้ำเย็นลง
- 2) เมื่อน้ำในเครื่องทำความเย็นเย็นแล้ว ทำการเปิดปั๊มเพื่อให้น้ำไหลผ่านท่อทองแดง
- 3) เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ จากนั้นทำการจ่ายความร้อนให้กับฮีตเตอร์ตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้
- 4) ทำการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 โดยโปรแกรม LABVIEW เป็นตัวเก็บข้อมูล รอจนระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล
- 5) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ยุติการบันทึกข้อมูลแล้วนำข้อมูล

นั้นมาพล็อตกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) นำข้อมูลหาได้จากกราฟ กำหนดเป็นค่า Boundary condition ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริก เจเนอเรเตอร์

ในการทดลองจะศึกษาการทำงาน คุณสมบัติ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ เมื่อผลต่างของอุณหภูมิใดๆ โดยทำการวัดค่า อุณหภูมิทางด้านร้อน ควบคุมโดย temperature controller ที่ 100 องศาเซลเซียส ที่ 150 องศาเซลเซียส ที่ 200 องศาเซลเซียส ที่ 250 องศาเซลเซียส และ 280 องศาเซลเซียส และถูกต่อเข้ากับ TEG อีกด้านหนึ่งของ TEG จะถูกต่อเข้ากับ Heat sink เพื่อทำงานหล่อเย็นด้วยน้ำจาก chiller ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งจะถูกปั๊มให้ผ่าน Heat sink เพื่อระบายความร้อน น้ำที่ถูกปั๊มผ่าน Heat sink จะถูกวนกลับมาที่ chiller เพื่อทำการลดอุณหภูมิอีกครั้ง ก่อนจะถูกปั๊มออกเพื่อไประบายความร้อนที่ Heat sink อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิขึ้นทั้งสองด้านของ TEG อุณหภูมิทางด้านเย็นจะถูกวัดอุณหภูมิ ด้วย thermocouple(Type K) ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งเข้า Data logger เพื่อทำการแปลงข้อมูล แล้วแสดงผลผ่านโปรแกรม Lab View

3.3 การคำนวณค่าอุปกรณ์แปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter)

3.3.1 การเลือกอุปกรณ์ในวงจรทบระดับ

ในการเลือกอุปกรณ์ในการทำวงจรทบระดับ ควรมีการคำนวณค่าต่างๆของอุปกรณ์ ให้มีขนาด ที่เหมาะสม โดยมีการคำนวณค่าของอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

$$V_{in} = 5 - 9.2V, \quad V_{out} = 13 - 18V, \quad I_{in} = 9.4A, \quad P_{in} = P_{out} = 86.48W$$

$$D_{max} = 1 - \left(\frac{V_{in}(\text{mix})}{V_{out}(\text{max})} \right) = 1 - \left(\frac{5}{18} \right) = 0.722$$

$$D_{max} = 1 - \left(\frac{V_{in}(\text{mix})}{V_{out}(\text{max})} \right) = 1 - \left(\frac{9.2}{13} \right) = 0.292$$

$$T_{on} = DT = (0.722)(0.00002) = 14.44\mu s$$

กระแสสูงสุดของสวิตช์ที่หาได้ (IGBT)

$$I_{pk,sw} \geq \left(\frac{V_{out}}{V_{in}(\text{min})} \times I_{out} \right) + \left(\frac{V_{in}(\text{min})}{2L} \times t_{on} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{pk,D} \geq \left(\frac{V_{out}}{V_{in(min)}} \times I_{out} \right) + \left(\frac{V_{in(min)}}{2L} \times t_{on} \right)$$

$$(3.6 \times 6.5) + \left(\frac{1}{2 \times 10} \times 14.44 \right) \geq 24.66 \text{ A}$$

$$I_F \geq I_{out} \geq 6.65, V_{rrm} \geq V_{out} \geq 18 \text{ V}$$

ค่าตัวเก็บประจุสูงสุดหาได้จาก (Output Capacitor : C)

$$C \geq \left(\frac{I_{out(max)} \cdot D_{max}}{f \cdot V_{out}} \right)$$

$$\geq \frac{6.65 \times 0.722}{50,000 \times 0.05}$$

$$\geq 1,920.52 \text{ uF}$$

$$ESR \leq \frac{V_{out} \cdot 0.05}{I_{pk}} \leq \frac{0.05}{24.66} \leq 0.202 \text{ m}$$

3.4 Arduino

ในขั้นตอนแรกของการเขียนโปรแกรมเราต้องทำการประกาศตัวแปรซึ่งก็คือการจองเนื้อที่ในหน่วยความจำสำหรับเก็บค่าต่างๆ พร้อมทั้งกำหนดชื่อเรียกแทนหน่วยความจำ เพื่อให้สะดวกต่อการเข้าถึงค่าที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำ

โปรแกรมของ Arduino จะแบ่งได้ 2 ส่วน คือ void setup() กับ void loop() โดย void setup() เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงาน จะทำคำสั่งของฟังก์ชันนี้ครั้งเดียว จะใช้ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของการทำงาน ส่วน void loop() จะเป็นส่วนของการทำงาน โดยโปรแกรมจะทำคำสั่งในฟังก์ชันนี้ต่อเนื่องตลอดเวลา ใน void loop() เราจะเขียนโปรแกรมในการทำงานเป็น 3 ส่วน คือ sensor, RUN , MPPT

1. ในส่วนของ RUN จะเป็นส่วนของการแสดงค่าว่า ค่า V_{in} , V_{out} , I_{in} , I_{out} อยู่ใน STATE ไດ ซึ่ง STATE แต่ละ STATE จะมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆเพื่อนำไปสู่การทำงานของส่วน MPPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MPPT_ONLY_20.2.17
#include<TimerOne.h>

#define PWM 9
#define Voltage_sensor_TEG 0
#define Voltage_sensor_Batt 1
#define Current_sensor_TEG 2
#define Current_sensor_Batt 3

float SEN_vin, SEN_vout;|
float SEN_Iin = 0, SEN_Iout = 0, Power_IN = 0;
float Power_IN_log1, SEN_vin_log1, DT_POWER, DT_Volt;
unsigned int DUTY = 0 ;
enum state {off, Start_1, Bulk, limited_voltage} STATE;

void setup()
{
  Timer1.initialize(20);
  pinMode(PWM, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

```

2. ส่วนของ MPPT จะทำการอ่านระบบว่าอยู่ใน STATE ไต จากนั้นระบบจะทำตามเงื่อนไขในแต่ละ case ซึ่งแต่ละcaseนั้นจะทำการปรับduty cycle เพื่อทำให้เกิดกระบวนการของMaximum Power Point Tracking

```

MPPT_ONLY_20.2.17
void loop()
{
  SENSOR();
  delayMicroseconds(10);
  RUN();
  delayMicroseconds(10);
  MPPT();
  delayMicroseconds(10);
}

void RUN ()
{
  if (SEN_vin <= 4)
  {
    STATE = off;
  }
  else if (SEN_vin > 4)
  {
    if (SEN_Iout < 0.05 && SEN_vout <= 14.5)
    {
      STATE = Start_1;
    }
    else if (SEN_Iout >= 0.05 && SEN_vout <= 14.5 )
    {
      STATE = Bulk;
    }
    else if (SEN_Iout >= 0.05 && SEN_vout > 14.5 )
    {
      STATE = limited_voltage;
    }
  }
}

```

3. และส่วนของsensor ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการอ่านค่า V_{in} , V_{out} , I_{in} , I_{out} จาก sensor เข้าโปรแกรม เพื่อทำการคำนวณและแสดงค่า power และ ค่าduty cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void MPPT()
{
  switch (STATE)
  {
    case off:
      DUTY = 0;
      Timer1.pwm(PWM, DUTY);
      break;

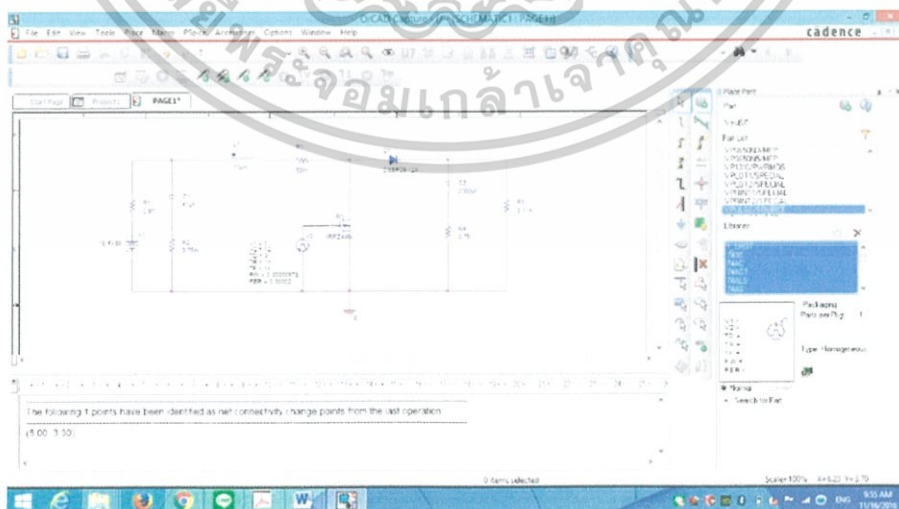
    case Start_1:
      Power_IN_log1 = 0;
      DUTY = 300;
      Timer1.pwm(PWM, DUTY);
      break;

    case Bulk:
      if (DT_POWER > 0)
      {
        if (DT_Volt > 0)
        {
          DUTY = DUTY + 25;
          if (DUTY > 1020)
          {
            DUTY = DUTY + 25;
            if (DUTY > 1020) {
              DUTY = 1020;
            }
            Timer1.pwm(PWM, DUTY);
            break;
          }
        }
        else if (DT_Volt < 0)
        {
          DUTY = DUTY - 25;
          if (DUTY < 0) {
            DUTY = 0;
          }
          Timer1.pwm(PWM, DUTY);
        }
      }
      else if (DT_POWER < 0)
      {
        if (DT_Volt > 0)
        {
          DUTY = DUTY - 25;
          if (DUTY < 0) {
            DUTY = 0;
          }
          Timer1.pwm(PWM, DUTY);
        }
        else if (DT_Volt < 0)
        {
          DUTY = DUTY + 25;
          if (DUTY > 1020)
          {
            DUTY = 1020;
          }
          Timer1.pwm(PWM, DUTY);
          break;
        }
      }
    }
  }
}

```

3.5 การสร้างวงจร Boost converter

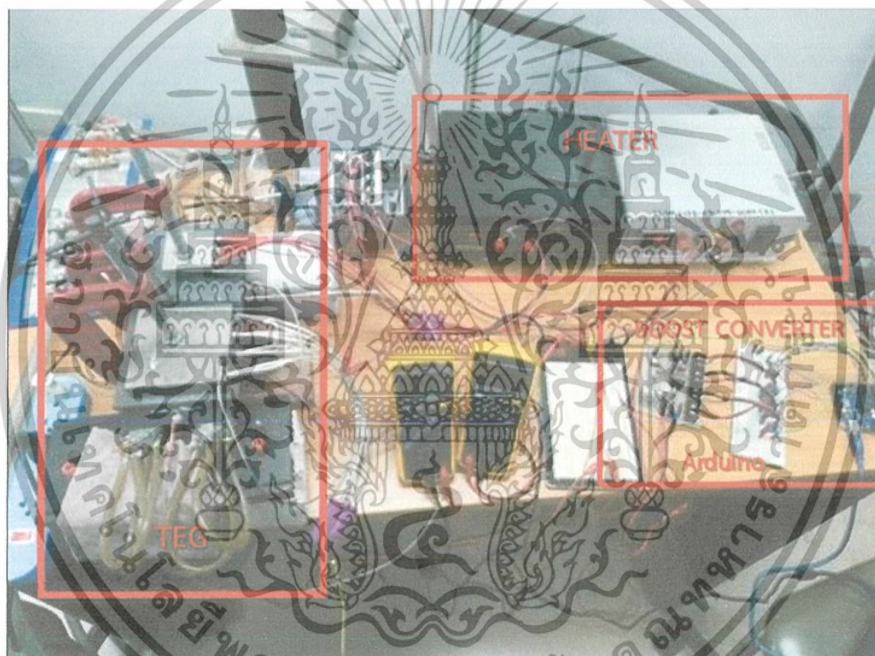
สร้างวงจร Boost Converter ด้วยโปรแกรม ORCAD แล้วทำการ simulation เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวงจร โปรแกรม ORCAD จะช่วยลดความผิดพลาดและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในการทำวงจร เพราะใช้โปรแกรมในการทดสอบระบบเบื้องต้นก่อนการประกอบวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.8 สร้างวงจร Boost Converter ด้วยโปรแกรม ORCAD
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การสร้างระบบประจุแบตเตอรี่

ขั้นตอนการประจุแบตเตอรี่จะใช้วิธีการประจุแบบเตอรี่แบบในงานวิจัยเล่มนี้จะใช้วิธีการประจุแบบแรงดันคงที่ซึ่งการประจุแบบแรงดันคงที่ มีอยู่ 2 แบบคือ Fast charge จะประจุที่แรงดันสูง กระแสที่ประจุจึงสูงตามเวลาที่ใช้ประจุจะเร็ว แต่ว่า ก็เสี่ยงต่อความเสียหายในเซลล์แบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานน้อยลง อีกแบบหนึ่งก็คือการประจุแบบ Float คือการประจุที่แรงดันสูงกว่าแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่เล็กน้อย กระแสประจุจึงไม่สูงแต่ก็ใช้เวลาประจุก่อนข้างนาน จะเห็นได้ว่ามีข้อดีข้อเสียต่างกันดังนั้นจึงมีการประยุกต์ให้การประจุแบบแรงดัน คงที่นี้ให้เป็นแบบ Dual step charging คือเริ่มแรกจะประจุแบบเร็วไปก่อนเพื่อแก้ไขจุดอ่อนในเรื่องเวลาในการประจุเมื่อเวลาผ่านไปสถานการณ์ประจุเริ่มสูงขึ้นก็ให้เปลี่ยนระดับแรงดันเป็นแบบ Float เพื่อทำให้กระแสที่สถานการณ์ประจุด้วยกระแสสูงมากกว่าปกติไม่สูงมากเพื่อยืดอายุการใช้งานให้สูงขึ้น การประจุแบบ Dual step charging จะมีประสิทธิภาพสูงมาก โดยขั้นตอนการทดลองเป็นดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลโดยเนื้อหาจะออกเป็นสามส่วนดังนี้
ส่วนที่ 1 ผลของการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

ส่วนที่ 2 ผลของการ step up แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ โดยวงจรกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter) ซึ่งควบคุมโดย บอร์ด Arduino

ส่วนที่ 3 ผลการการประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ลงแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 12 โวลต์

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

4.1.1 สัมประสิทธิ์ซีเบคของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

ในการทดลองนี้จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิทางด้านร้อนและด้านเย็น เมื่อเกิดผลต่างของอุณหภูมิจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นโดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าดังกล่าว เรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด เมื่อวัดค่าของผลต่างระหว่างอุณหภูมิและแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิดที่เกิดขึ้นและนำมาเขียนกราฟจะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคได้ดังสมการ

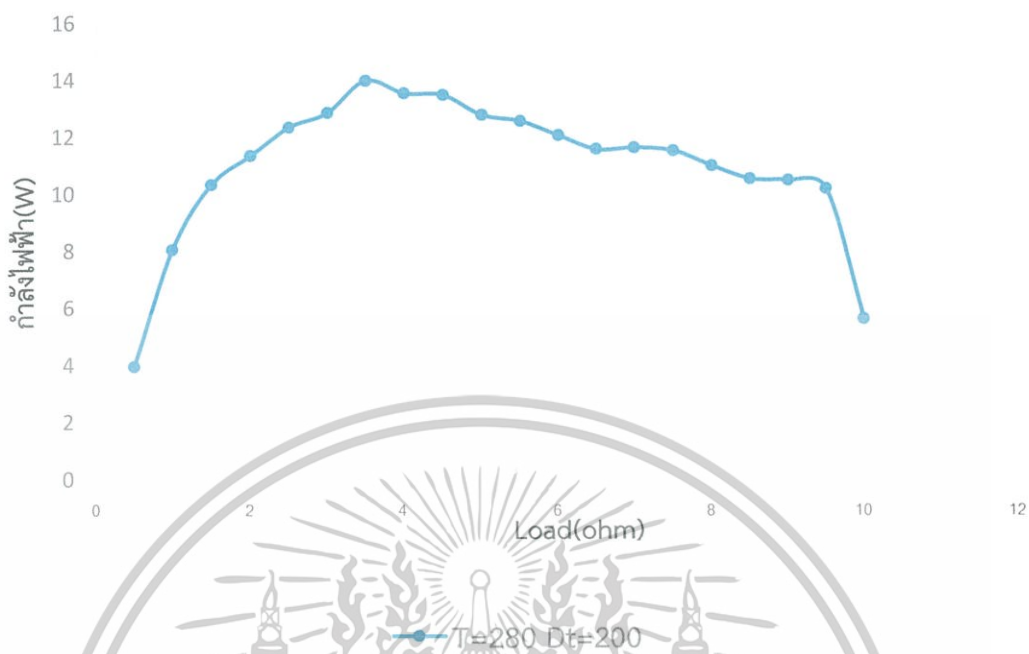
$$ZT = \frac{S^2}{\rho k} \cdot T$$

4.1.2 ค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

การทดลองนี้กำหนดให้อุณหภูมิทางฝั่งด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงชันตั้งแต่ 100-280°C ทำการต่อแอมมิเตอร์แบบอนุกรมเข้ากับเทอร์โมอิเล็กทริก แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวต้านทานภายนอกปรับค่าได้ ขนาด 0 – 10 โอห์ม วัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานและกระแส จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) กับค่าความต้านทานภายนอก(R) ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(W)กับโหลด(ohm)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(Power) และ ความต้านทานภายนอก (R)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อโดยที่ค่านี้มีขนาดใกล้เคียงกับค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งมีค่าประมาณ 2.4 -3.5 โอห์ม

4.2 ผลของการ step up แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ โดย วงจรกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter)

ในงานวิจัยนี้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ใช้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่าแรงดันที่แบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีแรงดันถึง 12 โวลต์ แต่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 4-9 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ประจุสามารถเคลื่อนที่ไปยังแบตเตอรี่ได้ แรงดันของแหล่งจ่ายต้องสูงกว่าแรงดันของแหล่งเก็บประจุ ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรแปลงผันตรงแบบทบระดับ (Boost Converter) เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงมากพอให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ ในขั้นตอนนี้เราจะใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จำนวน 4 ตัวทำการต่ออนุกรมกัน 2 ตัว แล้วต่อขนานกันอีก 2 ตัว แสดงผลได้ดังตารางที่ ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนเข้า(input) และหลังจากออกจากวงจร Boost Converter (output) ที่ผลต่างอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และ 200 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังเข้าวงจร Boost Converter
ที่ผลต่างอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

เวลา(S)	Th (°C)	Tc(°C)	$\Delta T(°C)$	แรงดันไฟฟ้า ก่อนเข้าBoost Converter(V)	แรงดันไฟฟ้าที่ออก จากBoost Converter(V)
5	212.7644	62.82	149.9444	5.5906	11.1812
10	212.8035	62.8352	149.9683	5.6163	11.2326
15	212.8108	62.834	149.9768	5.7243	11.4486
20	212.8376	62.8154	150.0222	5.8631	11.7262
25	212.826	62.8097	150.0163	6.1407	12.2814
30	212.8181	62.7763	150.0418	6.1099	12.2198
35	212.8355	62.7509	150.0846	6.3155	12.631
40	212.8553	62.7507	150.1046	6.408	12.816
45	212.8641	62.739	150.1251	6.5057	13.0114
50	212.8742	62.741	150.1332	6.4594	12.9188
55	212.8934	62.7237	150.1697	6.4697	12.9394
60	212.8989	62.7051	150.1938	6.4132	12.8264
65	212.9182	62.743	150.1752	6.4029	12.8058
70	212.9328	62.815	150.1178	6.3669	12.7338
75	212.9237	62.8085	150.1152	6.4132	12.8264
80	212.9621	62.8809	150.0812	6.3412	12.6824
85	212.9807	62.9053	150.0754	6.3669	12.7338
90	212.9859	62.9172	150.0687	6.3412	12.6824
95	213.0052	62.9808	150.0244	6.3875	12.775
100	213.0127	63.0074	150.0053	6.3772	12.7544
105	213.0554	62.978	150.0774	6.3875	12.775
110	213.0457	62.9768	150.0689	6.3361	12.6722
115	213.0375	62.9767	150.0608	6.3772	12.7544
120	213.053	62.9825	150.0705	6.3978	12.7956

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

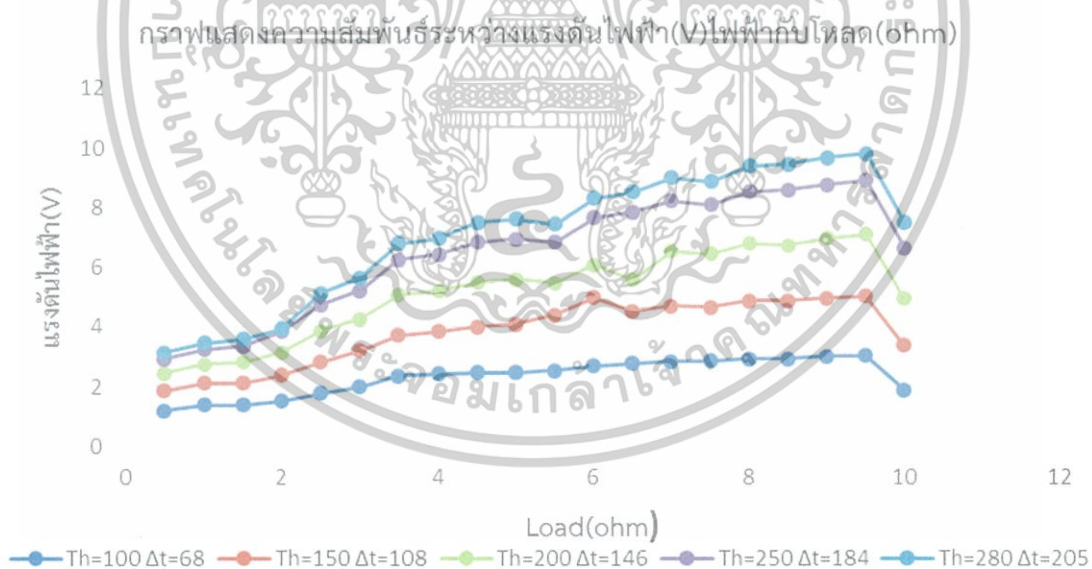
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังเข้าวงจร Boost Converter
ที่ผลต่างอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

เวลา(S)	Th (-C)	Tc(-C)	$\Delta T(-C)$	แรงดันไฟฟ้าก่อน เข้าBoost Converter(V)	แรงดันไฟฟ้าที่ ออกมาจากBoost Converter(V)
5	278.451	76.5093	201.9423	6.0996	13.0628
10	278.478	76.5823	201.8963	6.115	12.7852
15	278.501	76.6038	201.898	6.1767	12.744
20	278.478	76.6069	201.8716	6.1767	12.9806
25	278.493	76.5824	201.9107	6.1201	13.4226
30	278.482	76.5873	201.8955	6.1715	13.0218
35	278.502	76.58	201.9223	6.3052	12.847
40	278.515	76.544	201.971	6.2435	12.8778
45	278.520	76.5374	201.9834	6.2281	13.3302
50	278.496	76.5624	201.9341	6.2075	13.2788
55	278.520	76.5693	201.9509	6.5263	12.96
60	278.524	76.5703	201.9546	6.3463	12.8984
65	278.528	76.6095	201.9191	6.2744	13.217
70	278.527	76.6558	201.8712	6.2898	13.6798
75	278.508	76.6714	201.8366	6.4389	13.145
80	278.507	76.6513	201.8563	6.5468	12.9702
85	278.495	76.669	201.8264	6.3978	12.96
90	278.484	76.6722	201.812	6.3309	13.3404
95	278.457	76.6931	201.7646	6.3926	13.3508
100	278.455	76.7044	201.7513	6.6548	12.9908
105	278.436	76.7348	201.7016	6.4389	12.9394
110	278.424	76.7444	201.6803	6.3515	13.1656
115	278.404	76.7035	201.704	6.3309	13.4742
120	278.425	76.7657	6.552	6.552	13.1348

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการแสดงผลการ step up ของแรงดันไฟฟ้าเมื่อผ่านวงจรแปรผันกระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter) ที่ผลต่างอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และ 200 องศาเซลเซียส โดยผลการ step up แรงดันไฟฟ้า ที่ 150 องศาเซลเซียส จะมีอุณหภูมิด้านร้อน อยู่ที่ประมาณ 213 องศาเซลเซียส และด้านเย็นมีอุณหภูมิประมาณ 63 องศาเซลเซียส ที่ 200 องศาเซลเซียส จะมีอุณหภูมิด้านร้อน อยู่ที่ประมาณ 278 องศาเซลเซียส และด้านเย็นมีอุณหภูมิประมาณ 76 องศาเซลเซียส จากผลการ Step up โดยวงจร Boost Converter ได้ว่า ที่ผลต่างอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้าที่ TEG ผลิตได้ ก่อนเข้า วงจร Boost Converter มีค่าประมาณ 6.3 V เมื่อผ่าน วงจร Boost Converter ทำให้แรงมีขนาดเพิ่มขึ้น เป็น 12.5 V และ ที่ผลต่างอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้าที่ TEG ผลิตได้ ก่อนเข้า วงจร Boost Converter มีค่าประมาณ 6.5 V เมื่อผ่าน วงจร Boost Converter ทำให้แรงมีขนาดเพิ่มขึ้น เป็น 13.4 V จากการทดลองจึงกล่าวได้ว่า ผลการ Step up โดยวงจร Boost Converter ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีขนาดมากพอ ที่จะประจุลงแบตเตอรี่ ขนาด 12 V

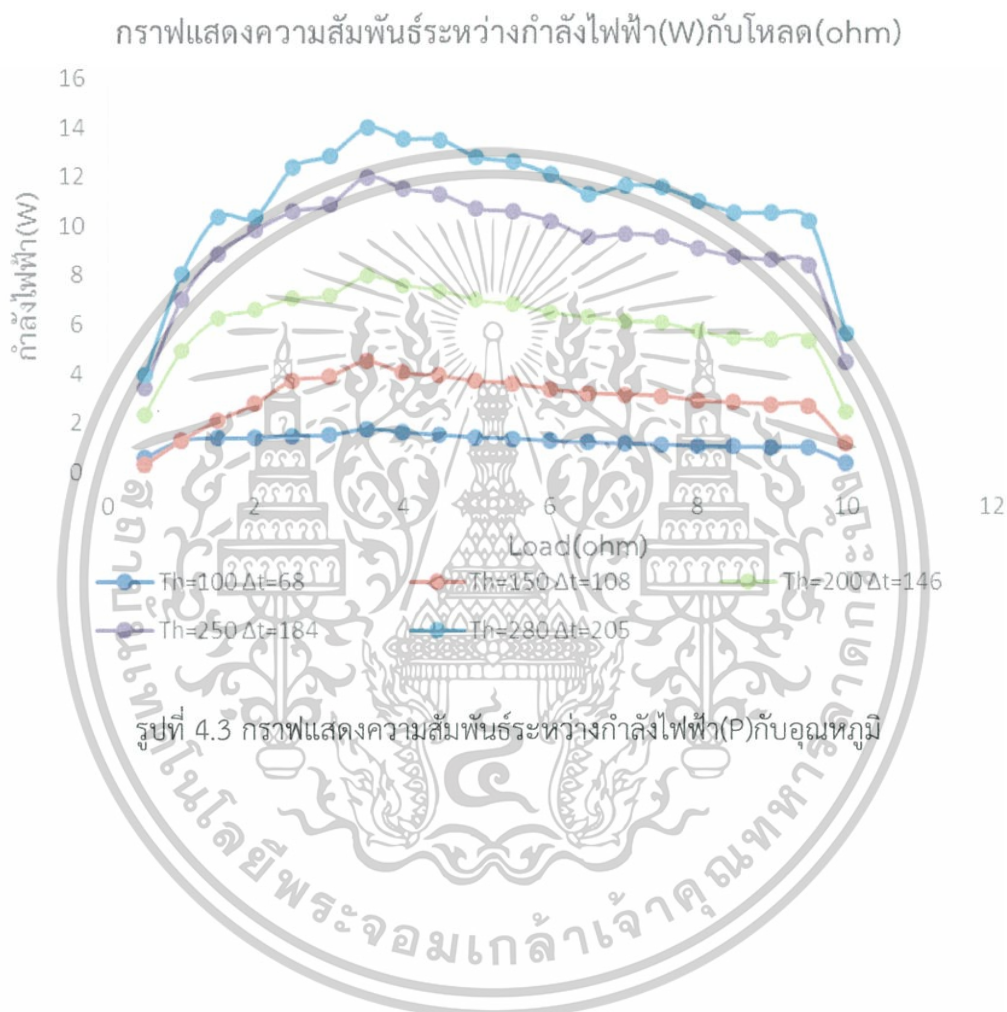
นอกจากนี้ยังพบว่า ความต้านทานภายนอกมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ TEG สามารถผลิตได้ โดย TEG จะสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ ก็ต่อเมื่อความต้านทานภายนอก มีค่าเท่ากับความต้านทานภายใน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับ ความต้านทานภายนอก



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V)กับโหลด(ohm)

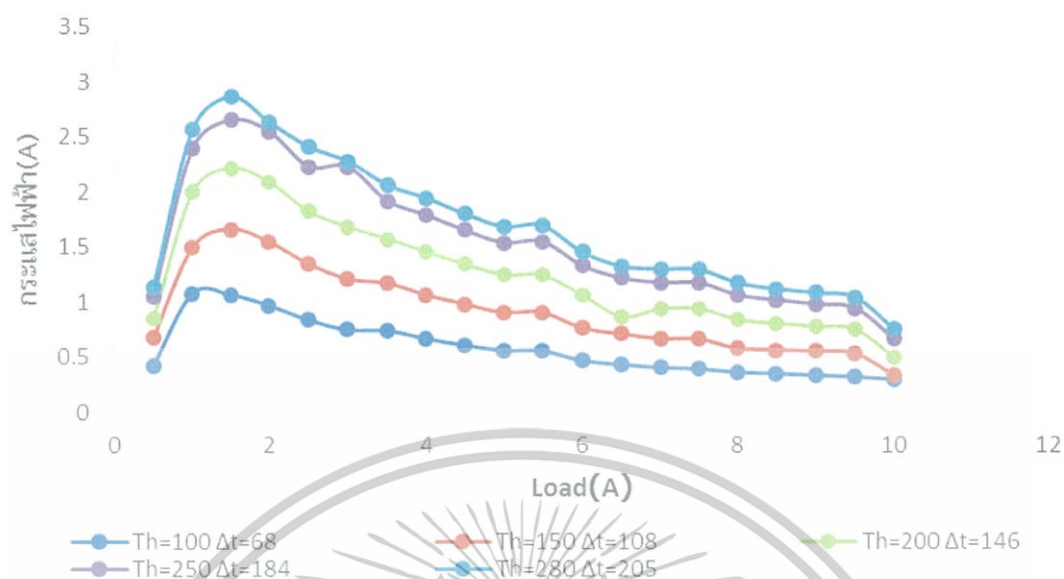
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำการต่ออนุกรมกัน 2 ตัว และต่อขนาดเข้าอีก 2 ตัว จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อโดยที่ค่านั้นมีขนาดใกล้เคียงกับค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งมีค่าประมาณ 9.6 โอห์ม นอกจากนี้ผลต่างของอุณหภูมิยังมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงด้วย ดังรูปที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า(A)กับโหลด(ohm)

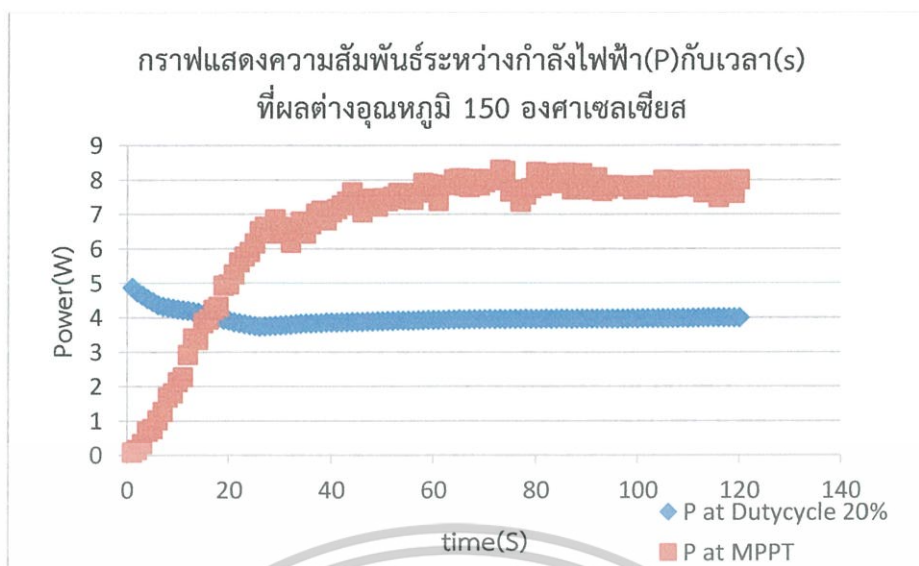


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส(A)กับโหลด(ohm)

4.3 ผลการประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ลงแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 12 โวลต์

ในขั้นตอนการประจุกระแสไฟฟ้าลงแบตเตอรี่ เราจะทำการเปรียบเทียบการประจุโดยใช้ 2 วิธีการ คือวิธีการชาร์จแบบกำหนดค่า Duty cycle 20 % และการประจุโดยวิธีการ MAXIMUM POWER POIN TRACKING (MPPT) ทั้งนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประจุ โดยจะทำการประจุที่ผลต่างของอุณหภูมิ 150 °C และ 200 °C และทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เวลาใดๆ แสดงผลการประจุตั้งกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P)กับเวลา(s)ที่ $\Delta T=150$

เราสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของการประจุได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพการขยายแรงดัน} = \frac{\text{กำลังที่ได้จากการประจุ}}{\text{กำลังที่ได้จากวัตต์โดยไม่ผ่านโหลด}} \times 100$$

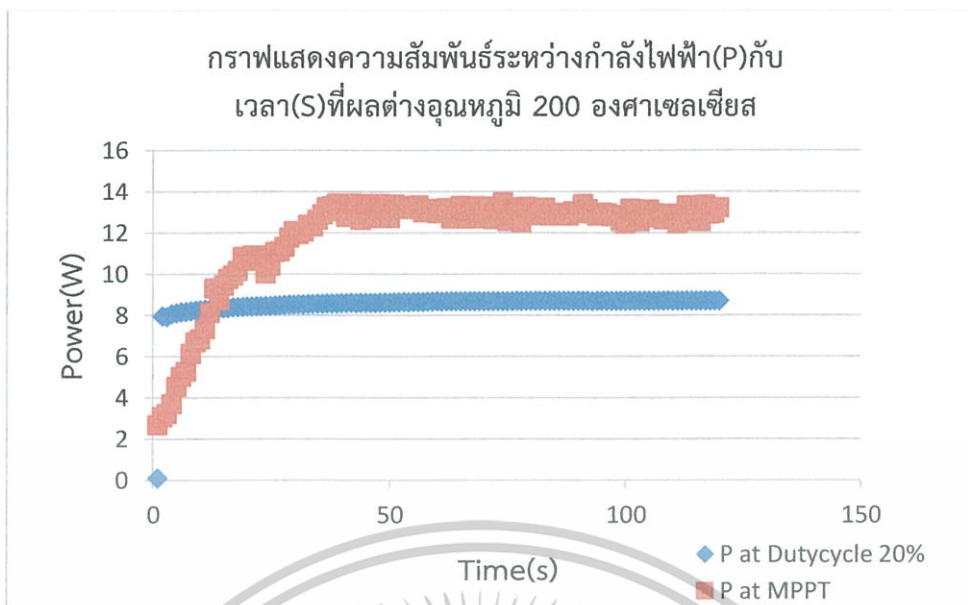
ประสิทธิภาพของการประจุโดยวิธีการMPPT

$$\text{ประสิทธิภาพการขยายแรงดัน} = \frac{6.65}{8.4} \times 100 = 79.16$$

ประสิทธิภาพของการประจุโดยวิธีการกำหนดค่าDuty cycle 20%

$$\text{ประสิทธิภาพการขยายแรงดัน} = \frac{3.98}{8.4} \times 100 = 47.38$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P)กับเวลา(s)ที่ $\Delta T=200$

เราสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของการประจุได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพการขยายแรงดัน} = \frac{\text{กำลังที่ได้จากการประจุ}}{\text{กำลังที่ได้จากวัดโดยไม่ผ่านโหลด}} \times 100$$

ประสิทธิภาพของการประจุโดยวิธีการ MPPT

$$\text{ประสิทธิภาพของการขยายแรงดัน} = \frac{11.82}{13.5} \times 100 = 87.55$$

ประสิทธิภาพของการประจุโดยวิธีการกำหนดค่า Duty cycle 20%

$$\text{ประสิทธิภาพของการขยายแรงดัน} = \frac{8.51}{13.5} \times 100 = 63.03$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และนำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ประจุลงแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ด้วยกระบวนการวิธี MAXIMUM POWER POIN TRACKING (MPPT) เพื่อให้กระบวนการประจุนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นวิธีการประจุที่ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า วิธีการชาร์จตรง และวิธีการชาร์จแบบกำหนดค่า Duty cycle

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า วิธีการประจุด้วยกระบวนการของ MAXIMUM POWER POIN TRACKING (MPPT) จะมี output power ที่มากกว่าการประจุแบบกำหนดค่า Duty cycle จึงกล่าวได้ว่า การประจุด้วยกระบวนการของ MAXIMUM POWER POIN TRACKING (MPPT) มีประสิทธิภาพมากกว่า การประจุแบบกำหนดค่า Duty cycle ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ทั้งนี้ผลลัพธ์ของการทดลอง อาจขึ้นอยู่กับ ชนิดของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ ผลต่างของอุณหภูมิ และวิธีการติดตั้งของอุปกรณ์ ล้วนมีผลต่อผลการทดลองที่เก็บได้ ผลลัพธ์ที่ได้นั้น ผู้วิจัยสามารถค้นคว้าเรียนรู้ หรือพัฒนาวิธีการชาร์จให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควบคุมอุณหภูมิทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ให้อยู่ที่ประมาณ 30°C จะทำให้เทอร์โมอิเล็กทริก ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (นวกัฑรา และ ทวีพล, 2555) [ออนไลน์]
เข้าถึงได้จาก : http://wwwx.dtu.dk/Sites/OTE_POWER/English/Introduction.aspx
- [2] Thermonamic Electronics(Jiangxi) Corp., Ltd. 2016. Thermoelectric. [Online].
Available : <http://www.thermonamic.com/TEC5-127-71-31-17-08-03-English>
- [3] Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique Jensak Eakburanawat a,* , Itsda Boonyaroonate ba Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkru, Bangkok, Thailand Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkru, Bangkok, Thailand Received 8 April 2005; received in revised form 27 May 2005; accepted 4 June 2005 Available online 11 October 2005
- [4] Salkind, T. Atwater, " Dynamic characterization of Small lead – acid cells" Journal of power Sources 96 (2001) 151-159
- [5] M.Durr, A.Crudon, "Dynamic model of a lead-acid battery for use in a domestic fule cell systram" Journal of power Sources 161(2006) 1400-1411
- [6] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (Online), 2553
Available:<http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm> (4 พฤษภาคม 2553).
- [7] Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module C.E. Kinsella a, S.M. O'Shaughnessy a, M.J. Deasy a, M. Duffy b, A.J. Robinson a Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, University of Dublin, Trinity College, Irelandb Power Electronics Research Centre, Electrical and Electronic Engineering, NUI Galway, Ireland.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique

Jensak Eakburanawat^{a,*}, Itsda Boonyaroonate^b

^a *Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkrui, Bangkok, Thailand*

^b *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkrui, Bangkok, Thailand*

Received 8 April 2005; received in revised form 27 May 2005; accepted 4 June 2005
Available online 11 October 2005

Abstract

This article describes a battery charger, which is powered by thermoelectric (TE) power modules. This system uses TE devices that directly convert heat energy to electricity to charge a battery. The characteristics of the TE module were tested at different temperatures. A SEPIC dc–dc converter was applied and controlled by a microcontroller with the maximum power point tracking (MPPT) feature. The proposed system has a maximum charging power of 7.99 W; that is better than direct charging by approximately 15%. The objectives are to study the principle of TE power generation and to design and develop a TE battery charger that uses waste heat or another heat source as the direct input power.

© 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Thermoelectric generator; dc–dc converter; SEPIC; MPPT

* Corresponding author. Tel.: +662 470 9051; fax: +662 470 9033.
E-mail address: Jensak@engineer.com (J. Eakburanawat).

Nomenclature

A	cross-sectional area of thermoelement (mm^2)
D	% duty cycle of gate signal
I_L	load current (A)
E	length of the thermoelement (mm)
L_C	thickness of the contact layer (mm)
M	conversion ratio
N	number of thermoelements per module
n	electrical-contact parameter
P_o	power output (W)
r	thermal-contact parameter
R_{int}	internal resistance of TE generator (Ω)
R_L	load resistance (Ω)
r_i	input resistance at the maximum power point (Ω)
T_c	cold-side temperature of module ($^{\circ}\text{C}$)
T_h	hot-side temperature of module ($^{\circ}\text{C}$)
V_i	input voltage of converter (V)
V_o	output voltage of converter (V)
v_i	input voltage at the maximum power point (V)
V_{oc}	open-circuit voltage of TE generator (V)
<i>Greek symbols</i>	
α	thermoelectric material Seebeck coefficient (V/K)
ΔT	temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)
λ	thermal conductivity of thermoelement
λ_c	thermal conductivity of contact layer
ρ	electrical resistivity
ρ_c	contact resistivity between thermoelements and copper contacts
σ	material electric conductivity ($\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)
<i>Abbreviation</i>	
CCM	continuous-current mode
MPPT	maximum power point tracking
SEPIC	single-ended primary inductance converter
PWM	pulse width modulation

1. Introduction

Currently in Thailand, the electrical-power demand is increasing which prompts the government to build new power plants. Electrical energy is important for modern day living. However, some areas in Thailand do not have electricity and the residents desire some of the advantages and conveniences that electricity provides. Nowadays, the electrical power in remote areas is generated primarily by gasoline motor-generators. But, most people believe these generators are too noisy, require too much maintenance, and have high fuel costs [6].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Renewable energy, such as solar energy, wind energy or hydropower is preferred, but it has limited use and is dependent on weather and topography. Thermoelectrics can convert heat energy to electrical power directly. Thermoelectric power generation has the advantages of being maintenance free, silent in operation and involving no moving or complex parts.

In the past years, much work has been reported on the TE power generator. Killander [1] developed a stove-top generator using two TE power modules, model HZ-20. During the operating time, the output of the generator was about 10 W and supplied the battery with a net input from 1 to 5 W. Rahman [2] developed the thermoelectric generator to supply portable electronic equipment or to charge a lap-top computer battery. The generator is powered from butane gas; it has a potential power output of about 13.5 W. Roth et al. [3] developed and tested a photovoltaic/thermoelectric hybrid system as a power supply for a mobile telephone repeater. The developed system supplies enough for 50 W permanent loads. All of the above research uses the converter to boost-up the output voltage to charge the battery but do not use the maximum power point tracking control in the system.

2. Thermoelectric power generator

2.1. Theory of thermoelectric power generator

The TE effect was first discovered in 1822 by Seebeck, who observed an electric flow when one junction of two dissimilar metals, jointed at two places, was heated while the other junction was kept at a lower temperature [4]. A typical multicouple thermoelectric power module is shown schematically in Fig. 1: n-type and p-type semiconductor thermoelements are connected in series by highly-conducting metal strips to form a thermocouple. Based upon an improved theoretical model which takes into account the thermal and electrical contact resistance, the output voltage V_O , current I_O and power P_O when the module is operated with a matched load, are given by [5]:

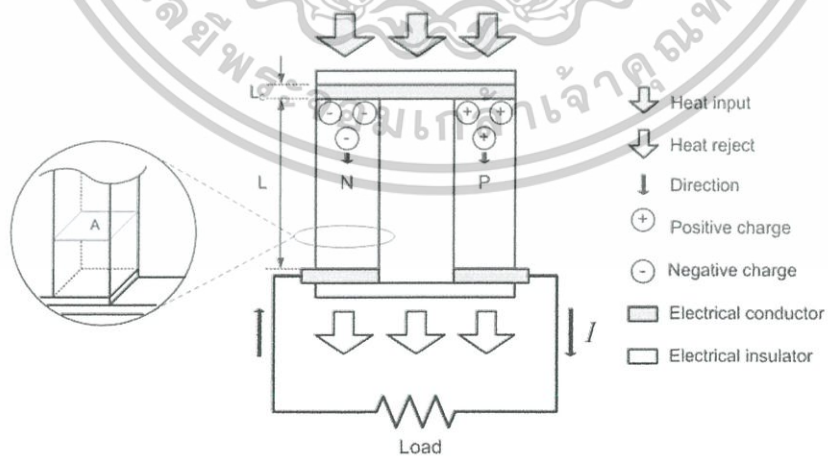


Fig. 1. Schematic of a single thermoelectric-couple.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_O = \frac{\alpha N(T_h - T_c)}{1 + 2rL_C/L}, \quad (1)$$

$$I_O = \frac{\alpha A(T_h - T_c)}{2\rho(L + n)(1 + 2rL_C/L)}, \quad (2)$$

$$P_O = \frac{\alpha^2}{2\rho} \cdot \frac{NA}{(L + n)(1 + 2rL_C/L)^2} \cdot (T_h - T_c)^2, \quad (3)$$

where $n = 2\rho_C/\rho$, $r = \lambda/\lambda_C$, α is the TE material Seebeck coefficient (V/K), ρ is electrical resistivity (Ω cm), ρ_C is electrical contact resistivity, N is the number of the thermoelement in the module, A is the cross-sectional area of the thermoelements (mm^2), L is the length of the thermoelement (mm), L_C is the thickness of the contact layer (mm), T_h is the temperature at the hot side, T_c is the temperature at the cold side, λ is the thermal conductivity of the thermoelement and λ_C is the thermal conductivity of the contact layer.

2.2. Thermoelectric module characteristics

TE power modules from Taihuaxing Co. Ltd. are used in the experiment. The specifications of the module are as follows.

- Part number TEPI-1264-1.5.
- Size: 40 mm × 40 mm.
- Open circuit voltage: 8.6 V.
- Internal resistance: 3 Ω .
- Match load output-voltage: 4.2 V.
- Match load output-current: 1.4 A.
- Match load output-power: 5.9 W.
- Heat flux across the module: about 140 W.
- Heat flux density: about 8.8 W/cm².

2.3. Finding the electrical characteristics of TEPI-1264-1.5

In this research, we designed and built the TE power generator (see Fig. 2). The electric heater is used as a heat source to supply heat energy to the hot side of TE modules. A heat sink was mounted on the cold side of the TE modules to maintain a constant temperature. The electrical characteristics of TEPI-1264-1.5 were tested by setting the hot-side temperature at 100, 125, 150, or 175 °C, and maintaining the cold-side temperature at 40 °C. A rheostat was connected to the thermoelectric modules as a load, and the resistance set at 1, 2, 3, ..., or 10 Ω and the voltage and the current measured in each step. The voltage, current and power which 1 TE module can produce for each degree of temperature is shown in Figs. 3–5.

The variation of the output V – I characteristics of a TE module as a function of temperature differential (ΔT) between the hot side and cold side of the TE module is shown in Fig. 6. The ΔT changes affect mainly the TE output power.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

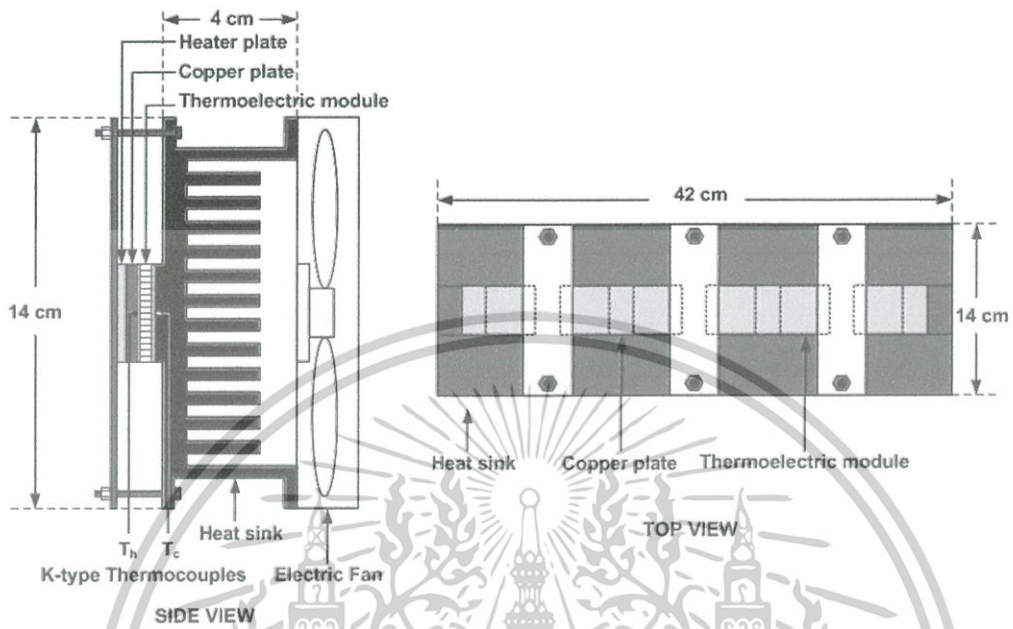


Fig. 2. The detail structure of a TE generator.

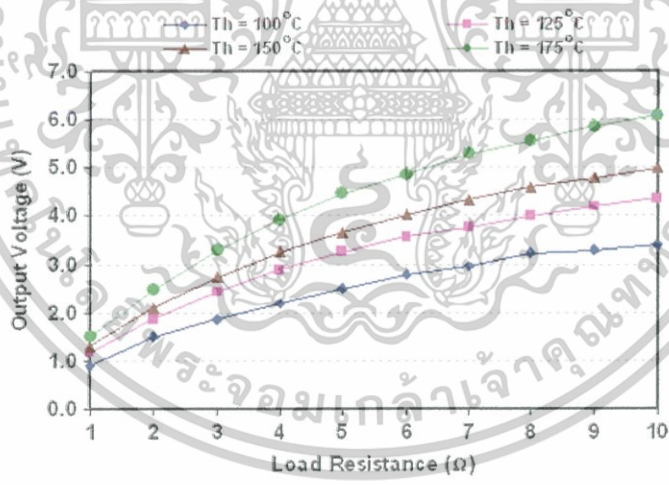


Fig. 3. Output voltage of single TE module (TEPI-1264-I.5) compared with load resistance at 40 °C cold-side temperature.

3. Converter and controller

3.1. Basic operation principle of the SEPIC converter

The SEPIC converter is a non-inverting dc–dc converter and can generate voltages either above or below the input. The input current is non-pulsating, but the output current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

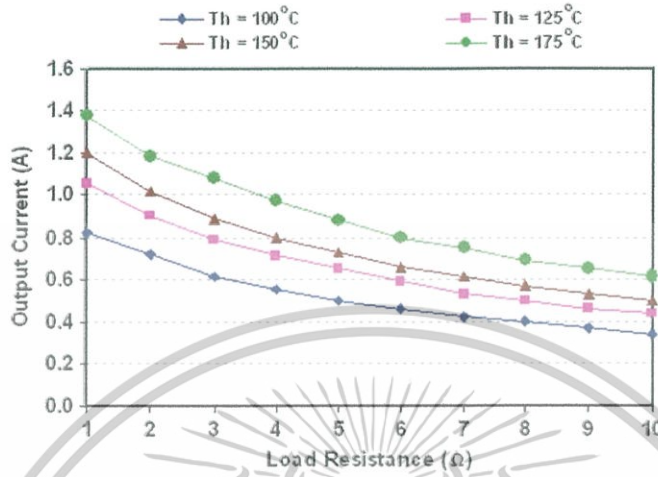


Fig. 4. Output current of single TE module (TEP1-1264-1.5) compared with load resistance at 40 °C cold-side temperature.

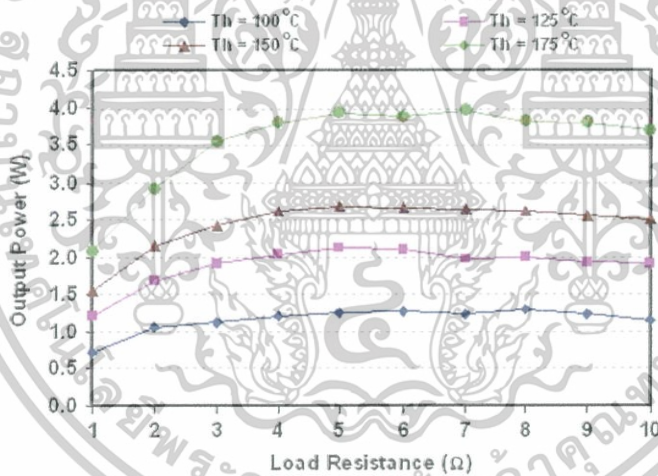


Fig. 5. Output power of single TE module (TEP1-1264-1.5) compared with load resistance at 40 °C cold-side temperature.

is pulsating. The name SEPIC is an acronym for single-ended primary inductance converter. A typical circuit diagram is shown in Fig. 7. This circuit has three dynamic energy storage elements, L_1 , L_2 and C_1 . The ratio of the output voltage to the input voltage and the duty cycle are defined as:

$$M = \frac{V_O}{V_i}, \tag{4}$$

$$D = \frac{t_{ON}}{T}. \tag{5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

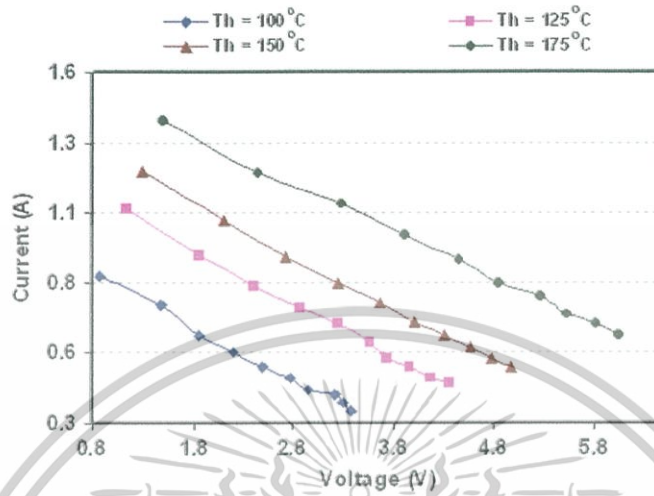


Fig. 6. *V*-*I* curve of a single TE module (TEP1-1264-1.5) at 40 °C cold-side temperature.

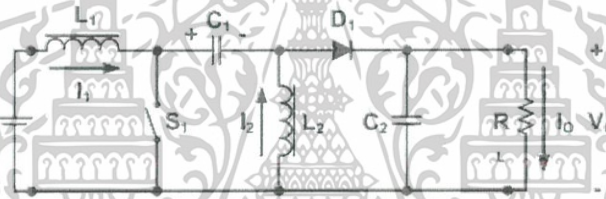


Fig. 7. A typical circuit diagram of the SEPIC DC-DC converter.

D as a function of *M* is:

$$D = \frac{M}{M + 1} \tag{6}$$

and *M* as a function of *D* is:

$$M = \frac{D}{1 - D} \tag{7}$$

By substituting (4) into (7), the output voltage can be expressed as:

$$V_o = \frac{D}{1 - D} \cdot V_i, \tag{8}$$

where *M* is the conversion ratio of converter, *V_i* is the input voltage, *V_o* is the output voltage, and *D* is the percentage of the gate drive signal.

The behavior of any switchmode circuit is dependent on the continuity of the currents in the inductors and the voltage on the capacitor. In this research, the converter is operated in continuous-current mode (CCM); the sequence of operation and the waveforms being shown in Figs. 8 and 9.

3.2. System simulation

The proposed electrical behavior of the system operation was simulated using the Orcad PSpice Program [9]. The electrical model of the TE power generator in the circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

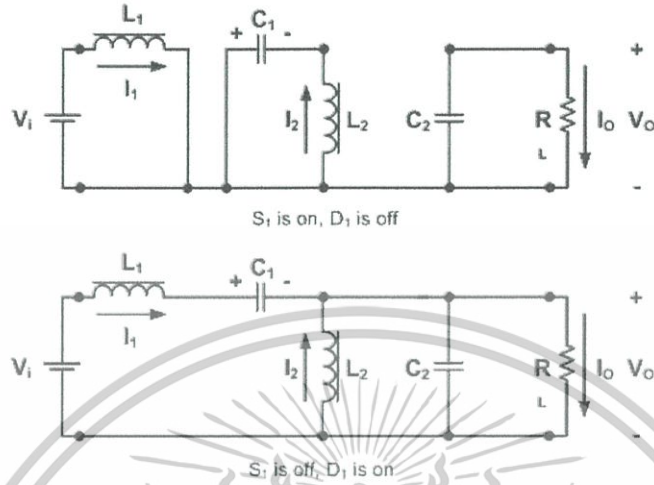


Fig. 8. Topology sequence of the SEPIC DC-DC converter.

simulation (see Fig. 10) was developed using the tested parameters of the TE power generator. It consists of a voltage source and a resistor connected in series. The value of a voltage source in the model is the open-circuit voltage of the TE power-generator and the

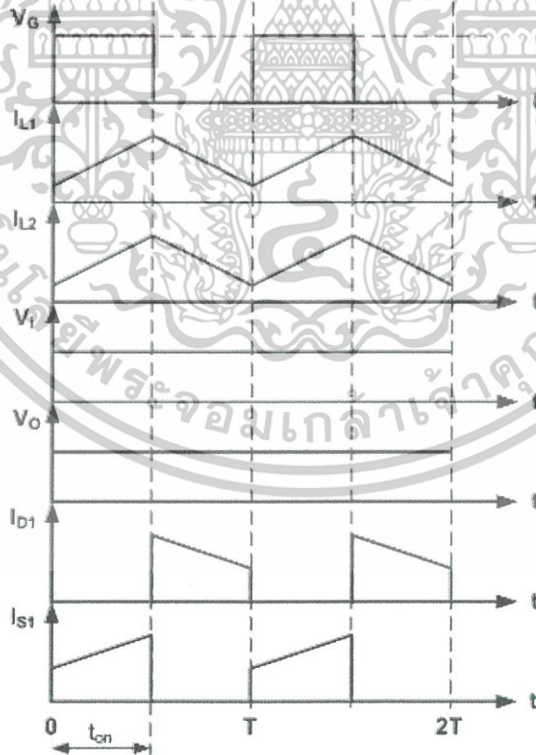


Fig. 9. Theoretical waveforms of the SEPIC DC-DC converter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

value of the resistor is the internal resistance of the TE power-generator. From Fig. 11, the procedure for testing is connecting 6 TE modules in series, input heat energy to the hot side of TE module, measuring the open-circuit voltage (V_{NL}), switching-on the S_1 to connect the R_L in the circuit and measuring the load current (I_L). Then, the internal resistance of the TE power-generator is calculated by:

$$V_{oc} = I_L \cdot (R_{int} + R_L), \tag{9}$$

$$R_{int} = \frac{V_{oc}}{I_L} - R_L, \tag{10}$$

where V_{oc} is the open-circuit voltage, I_L is the load current, R_L is the load resistance and R_{int} is the internal resistance (see Fig. 12).

From the test results of the TE power generator internal-resistance in Table 1, 17.8 Ω internal resistance and the 27.8 V open-circuit voltage were chosen for the electrical model of TE power generator. The simulation was at 18 kHz, 35% duty cycle of gate signal and the load was a 6 V battery with 0.1 Ω internal resistance (see Fig. 10). The simulation results for the input voltage, the input current, the output voltage and the output current of the dc–dc converter are shown in Fig. 13. The output power of the dc–dc converter that charges the battery was about 9 W.

3.3. Maximum power point tracking [6–9]

The TE battery-charger system was implemented by using the parameters from the simulated circuit. The maximum power point was changed as the temperature varies (see

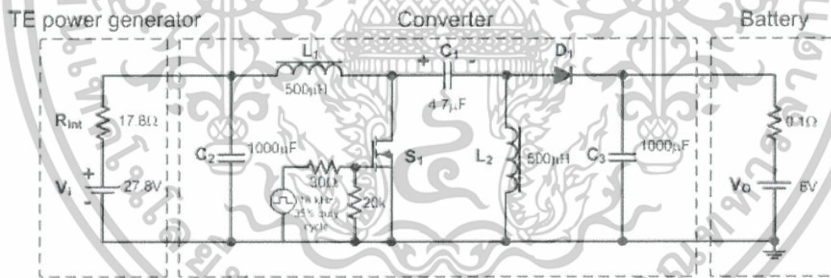


Fig. 10. The circuit diagram of the TE battery charger system for simulation.

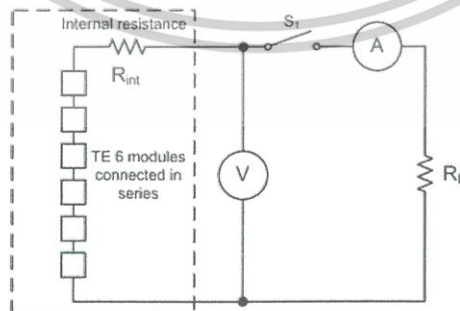


Fig. 11. The circuit diagram of the internal-resistance testing method.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1
Testing results for the TE power generator internal-resistance

Module hot-side temperature (T_h), °C	Open-circuit voltage (V_{oc}), V	Load current (I_L), A	Internal resistance (R_{in}), Ω
90	13.00	0.55	13.63
100	14.20	0.60	13.67
110	16.50	0.70	13.57
120	18.00	0.75	14.00
130	19.80	0.80	14.75
140	21.20	0.85	14.94
150	23.20	0.90	15.78
160	24.90	0.95	16.21
170	26.00	0.98	16.53
180	27.80	1.00	17.80

$R_L = 10 \Omega$; the module cold side temperature = 40 °C.

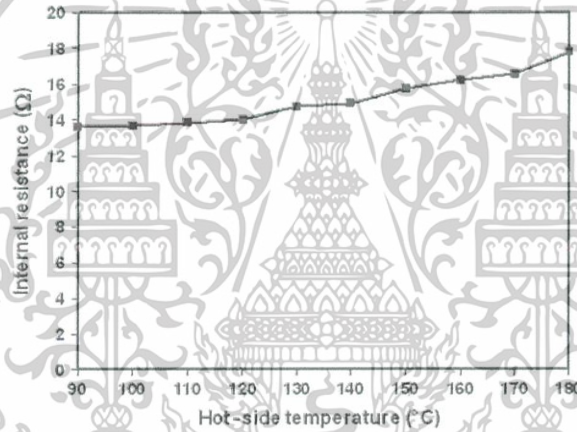


Fig. 12. The internal-resistance of the TE power generator.

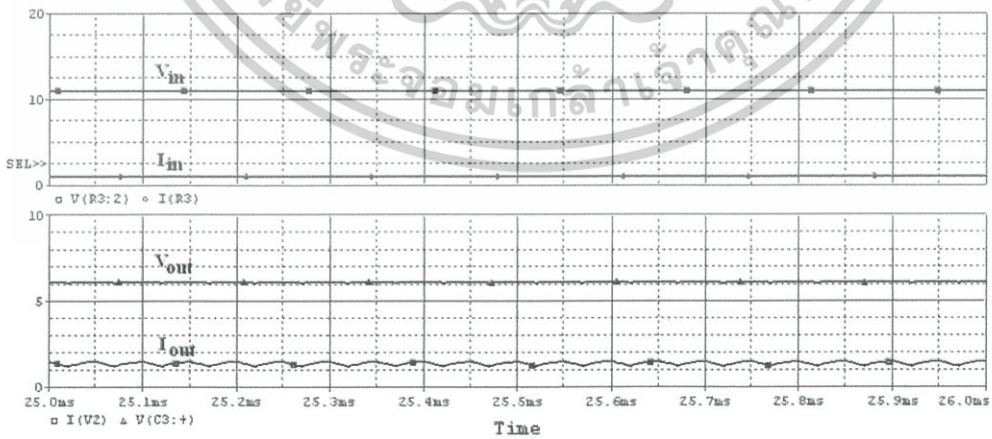


Fig. 13. The simulation results of the TE battery charger system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

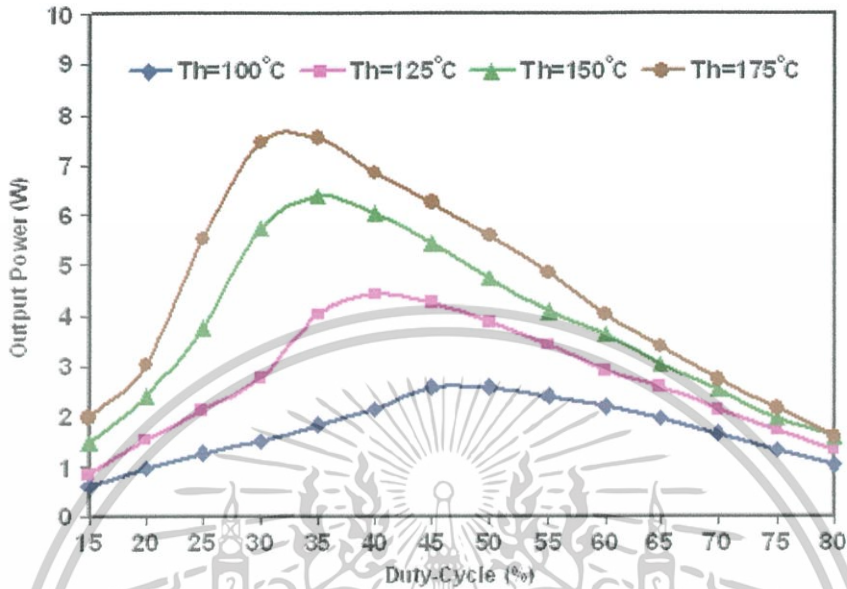


Fig. 14. The relation of duty cycle and output power which transfers to a battery.

Fig. 14). From Fig. 15, the maximum power transfer to the battery occurred when the input impedance of the dc–dc converter was equal to the output impedance of the TE power generator. The input impedance of the dc–dc converter can be controlled directly by changing the duty cycle of the gate driving signal; then we can find the maximum power point of the power transferred to the battery. The rate change of the input power with respect to input voltage and input resistance can be shown as follow [7]:

$$P_i = P_o = \frac{v_i^2}{r_i} \tag{11}$$

$$\partial P_i = \frac{2v_i}{r_i} \partial v_i - \frac{v_i^2}{r_i^2} \partial r_i \tag{12}$$

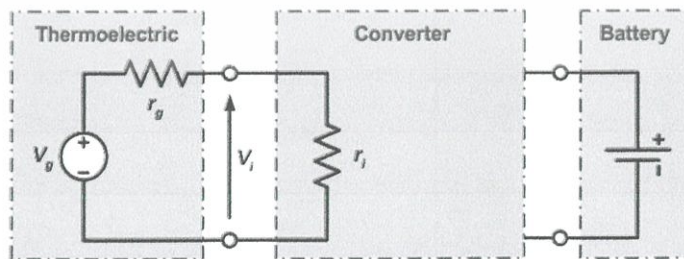


Fig. 15. Equivalent circuit of a thermoelectric power generator connected to a converter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

At the maximum power point, the rate change of the input power is zero. Hence

$$\partial P_i = 0 \Rightarrow \frac{\partial v_i}{\partial r_i} = \frac{v_i}{2r_i}, \quad (13)$$

where v_i and r_i are input voltage and input resistance at the maximum power point respectively.

In the battery charging application, where the dc–dc converter output voltage can be assumed almost constant, a feed-forward MPPT controller may be applied [8]. The value of the battery-charging current is directly controlled by the duty cycle of the PWM control signal, which is applied to the dc–dc converter. An output power increase results in both a higher output current and a higher PWM control signal duty cycle, until the maximum power is transferred to the load.

4. Proposed system

A detailed circuit diagram of the proposed system is shown in Fig. 16. A SEPIC dc–dc converter is used to interface the TE power-generator output to the battery and to track the maximum power point of the TE power generator. The TE power generator consists of 6 TE power modules connected electrically in series and thermally in parallel, giving a 27.8 V open-circuit voltage at 180 °C hot-side temperature and 60 °C cold-side temperature. The SEPIC dc–dc converter consists of a RFP50N06 power MOSFET rated at 60V 50A $R_{ds(ON)} = 0.022 \Omega$, the fast-switching type diode D_1 , the capacitor values are $C_1 = 4.7 \mu\text{F}$, C_2 and the inductors $C_3 = 1000 \mu\text{F}$, the inductors values are L_1 , $L_2 = 500 \mu\text{H}$ and the inductors are wound on a ferrite core. The output of a SEPIC dc–dc converter is connected to A 6 V, 12 Ah battery.

The MPPT control-system consists of the 8-bit ATMEL microcontroller unit T89C51AC2 and features 5-I/O port, 8-bit PWM on-chip, 10-bit resolution A/D converter with 8 multiplexed inputs and the signal conditioner. The microcontroller unit used by the control program measures the signals required for the power flow control. This type of

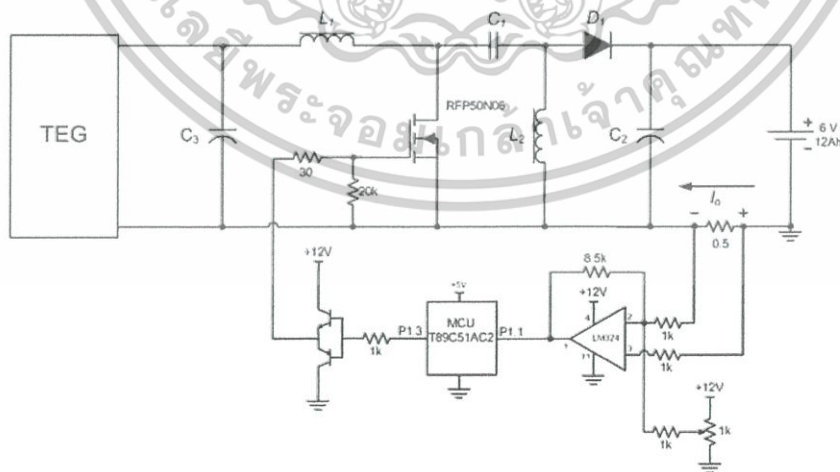


Fig. 16. The proposed system's circuit-diagram.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

microcontroller was chosen because it has the necessary features for the proposed system, such as an on-chip A/D converter, PWM output, high clock rate, low power consumption and low cost.

The signal conditioner consists of a 0.5Ω carbon-metal film resistor connected in series with the battery to measure the charged current from the system and send it to the non-inverting amplifier circuit. The output signal of a non-inverting amplifier is sent to the internal A/D converter of a microcontroller to convert it to digital data for use in the control program. The output PWM channel of a microcontroller is connected to the complementary transistors to amplify the output PWM signal. For higher accuracy, a Hall-effect sensor could be used. However, the Hall-effect sensor is more expensive.

The algorithm of the proposed program with the MPPT feature can be explained by the flowchart, which is shown in Fig. 17. The output of an A/D converter is used to calculate a PWM command duty cycle to drive a power switch. When the system starts operating, the program variable is set to an initial condition. The first PWM command is 25% duty cycle and the reference current I_{pass} is zero. The dc–dc converter starts operation and the current flows to the battery. The first signal captured from the signal conditioner is set to I_{present} to compare it with the reference current I_{pass} . If I_{present} is more than I_{pass} , the program increases the duty cycle. Then, the battery-charging current increases. The system operates at the maximum power point by adding the PWM command duty cycle. On the other hand, if I_{present} is more than I_{pass} , then the duty cycle is over: the program goes to the next loop to decrease the duty cycle and returns to the previous loop when I_{pass} was more than I_{present} again. Finally, the program can operate at the steady-state operation range automatically. The detailed MPP tracking process is shown in Fig. 18. The range of the 8-bit PWM is 256 steps that change the on time of the duty cycle. The Δd is a program variable with values either 1 or -1 , indicating the direction that must be followed on the hill-shaped charging current curve.

5. Experimental and results

A prototype of a TE battery charger system has been developed and tested in the laboratory. The temperature was measured using K-type thermocouples which determine the hot-side and cold-side temperatures of the TE power modules. The K-type thermocouples were mounted just below the copper plate and the heat sink (see Fig. 2) and connected to a data logger which recorded one set of readings every 4 s. The power was recorded using a power analyzer (FLUKE 43B) to measure and record data every 4 s. The experimental procedures is as follows:

- Connect the TE power generator to a battery directly for direct charge. Switch-on the power supply to provide power to the heater. Start recording all data. The maximum power transfer to the battery is 6.35 W in the steady state.
- Connect the TE power generator to the input of the dc–dc converter and connect the output of the dc–dc converter to a battery; use a function generator to generate the 18 kHz 35% duty cycle drive gate signal provided to the power switch. Switch-on the power supply to provide power to the heater. Start recording all data. The maximum power transfer to the battery is 7.63 W in the steady state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

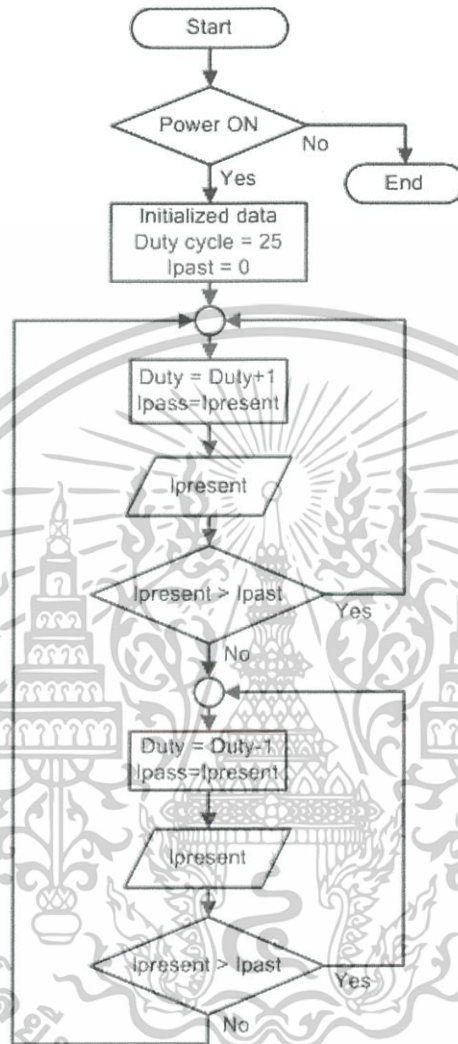


Fig. 17. Program flowchart of MPPT tracking process.

- (c) Connect the MPPT control unit to the system to use the automatic control function. The maximum power transfer to the battery is up to 7.99 W in the steady state.

For the direct charging method, the system starts operation at the ambient temperature. The TE power generator could not produce a voltage because the temperature of the hot side and the cold side of TE were not different. Then, the TE module connected to the battery acted as the load. The current must flow to the TE power generator. Some loss of power was expected. For charging with the dc–dc converter, the converter topology has a flyback diode which can block the current flow up to the TE power generator. So, the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

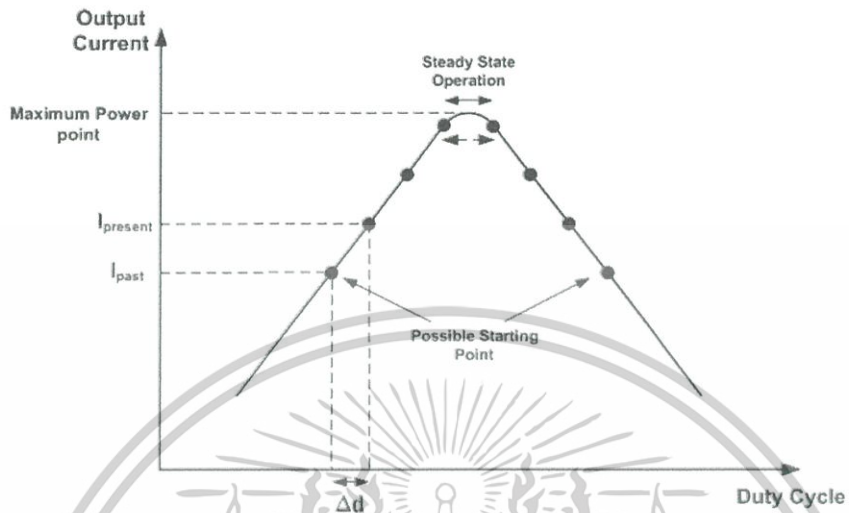


Fig. 18. The MPPT tracking process.

system can start operating although the generator voltage is less than the battery voltage. The hot-side and cold-side temperatures is shown in Fig. 19. A comparison of the battery charging power is shown in Fig. 20.

The maximum powers transfers from each method, i.e. direct charging, charging by using a dc–dc converter and charging using the dc–dc converter with MPPT control are 6.35, 7.63 and 7.99 W, respectively. The comparison of the power from each method is shown in Fig. 20. The input power measured at the front of the dc–dc converter is about 8.4 W. It is the maximum power that the dc–dc converter can get from the TE power

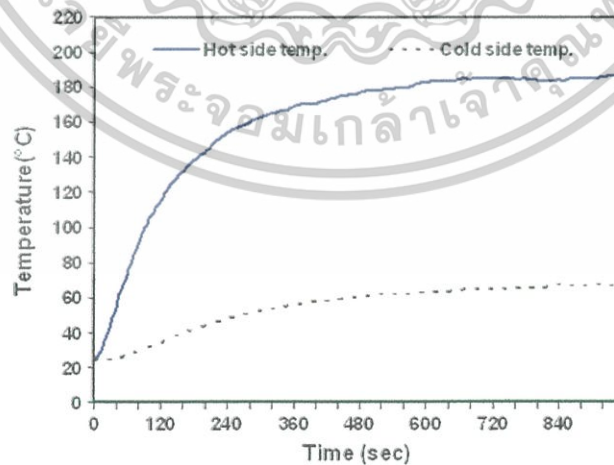


Fig. 19. The comparison of hot-side and cold-side temperatures of the TE power module.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

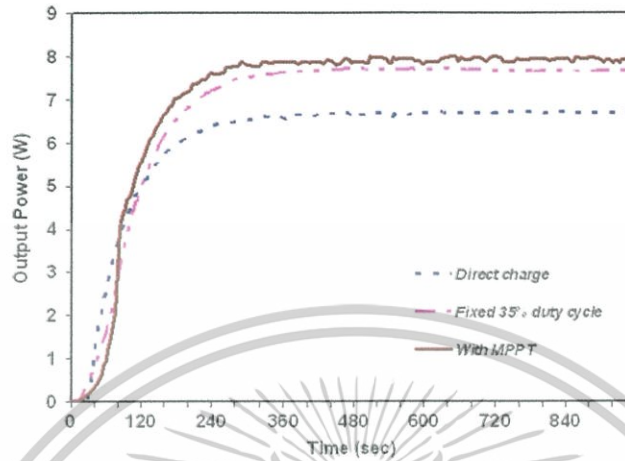


Fig. 20. The battery charging power.

generator, namely the power source and the load matches. The output power of the dc–dc converter is 7.99 W. The efficiency of the dc–dc converter is 95.11% when using the MPPT control. It is better than the direct charging method by about 15%.

Using the same experimental procedure, we staggered the heat supply at intervals; (switch-on the heater power supply 6 min, switch-off 2 min and switch-on again) providing the heat to the TE power generator. The comparisons of the battery charging power are shown in Fig. 21. The waveform of gate signal, input and output current of the dc–dc converter when using the MPPT control are shown in Fig. 22.

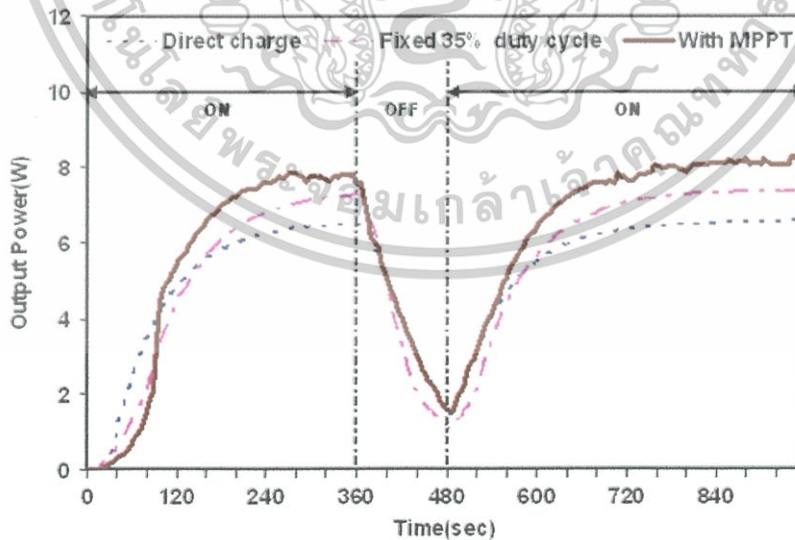


Fig. 21. Response of the battery charging power to turning the heat source off and on.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

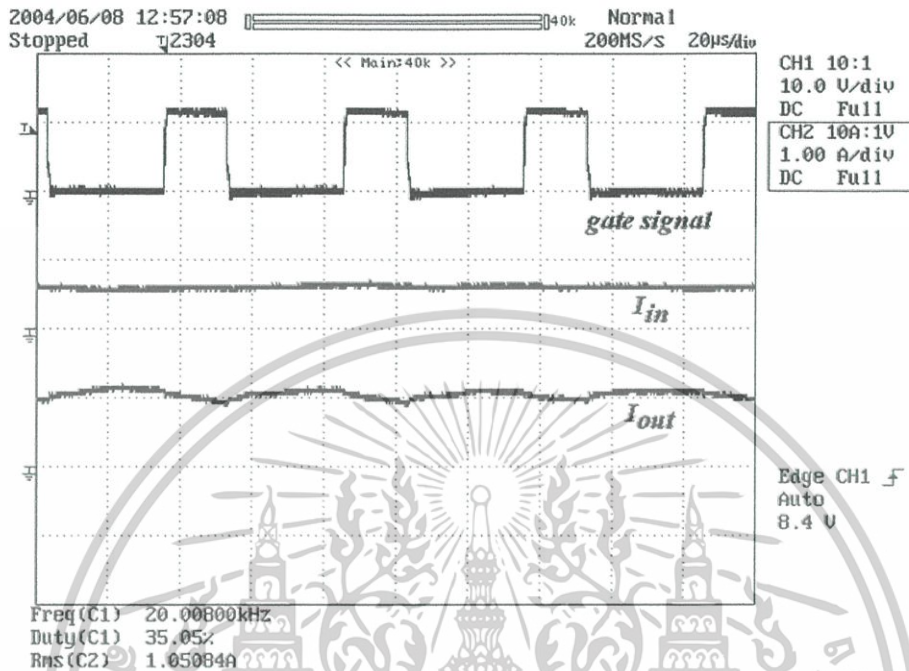


Fig. 22. The waveform of the gate signal; and the input and output currents of the dc-dc converter.

6. Conclusion

The advantage of the TE battery-charger system using MPPT is that the system can charge the battery by using the heat energy directly, and not having moving parts. It can be applied to heating devices such as a cook-stove, a boiler or another heat source for waste-heat recovery. This system is the most feasible to use in a rural community or a remote area. The photovoltaic system provides electrical power during sunshine, while the TE battery charger system provides power as long as the heating device is in use. The best power output of the system depends on the heat dissipation of the heat sink. However, the system design may be improved by redesigning the heat exchanger (heat receiver and heat sink) appropriate to the ambient temperature. The aim of this paper is to provide a new method for generating electrical power; it might not be economic initially, but the results derived here may lay a foundation for further investigations of TE battery charger systems.

References

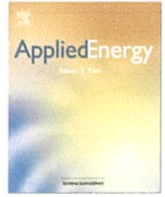
- [1] Anders Killander, John C Bass. A stove-top generator for cold areas. In: Proceedings of the IEEE 15th international conference on thermoelectrics; 1996. p. 390–3.
- [2] Mahmudur R, Roger S. Thermoelectric power-generation for battery charging. In: Proceedings of the IEEE conference on energy management and power delivery, vol. 1; 1995. p. 186–91.
- [3] Roth W, et al. Grid-independent power-supply for repeaters in mobile radio networks using photovoltaic/thermoelectric hybrid systems. In: Proceedings of the 16th international conference on thermoelectrics; 1997. p. 582–5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] Min G, Rowe DM. Peltier devices as generators. CRC handbook of thermoelectrics. London: CRC Press; 1995 [Chapter 38].
- [5] Rowe DM, Min G. Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation. IEE Proc-Sci Meas Technol 1996;143(6):351–6.
- [6] Eakburanawat J, Khedari J, Hirunlabh J, Daguene M, Maneewan S, Teekasap S. Solar-biomass thermoelectric power generation simulation. In: Proceeding of 22nd international conference on thermoelectrics, La Grande Motte, Montpellier, France; 2003.
- [7] Chung Henry Shu-Hung, Tse KK, Ron Hui SY, Mok CM, Ho MT. A novel maximum power point tracking-technique for solar panels using SEPIC or Cuk converter. IEEE Trans Power Electron 2003;18(3):717–24.
- [8] Koutroulis Eftichios, Kalaitzakis Kostas, Voulgaris NC. Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system. IEEE Trans Power Electron 2003;16(1):717–24. 46–54, 2001.
- [9] Orcad PSpice Version 9.2, Copyright 1986–1999 by Cadence Design Systems.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module

C.E. Kinsella^a, S.M. O'Shaughnessy^a, M.J. Deasy^a, M. Duffy^b, A.J. Robinson^{a,*}

^a Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, University of Dublin, Trinity College, Ireland

^b Power Electronics Research Centre, Electrical and Electronic Engineering, NUI Galway, Ireland

HIGHLIGHTS

- Small amounts of electrical power are generated using the thermoelectric effect.
- The electricity produced is used to charge a rechargeable 3.3 V LiFePo₄ battery.
- The study investigates methods of delivering maximum power to the battery.
- For low temperature gradients (<100 °C) a DC–DC converter is recommended.
- Above this temperature gradient more power was delivered to the battery by direct charging.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 July 2013

Received in revised form 9 September 2013

Accepted 14 September 2013

Keywords:

Thermoelectricity
Electricity generation
Load matching
Maximum power point tracking

ABSTRACT

This project involves the development of a prototype electrical generator for delivering and storing small amounts of electricity. Power is generated using the thermoelectric effect. A single thermoelectric generator (TEG) is utilised to convert a small portion of the heat flowing through it to electricity. The electricity produced is used to charge a single rechargeable 3.3 V lithium–iron phosphate battery. This study investigates methods of delivering maximum power to the battery for a range of temperature gradients across the thermoelectric module. The paper explores load matching and maximum power point tracking techniques. It was found that, for the TEG tested, a SEPIC DC–DC converter was only beneficial for temperature gradients less than 100 °C across the TEG. At a temperature gradient of 150 °C, the effective resistance of the battery was close to the internal resistance of the TEG. For temperature gradients in excess of 100 °C a DC–DC converter is not suggested and a simple charge protection circuit is sufficient. © 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Thermoelectric generators (TEGs) are solid state devices that convert heat directly to electricity. Although TEGs are commercially available, they are low in efficiency, typically of the order of 3–5%. This being the case, they are generally used in niche applications that require power in the range of 1 μW to 100 W [1].

The low efficiency of TEGs is compounded by the fact that for a given temperature differential the power generated by a TEG generator system is a function of the load resistance. Since there is a peak maximum power at a critical load resistance, the real life efficiency could be much less than the maximum possible efficiency if the load resistance is greater or less than this critical value. This is the case for both single TEG technologies, such as that reported in O'Shaughnessy et al. [2] as well as generators with multiple TEGs, such as that reported by Lesage and Pagé-Potvin [3]. Thus, a

complete TEG generator design requires that not only the heat source, the TEG and the heat sink be modelled, but also the effective impedance of the electrical load to which the TEG is supplying electricity.

Recent work with regard to testing and modelling thermoelectric modules aims to provide the theoretical framework to predict the electrical output characteristics given the thermal boundary conditions on the hot and cold faces of the TEG. Based on the works of Sandoz-Rosado and Stevens [4], Rodríguez et al. [5], Hodes [6] and Hsu et al. [7], it can be said that theoretical modelling of thermoelectric generators is mature. On the other hand, there has been less attention paid to technologies which ensure that the maximum power is being drawn from the TEG for the given thermal loading condition.

Eakburanawat and Boonyaroonate [8] developed a SEPIC DC–DC converter that was controlled by a microcontroller to optimally charge a battery from thermoelectric modules. Maximum power was transferred to the battery when the input impedance of the DC–DC converter matched the impedance of the battery. The input

* Corresponding author. Tel.: +353 1 896 3919.
E-mail address: arobins@tcd.ie (A.J. Robinson).

Nomenclature

A	cross-sectional area of a single thermo-element, m^2
I	current, A
I_m	current at matched load, A
L	length of thermo-element, m
L_c	contact layer thickness, m
N	number of thermo-elements
P_{elec}	electrical power, W
Q_H	heat delivered to TEG hot side, W
Q_C	heat dissipated from TEG cold side
R_L	load resistance, Ω
R_{TEG}	TEG internal resistance, Ω
T_h	module hot side temperature, K
T_c	module cold side temperature, K
ΔT_{TEG}	module temperature difference, K
V	voltage, V
V_m	voltage at matched load, V
V_{oc}	open circuit voltage, V
Z	figure of merit, $1/K$

α	seebeck coefficient, V/K
α_{eff}	effective seebeck coefficient, V/K
$\alpha_{p,n}$	seebeck coefficient of p/n element, V/K
λ	thermal conductivity, W/m K
λ_c	contact thermal conductivity, W/m K
$\lambda_{p,n}$	thermal conductivity of p/n element, W/m K
ρ	electrical resistivity, Ωm
ρ_c	electrical contact resistivity, Ωm

Abbreviations

TEG	thermoelectric generator
TEM	thermoelectric module
PWM	pulse width modulated
MPPT	maximum power point tracking
MOSFET	metal oxide semiconductor field effect transistor
SEPIC	single ended primary inductor converter

impedance of the DC–DC converter was changed by varying the duty cycle of the pulse width modulated (PWM) signal applied to the gate of the MOSFET. Six Taihuaxing TEGs (TEP-1264-1.5) were connected in series to give a combined internal resistance of 17.8Ω at 140°C . These were then used to charge a 6 V battery with internal resistance of 0.1Ω . Three experiments were set up: in the first experiment, the TEGs were directly connected to the battery. The maximum power transferred to the battery was 6.35 W. In the second experiment, a SEPIC converter was introduced with the duty cycle fixed at 35%. In this case the power transferred to the battery was 7.63 W. In the third experiment, the duty cycle of the MOSFET was varied throughout the experiment in order to deliver maximum power to the battery. This was implemented by measuring the current into the battery and varying the duty cycle until maximum current flowed into the battery. The Perturb and Observe maximum power point tracking (MPPT) technique was used, however only the current was measured as it was assumed that the battery voltage remained relatively constant. In this scenario 7.99 W was transferred to the battery and the SEPIC was found to be 95.11% efficient. The maximum power point tracking circuit was determined to be 15% more efficient than direct charging. It was also observed that during direct charging, if there was no temperature difference across the TEG, the TEG acted as a load and discharged the battery. This did not happen when the SEPIC was inserted.

In 2006, Nagayoshi and Kajikawa [9] developed a buck-boost based maximum power point tracker to reduce the impedance mismatch between an array of thermoelectric modules and the load. The resistance of the load was varied from 3Ω to 40Ω . The MPPT algorithm operated by increasing the duty cycle until the conductance of the load matched the internal conductance of the TEG array. If the effective conductance of the load was lower than that of the TEG array, boost mode was employed. Conversely, if the effective conductance of the load was higher than the internal conductance of the TEGs, buck mode was employed. The circuit was 80% efficient.

Nagayoshi et al. [10] later compared the output power with and without the maximum power point trackers. Two experimental rigs were set up. The first rig consisted of four strings of TEGs held at different temperature gradients: 40°C , 70°C , 100°C and 130°C . Within each string, the temperature was held constant. In the second rig, maximum power point trackers were placed on each string of TEGs. Nagayoshi et al. [10] compared the output power of each

system with a range of load resistances. When a load of 5Ω was applied, direct charging delivered more power than the MPPT method for the string of TEGs held at 70°C and 100°C . This highlights that while the internal resistance of the TEGs is temperature dependent, the resistance changes only slightly with temperature and thus if the load is matched at a given temperature, direct charging can be optimal even if this temperature fluctuates within a certain range.

Lihua et al. [11] investigated power conditioning for thermoelectric modules. Ten TEGs were connected in series and a 40Ω load was attached, which was close to the total internal resistance of the TEGs. At a temperature gradient of 119°C , the output power of the TEGs was calculated to be 50.6 W. The 40Ω load was then replaced by a light bulb and the TEG output power dropped to 23 W. A maximum power point tracker was then developed using a boost DC–DC converter with synchronous rectification and the Perturb & Observe method. Efficiencies of 95.3% were achieved. The maximum power transferred to the light bulb was 47 W. This increase in power was due to load matching.

Vieira and Mota [12] designed and built a maximum power point tracker to optimally charge a lead acid battery using a thermoelectric module. The MPPT was based on a SEPIC circuit working in continuous conduction mode and the Perturb and Observe method was employed to find the maximum power point. In the algorithm, charge protection was also implemented to protect the lead acid battery from over-charging. The experimental results showed that if the 12 V battery was directly connected to the TEG, the TEG generated 19 W, whereas if the MPPT was inserted between the TEG and the battery, the TEG produced 28.5 W. The MPPT circuit produced 33% more power from the TEG than direct charging.

This paper focuses on charging a rechargeable battery using only one thermoelectric generator. The context of the research is for developing world applications, such as that reported by O'Shaughnessy et al. [2], where small amounts of electricity can be used to charge LED lanterns and low power demand mobile phones. Within this context, the specific objectives of this study are to:

- Select a thermoelectric module and fully characterise it at different temperature gradients and with different load resistances.
- Select a battery and consider different methods of charging the battery.

- Investigate DC–DC converters and MPPT algorithms.
- Design a simple, easy to use battery charging circuit with the thermoelectric module as the power source.

2. Overview of thermoelectricity

Thermoelectric generators are solid state energy devices which convert heat directly into electricity by means of the thermoelectric effect. TEGs have no moving parts and are commercially available in a variety of shapes, sizes and power ratings.

The working principle is depicted in Fig. 1. A thermoelectric module is sandwiched between a heat source and a heat sink. Heat flows from the heat source across the module and is dissipated by the heat sink, and electricity is produced by the module. The thermoelectric module consists of pairs of p–n thermoelements. The positive (p-type) and negative (n-type) doped semiconductor elements are connected electrically in series and thermally in parallel. Initially, the conductors in the module possess a uniform distribution of charge carriers. However, the heat input to the module, Q_H , creates a temperature difference across the p–n thermoelements. The Seebeck effect is described by Rowe [13]. The free carriers at the hot end have greater kinetic energy and diffuse to the cold end. The accumulation of charge results in a back emf which resists further flow of charge. If the temperature difference across these junctions is maintained, an open circuit voltage V_{oc} is generated according to

$$V_{oc} = \alpha(T_h - T_c) \tag{1}$$

where α is the Seebeck coefficient and T_h and T_c are the ‘hot’ and ‘cold’ junction temperatures. The Seebeck coefficient is a thermoelectric material property. Rowe [14] describes the strength of thermoelectric materials, expressed by a quantity Z , known as the figure of merit. Z depends on the thermal and electrical properties of the material and on the Seebeck coefficient, α .

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \tag{2}$$

In the above equation λ is the thermal conductivity, σ is the electrical conductivity, and ρ is the electrical resistivity. The majority of thermoelectric generators in current use are based on bismuth-telluride

(Bi₂Te₃), lead-telluride (PbTe) or silicon-germanium (SiGe) alloy technologies. According to Rowe [14], Bi₂Te₃ generators have the greatest figure of merit, but are typically limited in their maximum operating temperature to approximately 250–300 °C. PbTe and SiGe generators have lower figures of merit but compensate with the ability to operate at much higher temperatures (~600 °C for PbTe and ~1000 °C for SiGe).

A single thermocouple is depicted in Fig. 2. The electrical resistance R and thermal conductance K of a thermocouple of length L and cross-sectional area A_p are defined respectively as [6]:

$$R_{TEG} = \frac{2\rho L}{A_p} \tag{3}$$

$$K = \frac{2\lambda A_p}{L} \tag{4}$$

By assuming one-dimensional conduction through the module, the rate of heat supply, Q_H , and heat removal, Q_C , can be estimated at the hot and cold junctions as [6]

$$Q_H = K(\Delta T) + (\alpha_{p,n})IT_h - \frac{I^2 R_{TEG}}{2} \tag{5}$$

$$Q_C = K(\Delta T) + (\alpha_{p,n})IT_c + \frac{I^2 R_{TEG}}{2} \tag{6}$$

where $\alpha_{p,n}$ is equal to $(\alpha_p - \alpha_n)$, and I is the current through the thermocouple. The electrical power generated by the TEG is given by the voltage and current across the external load, R_L . By applying an energy balance across the module, the electrical power, P_{elec} , is equal to the difference between heat delivered and dissipated, or $(Q_H - Q_C)$.

$$P_{elec} = Q_H - Q_C = \alpha_{pn}I\Delta T - I^2 R_{TEG} \tag{7}$$

Eq. (7) can be rearranged and simplified to give the voltage:

$$V = \alpha_{pn}\Delta T - IR_{TEG} \tag{8}$$

Eq. (8) expresses the voltage as a function of current for a given temperature difference. Using the standard model [6] the parameter α_{pn} is measured by open-circuiting ($I = 0$) the TEG, and measuring the applied temperature difference and corresponding voltage. By setting P_{elec} equal to $I^2 R_L$ in Eq. (7), where R_L is the load resistance, the current can be found from

$$I = \frac{\alpha_{pn}\Delta T}{(R_L + R_{TEG})} \tag{9}$$

Substituting Eq. (9) into Eq. (7) yields an expression for the electrical power:

$$P_{elec} = (\alpha_{pn}\Delta T)^2 \frac{R_L}{(R_L + R_{TEG})^2} \tag{10}$$

A thermoelectric module generates maximum power when the module resistance matches the load resistance, i.e. when $R_L = R_{TEG}$ [15]. It follows that maximum power, P_{max} , is given by

$$P_{max} = \frac{(\alpha_{pn}\Delta T)^2}{4R_{TEG}} = \frac{A_p(\alpha_{pn}\Delta T)^2}{8\rho L} \tag{11}$$

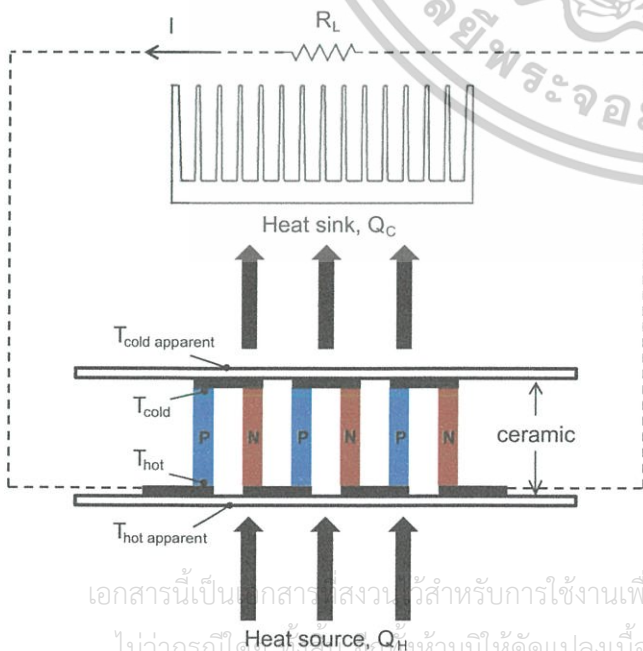


Fig. 1. Thermoelectric power generation.

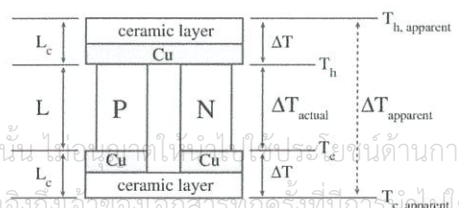


Fig. 2. Diagram of a single thermoelectric thermocouple.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถใช้อื่นๆได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่สามารถแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From Eqs. (10) and (11), the power produced by each thermocouple is approximately proportional to its cross-sectional area, and inversely proportional to its length. Therefore, power produced by an entire module is dependent on the number of couples, N , as well as the ratio of the load resistance to that of the TEG itself. It should also be kept in mind that the internal resistance R_{TEG} of a thermoelectric module varies with temperature due to a variation in resistivity. The above theoretical framework was compared with experimental measurements in O'Shaughnessy et al. [2] and the agreement was adequate.

The equivalent circuit for a thermoelectric module can be represented by a voltage source, V_{oc} , with a variable resistor in series, R_{int} , as shown in Fig. 3.

For this study, a rechargeable battery is to be charged using the TEG as the power source. Therefore, to obtain maximum power from the TEG, the effective resistance of the battery must be comparable to the internal resistance of the TEG. Two approaches were investigated in this study:

- Select a battery with the same effective resistance as the internal resistance of the TEG.
- Design a DC–DC converter to change the impedance of the load and then implement a MPPT device to continuously track the maximum power point.

The disadvantage of the first approach is that the internal resistance of the TEG changes with temperature whilst the effective resistance of the battery changes with charging current. The disadvantage of the second approach is the increased complexity and the fact that electrical energy is required to operate the circuitry.

3. Thermoelectric module selection

The thermoelectric module chosen for this investigation was the TEG 12610-5.1 supplied by Thermal Electronics Corp, Canada. The output power from the thermoelectric modules was close to the specifications quoted by the manufacturer and could withstand temperatures of up to 320 °C intermittently.

The 40 mm × 40 mm TEG is composed of 126 Bismuth Telluride p–n junctions. While TEGs with larger area specify higher output power per degree temperature difference, a greater heat flux is required to maintain the same ΔT_{TEG} . According to the manufacturer's specification at $\Delta T_{TEG} = 210$ °C, TEG1-12610-5.1 is capable of producing 5.9 W of electrical power at matched load. Some specifications for the module are provided in Table 1.

4. Battery selection

A variety of battery typologies were explored. Nickel metal hydride batteries are widely used due to their availability, low cost and low nominal voltage. However, nickel metal hydride batteries

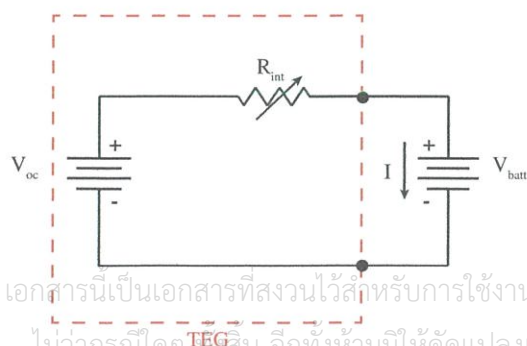


Table 1
TEG1-12610-5.1 supplier specifications.

Dimensions	40 mm × 40 mm
Hot side temperature	260 °C
Cold side temperature	50 °C
Open circuit voltage	8.6 V
Internal resistance	3 Ohm
Match load output voltage	4.2 V
Match load output current	1.4 A
Match load output power	5.9 W
Heat flow through the module	~140 W
Heat flux	~8.8 W/cm ²

release hydrogen when they are over-charged, which can be hazardous. Lead acid batteries were also investigated. Although robust, lead acid batteries have low energy densities, making them significantly larger and heavier than other batteries of the same capacity.

Lithium ion batteries were then analysed. It was discovered experimentally that in some cases when they are overcharged the cell can rupture, leading to combustion. From further investigations into different types of lithium ion batteries, it was found that lithium iron phosphate batteries are inherently much safer than conventional lithium ion cells due to their olivine structure which changes only slightly when over-charged. Upon heating, no oxygen is evolved and there is no thermal runaway under abusive conditions [16]. They also possess high energy densities and long life cycles. The batteries exhibit very flat open circuit voltage curves over the State-of-Charge of the battery, which means the voltage of the battery stays relatively constant during discharge. They can also be left in a partially discharged state for extended periods without causing permanent damage. Lithium iron phosphate (LiFePO₄) batteries have been selected for this study, specifically the ANR26650 lithium–iron–phosphate cylindrical cell manufactured by A123 Systems. The battery was sourced from Korea and cost \$11.30 per cell. Some battery specifications are provided in Table 2.

An advantage of LiFePO₄ batteries is their moderate operating voltage (typically 3.3 V) which is close to the matched load voltage of the thermoelectric module (4.2 V) at $\Delta T_{TEG} = 210$ °C. As the open circuit voltage of a thermoelectric module is directly proportional to the temperature difference across it, this suggests that at a $\Delta T_{TEG} \approx 150$ –160 °C, the nominal voltage of the battery would be comparable to the matched load voltage of the TEG. The specifications suggest the maximum capacity of the battery is 7.59 Wh.

5. DC–DC converters and maximum power point tracking

In order to investigate whether power transfer between the TEG and load could be improved, several DC–DC converters were initially investigated to provide a match between the impedance of the load to that of the TEG as it varied under differing thermal loads. Design parameters assumed for the different DC–DC converters are listed in Table 3.

Table 2
LiFePO₄ battery specifications.

Cell dimensions (mm)	∅26 × 65
Cell weight (g)	72
Cell capacity, nominal/minimum (Ah)	2.3/2.2
Voltage, nominal (V)	3.3
Internal impedance (mΩ)	8
Max. continuous discharge (A)	70
Operating temperature (°C)	30 to 55
Typical cycle life	>1000

Fig. 3. Equivalent circuit of a thermoelectric module connected to a load.

A boost converter, a non-inverting buck-boost converter and a SEPIC circuit were designed and constructed. The SEPIC circuit was ultimately chosen for the following reasons:

- Its ability to step up or step down the voltage as the open circuit voltage of the TEG was expected to vary between 0 and 10 V.
- It demonstrated high efficiency.
- It was possible to measure the open circuit voltage without an additional switch unlike the boost converter.

The characteristic equation of a SEPIC is provided by Eq. (12), where D is the duty cycle, V_{in} is the voltage at the input of the SEPIC and V_{out} is the voltage at the output of the SEPIC.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \tag{12}$$

Ignoring losses, Eq. (13) demonstrates the relationship between the effective load resistance R_{Leff} and the actual load resistance R_L . By varying the duty cycle of the PWM signal supplied to the gate of the MOSFET, the effective resistance of the load can be changed, so that it matches R_{TEG} .

$$R_{Leff} = \left(\frac{1 - D}{D}\right)^2 R_L \tag{13}$$

A circuit diagram of the SEPIC used is provided in Fig. 4. The SEPC circuit was designed to operate at 10 kHz, where the relatively low frequency kept switching losses to a minimum; however this also meant that large passive components were needed to ensure the desired ripple current and voltage levels were not excessive. The 220 μ H inductors and the 3900 μ F capacitors gave the desired input and output voltage levels, while the 100 μ F radial electrolytic capacitor was needed to handle the high ripple current at the isolation point. Table 4 details the components used in the construction of the SEPIC circuit. A photo of the SEPIC circuit is given in Fig. 5.

In a SEPIC circuit, the input and output voltages are isolated by the capacitor C2 shown in Fig. 4. Therefore if no voltage is applied to the gate of the MOSFET (duty cycle = 0), no current flows to the battery. This means it is possible to measure the open circuit voltage of the TEG for maximum power point tracking. Two MPPT algorithms were coded with the SEPIC using an Arduino microcontroller. The purpose of the algorithms was to increase or decrease the duty cycle of the PWM signal supplied to the gate of the MOSFET until maximum power was supplied to the battery.

Table 3
DC-DC converter specifications.

Input TEG voltage	2–10 V
Output (battery) voltage (nominal)	3.3 V
Maximum output power	5.9 W

Table 4
SEPIC list of components.

Part	Manufacturer	Manufacturer part number
3900 μ F electrolytic capacitor	Panasonic	EEUFR1C392L
100 μ F electrolytic capacitor	Sanyo	20SH100M
220 μ H inductor	Murata Power Solutions	1422455C
N MOSFET	Fairchild Semiconductor	FDP8860
Schottky diode	STMicroelectronics	STPS15L25D
0.005 Ω resistor	Welwyn	OAR5-R005FI
Arduino Uno	Arduino	A000046

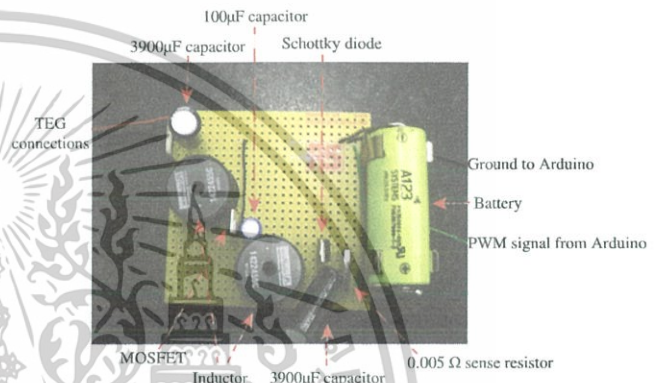


Fig. 5. Photograph of the SEPIC circuit.

5.1. Open circuit voltage method

As thermoelectric modules have linear current–voltage characteristics, the maximum power point voltage is equivalent to half the corresponding open circuit voltage of the TEG. The open circuit voltage method involves recording the open circuit voltage of the TEG and then varying the duty cycle of the PWM signal until the loaded voltage is half the open circuit voltage.

5.2. Combination method

The second algorithm had two components. The first component used the characteristic equation of a SEPIC (as given by Eq. (12)) to set an initial duty cycle. At the maximum power point, the voltage across the TEG is equal to half the open circuit voltage (V_{oc}).

$$V_{in} = \frac{V_{oc}}{2} \tag{14}$$

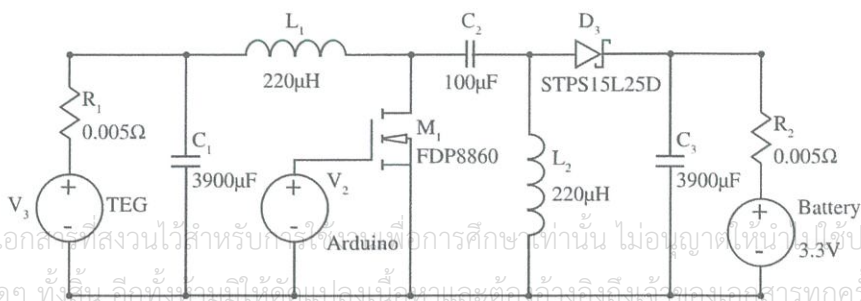


Fig. 4. SEPIC DC-DC converter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If the output voltage is equal to the battery voltage, it follows that

$$D = \frac{V_{\text{battery}}}{\frac{V_{\text{oc}}}{2} + V_{\text{battery}}} \quad (15)$$

The Perturb and Observe method was then employed which involved measuring the current delivered to the battery with a current sense resistor. The duty cycle was increased and the current was measured again. If the current flowing into the battery increased with increasing duty cycle, the duty cycle was further increased. However if the current decreased with increasing duty cycle, the duty cycle was decreased.

6. Experimental set-up

To investigate in detail the behaviour of the TEGs under different operating conditions an experimental rig was constructed as shown in Fig. 6. The rig was based on the design reported by Sandoz-Rosado and Stevens [4] and consists of a lower plate which is cooled by a water flow loop. The TEG sits on this surface. The upper surface is heated by cartridge heaters controlled by a variable power supply. The upper surface is lowered by a crank which enables the user to set the applied force on the TEG. The force applied to the TEG was measured with a load cell.

Copper plates were inserted between the TEG under test and the hot and cold surfaces of the apparatus and a thin layer of heat sink compound was applied between the TEG and the copper plates to reduce thermal contact resistance. Holes of 1 mm diameter were drilled into the copper plates and calibrated K-type thermocouples with an accuracy of ± 1 °C were inserted to measure the approximate hot and cold side temperature of the TEG. The cooling plate was positioned directly below the heating block and the crank was wound down until a pressure of 0.75 N/mm^2 was applied to the TEG. The temperature difference across the TEG was adjusted by varying the power to the cartridge heaters. Further details of the experimental rig can be found in O'Shaughnessy et al. [2].

7. Experimental method and results

7.1. TEG characterisation

For a range of temperature differentials across the TEG (100 °C, 120 °C, 150 °C, 190 °C and 200 °C) the open circuit voltage of the TEG was measured using a digital multimeter. An electrical load was then attached to the TEG. Constantan wire was chosen as the load as it was capable of handling high currents and its resistivity remained relatively constant with varying temperature. The length of constantan wire, and thus the load resistance, was varied throughout the experiment. The voltage across the TEG was measured for a range of load resistances. The current was measured using a digital multimeter.

The results demonstrated the importance of load matching. Fig. 7 shows the power produced by the TEG versus the load resistance applied. At $\Delta T_{\text{TEG}} \sim 100$ °C, a maximum power of 2.18 W was generated from the TEG when a 2.95Ω resistance was connected in series with it. This implied the internal resistance of the TEG was 2.95Ω at $\Delta T_{\text{TEG}} \sim 100$ °C. The power generated by the TEG significantly decreased the further the load resistance moved away from the internal resistance of the TEG. Importantly, the power-resistance curve is much steeper for load resistances less than the critical value. There was a small change in the internal resistance of the TEG with temperature. At $\Delta T_{\text{TEG}} \sim 200$ °C, the internal resistance of the TEG increased to 3.17Ω which is a 7% increase. On the other hand, the peak power increased to 5.3 W at

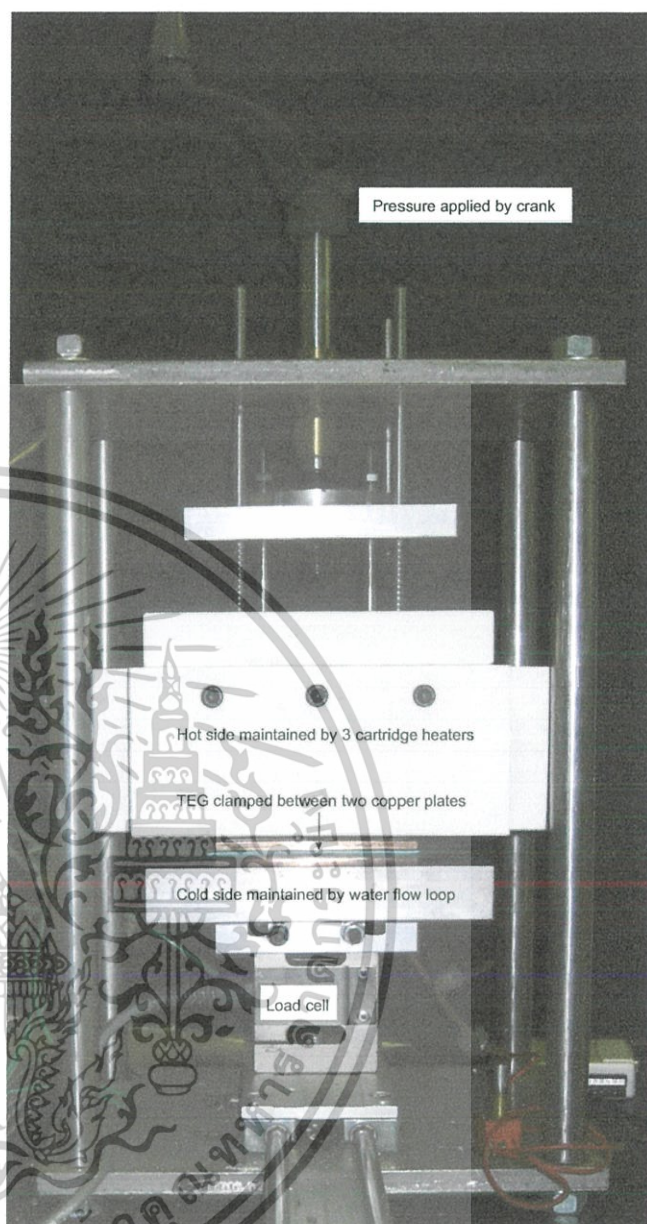


Fig. 6. TEG testing apparatus.

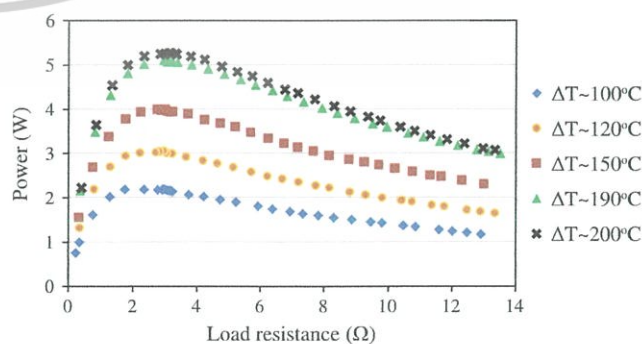


Fig. 7. TEG output power versus load resistance.

$\Delta T_{\text{TEG}} \sim 200$ °C, representing a 1.4-fold increase. The internal resistance of TEG at different temperature gradients is given in Table 5. Fig. 8 illustrates the linear relationship between the voltage across the TEG and the current flowing through it. For a given

ΔT_{TEG} , the intercept with the horizontal axis represents the open circuit voltage (i.e. zero current). Considering Figs. 8 and 9 it can be seen that maximum power was obtained from the TEG when the loaded voltage was equal to half the open circuit voltage as is expected.

When a load was applied to the TEG and current flowed through the circuit, the Peltier effect was observed whereby the

Table 5
Internal resistance of TEG1-12610-5.1.

ΔT_{TEG} (°C)	Internal resistance as specified by manufacturer (Ω)	Tested internal resistance (Ω)
100	2.2	2.95
120	2.6	2.98
150	3	3.02
190	3.2	3.02
200	3.3	3.17

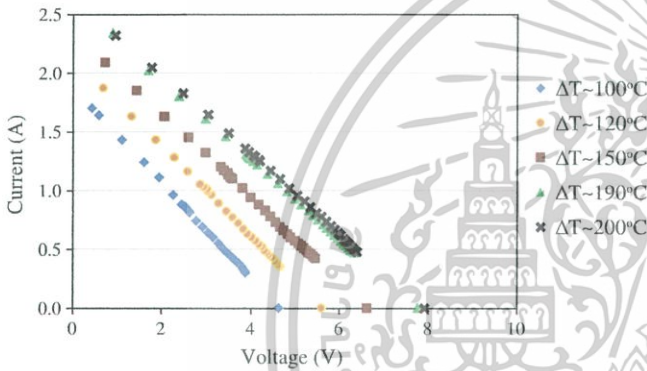


Fig. 8. TEG voltage versus current.

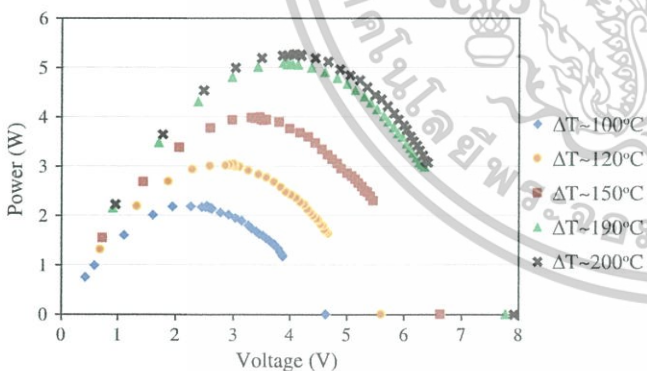


Fig. 9. TEG voltage versus output power.

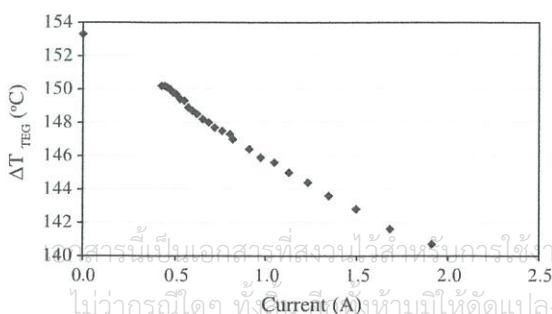


Fig. 10. Peltier effect on TEG temperature differential.

temperature of the hot side decreased and the temperature of the cold side increased. Hence the Peltier effect decreased the temperature gradient across the TEG, reducing the power generated by the Seebeck effect. The temperature gradient across the TEG decreased by 8% when a 1.91 A current flowed through the circuit as shown in Fig. 10. At high currents the Peltier effect was particularly prevalent.

7.2. Direct charging the battery

The next set of experiments involved directly connecting the battery to the TEG (as in Fig. 3), with R_L representing the battery load. Before each experiment, the battery was discharged by connecting 3 Rolson white LED lamps in parallel to the battery. The battery was disconnected when the LEDs turned off, which occurred when the battery was discharged to 2.5 V. This ensured the same starting conditions for each test. The TEG was connected to the battery until the battery voltage reached 3.8 V, the maximum recommended charge voltage specified by the manufacturer. The TEG was then disconnected. The experiment was repeated for a range of temperature gradients across the TEG (100 °C, 120 °C, 150 °C, 190 °C and 200 °C). The current was measured using a 0.005 Ω current sense resistor.

The results demonstrated the flat voltage characteristics of Lithium Iron Phosphate batteries during charging. When the TEG was directly connected to the battery, the voltage across the TEG was equal to the battery voltage, regardless of the temperature gradient across the TEG as demonstrated in Fig. 11.

For 80% of the charge cycle, the battery voltage remained between 3.3 and 3.4 V. The battery voltage then increased exponentially. The TEG was disconnected as soon as the battery voltage reached 3.8 V, however the battery was not fully charged at this point. The current flowing into the battery also remained relatively constant during 80% of the charge cycle and was dependent on the temperature gradient across the TEG as demonstrated in Fig. 12. This indicates that the effective impedance of the battery remains constant over the majority of its charge cycle.

Likewise the power supplied to the battery remained relatively constant during 80% of the charge cycle and was dependent on the temperature gradient across the TEG as demonstrated in Fig. 13.

The results indicate that when the battery was directly connected to the TEG, the matched load condition occurred at $\Delta T_{TEG} \sim 150$ °C, where, as shown in Fig. 14, the effective resistance of the battery was between 2.75 Ω and 3 Ω for the majority of the charging cycle. This was close to the internal resistance of the TEG at $\Delta T_{TEG} \sim 150$ °C as given in Table 5.

It was found that at temperature gradients above 120 °C, the effective resistance of the battery was close to the internal resistance of the TEG. However at temperature gradients below 120 °C, there was a large mismatch between the internal resistance of the TEG and the effective resistance of the battery as illustrated by comparing results in Fig. 14 and Table 5. This resulted in a reduction in the power delivered to the battery. At 120 °C, Fig. 7 previously showed that the maximum power available from the TEG was 3 W while Fig. 13 illustrates that when the battery was directly connected to the TEG, only 2.75 W was delivered to the battery. This suggested that maximum power point tracking would be beneficial for temperature gradients below 120 °C.

7.3. SEPIC DC–DC converter testing

A SEPIC DC–DC converter was connected between the TEG source and lithium iron phosphate battery. Initially, the duty cycle was controlled manually so that the SEPIC could be characterised over its full operating range. A 10 kHz PWM signal was supplied by an Arduino microcontroller which was externally powered.

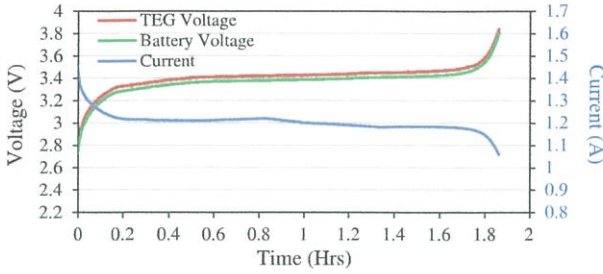


Fig. 11. Direct battery charging with $\Delta T_{TEG} \sim 150^\circ\text{C}$.

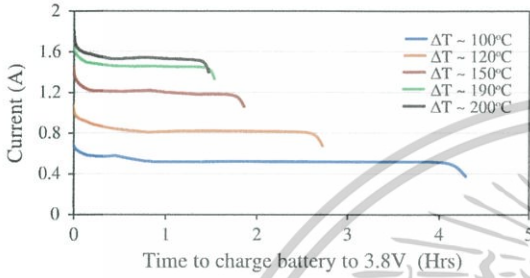


Fig. 12. Current supplied to the battery by direct charging for a range of ΔT_{TEG} .

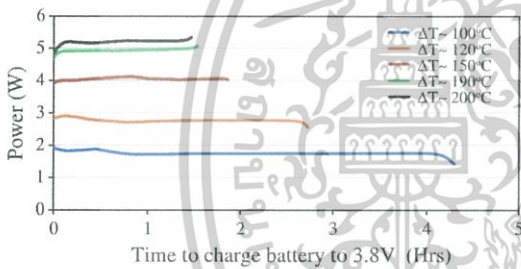


Fig. 13. Power supplied to the battery by direct charging for a range of ΔT_{TEG} .

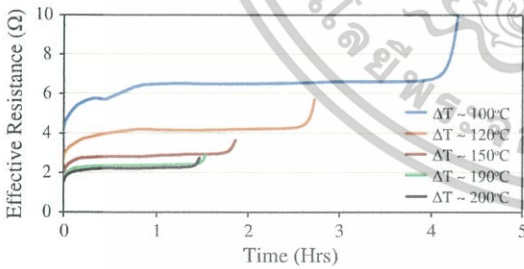


Fig. 14. Effective resistance of the battery for a range of ΔT_{TEG} .

The power delivered to the battery depended on the temperature gradient across the TEG and the duty cycle of the PWM signal as shown below in Fig. 17.

Plotting the maximum values of power from Fig. 17 for each test temperature gradient as shown in Fig. 18, it was found that above $\Delta T_{TEG} \sim 100^\circ\text{C}$, more power was delivered to the battery by direct charging rather than by employing a DC–DC converter. Although there was a large mismatch between the internal resistance of the TEG (2.95 Ω) and the effective resistance of the battery (6.5 Ω) at $\Delta T_{TEG} \sim 100^\circ\text{C}$, it was still comparable to direct charging or using a DC–DC converter. While the DC–DC converter did reduce the impedance mismatch, it also increased losses in the circuit. This highlights that the insertion of a DC–DC converter is not appropriate when the effective resistance of the load is within a certain range of the internal resistance of the TEG.

The temperature range for which a DC–DC converter provides improved performance may be determined by comparing the shortfall in power from the maximum power available (due to impedance mismatch) with DC–DC converter losses. The DC–DC converter should be included if its losses are significantly lower than the maximum power point shortfall. For example, at

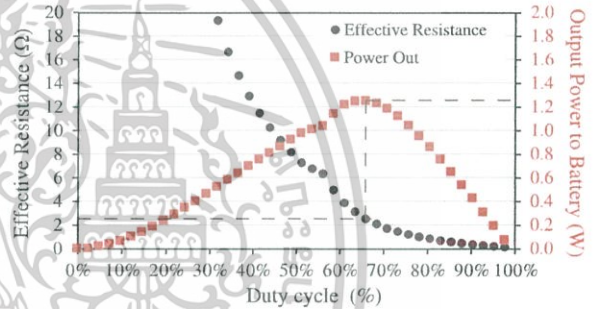


Fig. 15. Effective resistance and output power at $\Delta T_{TEG} \sim 80^\circ\text{C}$ with varying duty cycle.

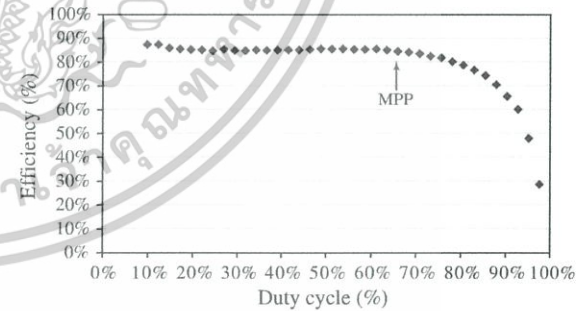


Fig. 16. Efficiency of 10 kHz SEPIC at $\Delta T_{TEG} \sim 80^\circ\text{C}$.

The duty cycle of the PWM signal was incrementally increased from 0% to 100% and the power into and out of the DC–DC converter was measured using digital multimeters. The experiment was repeated for a range of temperature gradients across the TEG.

The effective resistance of the battery load (seen at the output of the SEPIC) decreased with increasing duty cycle as shown in Fig. 15. This is as predicted by Eq. (13) and as expected, maximum power was delivered to the battery when the effective resistance of the load was equal to the internal resistance of the TEG; i.e. 2.6 Ω for $\Delta T_{TEG} \sim 80^\circ\text{C}$.

At the matched load point, the efficiency of SEPIC was 85% as shown in Fig. 16.

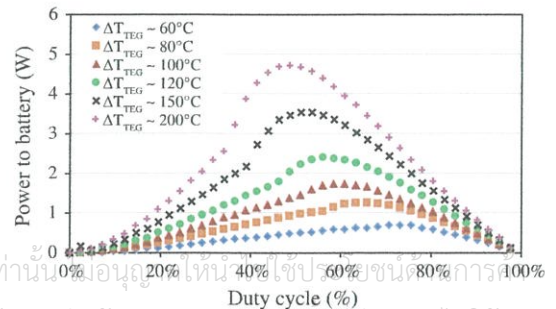


Fig. 17. Power delivered to the battery with SEPIC inserted between the TEG and the battery.

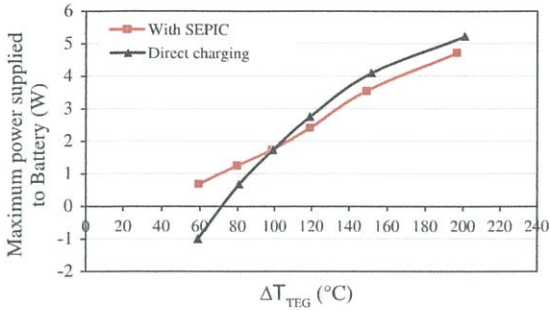


Fig. 18. Comparison of the maximum power delivered to the battery.

$\Delta T_{TEG} \sim 100^\circ\text{C}$, the results of Fig. 9 show that a maximum power of 2.18 W is available, but only 1.74 W is achieved if the TEG operating voltage is fixed at 3.3 V by direct connection of the battery load (see Fig. 13). In this case, a DC–DC converter would provide improved performance if it had losses less than ~ 0.44 W. As shown in Fig. 16, the given SEPIC converter has an efficiency of $\sim 85\%$ which corresponds to losses of ~ 0.33 W for an input power of 2.18 W. Therefore the inclusion of a converter would provide a 0.11 W ($\sim 5\%$) improvement in output power and may be taken as a cut-off point.

In addition to improved output power, Fig. 18 highlights another advantage of inserting a DC–DC converter when the TEG voltage is below the battery voltage. At $\Delta T_{TEG} \sim 60^\circ\text{C}$ the TEG acted as a load and discharged the battery. By inserting a DC–DC converter it was still possible to charge the battery even though the TEG voltage was lower than the battery voltage.

8. Maximum power point tracking algorithms

In order to illustrate the effectiveness of maximum power point tracking, the two algorithms considered were tested on the 10 kHz SEPIC circuit with an 80°C temperature gradient maintained across the TEG; i.e. where the mismatch in source and load impedance is significant. Once the MPPT reached its maximum power point, the duty cycle was held constant for a period of time. This was repeated thirty-three times to ensure repeatability of results. The maximum power delivered to the battery using the Open Circuit Voltage MPPT algorithm was 1.24 W and the minimum power delivered was 1.17 W. The results are illustrated in Fig. 19 below:

The maximum power delivered to the battery using the Combination MPPT algorithm was 1.22 W and the minimum power delivered was 1.07 W. The results are shown in Fig. 20.

There was larger variability in the duty cycle using the Combination MPPT due to the Perturb and Observe element of the technique. Depending on the point in the switching cycle, the current may increase or decrease, irrespective of a change in duty cycle. This slightly distorted the Perturb and Observe effectiveness as a MPPT technique.

Nonetheless, as shown in Fig. 21, both algorithms located close to the maximum power point found in Fig. 17 when the duty cycle was varied manually. In that case, maximum power delivered to the battery was 1.26 W, with a duty ratio of 64%.

The results demonstrated that the Open Circuit Voltage MPPT algorithm on average delivered slightly more power to the battery (1.19 W) than the Combination MPPT algorithm (1.18 W). However both algorithms were close to the maximum power point (1.26 W) and considerably better than direct charging (0.68 W).

9. Discussion

The results illustrated that for temperature gradients above 100°C across the TEG, more power was delivered to the battery

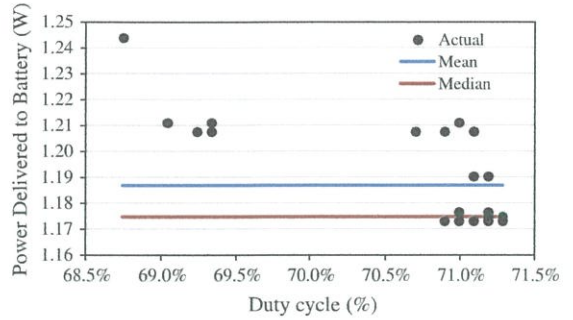


Fig. 19. Power delivered to the battery using the open circuit voltage MPPT algorithm.

by direct charging. For temperature gradients below 100°C , more power was delivered to the battery by employing a DC–DC converter. It was found that either the Open Circuit Voltage MPPT or the Combination MPPT algorithm closely matched the maximum power point.

Therefore, for situations where temperature gradients are above 100°C it is not necessary to employ a DC–DC converter. This is because the battery was carefully selected so that the nominal voltage of the battery was close to the loaded voltage of the thermoelectric module in the expected operating range. Thus, a much simplified circuit is proposed and is discussed below.

In order to protect the battery from over-charge, a simple form of charge protection was designed to limit the battery voltage as shown in Fig. 22. A Schottky diode was placed in front of the battery to prevent it discharging at low temperature gradients across the TEG and a 3.9 V Zener diode was placed in parallel with the battery, to limit the battery voltage. The Zener diode had to be able to take the full output power of the TEG, therefore a 5 W Zener diode was selected.

It was found that when the Zener diode was fully enabled (3.9 V), the current flowing into the battery dropped to zero, fully protecting the battery from overcharge. The major disadvantage

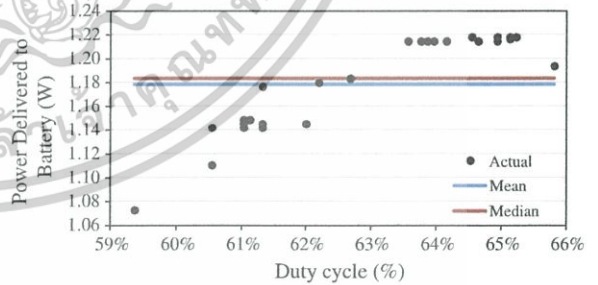


Fig. 20. Power delivered to the battery using the combination MPPT algorithm.

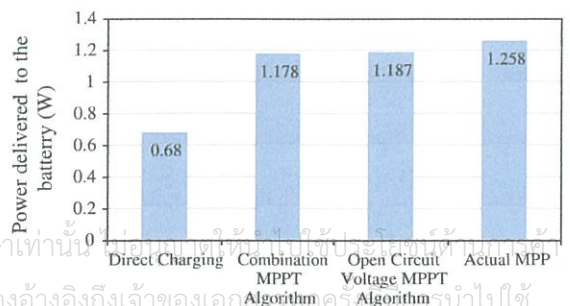


Fig. 21. Power to the battery with $\Delta T_{TEG} \approx 80^\circ\text{C}$.

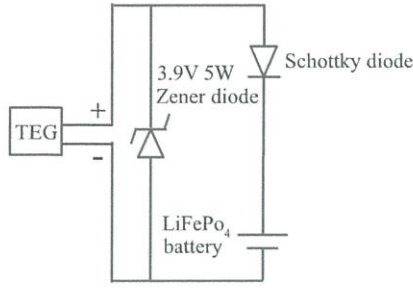


Fig. 22. Charge protection circuitry.

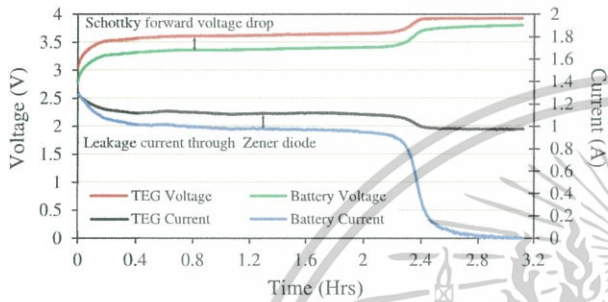


Fig. 23. Charge protection circuit in place, $\Delta T_{TEG} \sim 150^\circ\text{C}$.

of using the Zener diode was that even below the Zener voltage, a significant amount of leakage current flowed through the Zener diode ($\sim 0.14\text{ A}$) as demonstrated in Fig. 23. The specifications of the Zener quoted that the reverse leakage current would be $50\ \mu\text{A}$ at 1 V , but the reverse leakage current was much greater at the battery's nominal voltage (3.3 V).

In Fig. 23, the difference between the TEG current and the battery current was equal to the current flowing through the Zener diode. The reverse leakage current did not vary with charging current. At $\Delta T_{TEG} \sim 100^\circ\text{C}$, when the TEG current was only $\sim 0.43\text{ A}$, the proportion of current leaking through the Zener diode was particularly significant ($\sim 30\%$). However at $\Delta T_{TEG} \sim 200^\circ\text{C}$, the proportion was less significant ($\sim 10\%$).

As shown in Fig. 24, at $\Delta T_{TEG} \sim 100^\circ\text{C}$, it took 3.44 h for the battery voltage to increase from 3.3 V to 3.6 V during direct charging. This increased to 6.5 h with the Zener and Schottky diode in place. The effective resistance of the load increased from $6.5\ \Omega$ (direct charging) to $8.4\ \Omega$ (with charge protection circuit). Thus a larger mismatch existed between the internal resistance of the TEG ($2.95\ \Omega$) and the effective resistance of the load, resulting in reduced power and increased charge time.

At $\Delta T_{TEG} \sim 200^\circ\text{C}$, it took 1.24 h for the battery voltage to increase from 3.3 V to 3.6 V during direct charging and 1.52 h with the Zener diode circuit. In this case, the effective resistance of the load with the charge protection circuit ($2.5\ \Omega$) was closer to the internal resistance of the TEG ($3.17\ \Omega$) than during direct charging ($2.23\ \Omega$). Thus at high temperature gradients across TEG, the charge protection circuit provided better load matching.

Additional features were added to the simple charge protection circuit to increase its safety characteristics as shown in Fig. 25.

A bimetallic thermal switch was connected in series with the battery. The battery was positioned above the thermal switch so that if the battery temperature exceeded 60°C , the bimetallic switch would open, disconnecting the battery from the power source.

Green and red LEDs were placed in parallel with the TEG and battery. The purpose of the green LEDs was to indicate when the battery was fully charged. The purpose of the red LEDs was to

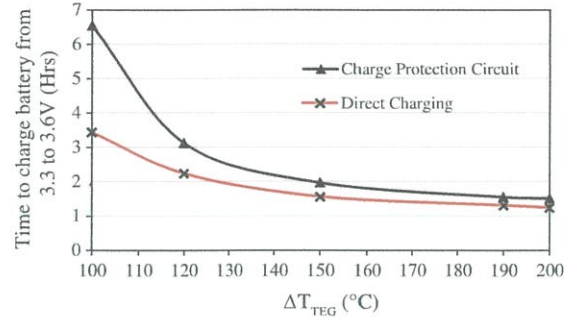


Fig. 24. Time to charge the battery from 3.3 V to 3.6 V for varying ΔT_{TEG} .

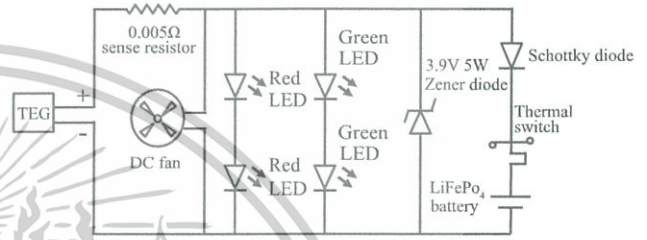


Fig. 25. Final proposed charge protection circuit.

indicate that the TEG was connected. The proposed circuit protected the battery from over-charge. At high temperature gradients across the TEG (close to 200°C), the circuit helped to reduce the mismatch between the internal resistance of the TEG and the effective resistance of the load.

10. Conclusion

In-depth analysis was carried out to deliver maximum power from a single thermoelectric module to a rechargeable lithium iron phosphate battery. It was discovered that at temperature gradients below $\Delta T_{TEG} = 100^\circ\text{C}$, it was beneficial to employ a SEPIC DC–DC converter. However above $\Delta T_{TEG} = 100^\circ\text{C}$ more power was delivered to the battery by direct charging.

For temperature gradients of $150\text{--}200^\circ\text{C}$, the charge protection circuit provides a simple, inexpensive and robust charging solution. This circuit has been used recently by the current authors for a development project whereby a TEG generator system was designed to generate electricity from biomass cookstoves in the developing world [2]. The circuit has proven to work as designed for extended periods of time and the end users charged mobile phones and LED lanterns.

Acknowledgments

The authors would like to gratefully acknowledge Irish Aid, Electric Aid, Cara Malawi, The Irish Research Council for Science & Engineering Technology (IRCSET), and Intel Corporation for their support and contribution to this research, and also Concern Universal for their continued assistance in the field.

References

[1] Riffat SB, Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Appl Therm Eng* 2003;23:913–35.
 [2] O'Shaughnessy SM, Deasy MJ, Kinsella CE, Doyle JV, Robinson AJ. Small scale electricity generation from a portable biomass cookstove: prototype design and preliminary results. *Appl Energy* 2012.

- [3] Lesage FJ, Pagé-Potvin N. Experimental analysis of peak power output of a thermoelectric liquid-to-liquid generator under an increasing electrical load resistance. *Energy Convers Manage* 2013;66:98–105.
- [4] Sandoz-Rosado E, Stevens R. Experimental characterization of thermoelectric modules and comparison with theoretical models for power generation. *J Elect Mater* 2009;38:1239–44.
- [5] Rodríguez A, Vián JG, Astrain D, Martínez A. Study of thermoelectric systems applied to electric power generation. *Energy Convers Manage* 2009;50:1236–43.
- [6] Hodes M. On one-dimensional analysis of thermoelectric modules (TEMs). *IEEE Trans Compon Packag Technol* 2005;28:218–29.
- [7] Hsu CT, Huang GY, Chu HS, Yu B, Yao DJ. An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module. *Appl Energy* 2011.
- [8] Eakburanawat J, Boonyaroonate I. Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique. *Appl Energy* 2006;83:687–704.
- [9] Nagayoshi H, Kajikawa T. Mismatch power loss reduction on thermoelectric generator systems using maximum power point trackers. In: Proceedings of the 25th international conference on thermoelectrics; 2006. p. 210–3.
- [10] Nagayoshi H, Tokumisu K, Kajikawa T. Evaluation of multi MPPT thermoelectric generator system. In: Proceedings of the 26th international conference on thermoelectrics; 2007. p. 318–21.
- [11] Lihua C, Dong C, Yi H, Peng FZ. Modeling and power conditioning for thermoelectric generation. In: Power electronics specialists conference; 2008. p. 1098–103.
- [12] Vieira JAB, Mota AM. Thermoelectric generator using water gas heater energy for battery charging. In: 18th IEEE International conference on control applications; 2009. p. 1477–82.
- [13] Rowe DM. Thermoelectric power generation. *Proce Inst Electr Eng* 1978;125:1113–36.
- [14] Rowe DM. Thermoelectric generators as alternative sources of low power. *Renewable Energy* 1994;5:1470–8.
- [15] Rowe DM, Min G. Evaluation of thermoelectric modules for power generation. *J Power Sources* 1998;73:193–8.
- [16] Brodd RJ. Batteries for sustainability: selected entries from the encyclopedia of sustainability science and technology; Springer; 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้