

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่โค้งงอได้
โดยใช้แผงระบายความร้อนจากสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอัตราเร็วลม

ENHANCE FLEXIBLE THERMOELECTRIC GENERATOR EFFICIENCY
BY PHASE-CHANGE MATERIAL HEATSINK AND WIND SPEED
INTEGRATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2567

KMITL-2024-SC-M-030-011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENHANCE FLEXIBLE THERMOELECTRIC GENERATOR EFFICIENCY
BY PHASE-CHANGE MATERIAL HEATSINK AND WIND SPEED
INTEGRATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-SC-M-030-011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ โค้งงอได้โดยใช้แผงระบายความร้อนจากสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับ อัตราเร็วลม
ชื่อนักศึกษา	นายภณธร อียิปต์
รหัสประจำตัว	64605082
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

บทคัดย่อ

โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นหรือ FTEGs ได้รับความสนใจมากเนื่องจากศักยภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งจากแหล่งต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ FTEGs จำต้องมีแผงระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพและสามารถโค้งงอได้ การวิจัยนี้นำเสนอการสร้างสรรค์แผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานสารเปลี่ยนสถานะ แผงระบายความร้อนถูกสร้างขึ้น 3 ความหนา คือ (4, 7 และ 10 มิลลิเมตร) โดยเน้นการป้องกันการรั่วไหลระหว่างการใช้ และศึกษาผลกระทบของอัตราเร็วลมต่อประสิทธิภาพของ FTEGs ที่มีแผงระบายความร้อนที่โค้งงอได้พบว่า ความหนาของแผงระบายความร้อน เมื่อผนวกกับอัตราเร็วลม สารเปลี่ยนสถานะมีความสามารถในการดูดซับความร้อนที่สูงที่สุดที่ ช่วยให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิได้มากในโมดูล FTEG โดยเฉพาะโมดูลที่ติดตั้งแผงระบายความร้อนที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงกว่าที่เท่าเมื่ออัตราเร็วลมอยู่ที่ 1 เมตรต่อวินาที เทียบกับไม่มีอัตราเร็วลม ผลลัพธ์นี้แสดงถึงความสามารถของแผงระบายความร้อนที่โค้งงอได้บนพื้นฐานสารเปลี่ยนสถานะกับอัตราเร็วลมที่ค่อนข้างต่ำจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่โค้งงอได้มาก และได้มีการประยุกต์ใช้ในการแปลงความร้อนจากท่อความร้อนทรงกระบอกเป็นไฟฟ้าโดยใช้ FTEG ร่วมกับแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานสารเปลี่ยนสถานะเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับสำหรับอุปกรณ์สมาร์ตโฟน

คำสำคัญ : การเก็บเกี่ยวพลังงาน, การแปลงความร้อนเหลือทิ้ง, ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า, สาร

เปลี่ยนสถานะ, โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Enhance Flexible Thermoelectric Generator Efficiency by Phase-Change Material Heatsink and Wind Speed Integration
Student Name	Mr. Phanathagorn Egypt
Student ID	64605082
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2024
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Aparporn Sakulalavek

Abstract

Flexible thermoelectric generators (FTEGs) are gaining attention for their ability to harness waste heat energy from various sources. To enhance their efficiency, efficient and adaptable heatsinks are essential. This study proposes an economical solution by integrating phase-change materials into FTEG heatsinks, focusing on leak prevention. Three flexible phase-change material thicknesses (4 mm, 7 mm, and 10 mm) were evaluated, considering wind speed's impact on performance. Results indicate that proper thicknesses of flexible phase-change materials exhibit excellent heat absorption, especially when accounting for wind speed. Integration of these materials enables significant temperature variations between FTEG modules. For instance, at a wind speed of 1 m/s, a 10 mm thick flexible phase-change material heatsink boosted power density over fourfold compared to no wind. This underscores the potential of integrating phase-change material heatsinks to enhance FTEG efficiency even at low wind speeds. Furthermore, a practical application demonstrates the conversion of waste heat from a hot pipe into electricity, offering a viable power source for smartphones. This research paves the way for effectively converting thermal waste heat into usable electricity, highlighting exciting prospects for integrating flexible thermoelectric modules with phase-change material heatsinks in the future.

Keywords: flexible thermoelectric generators, phase-change materials, waste heat conversion, power density, energy harvesting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความร่วมมือและช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย โดยมีบุคคลดังต่อไปนี้

รศ. ดร. อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งการตรวจแก้บทความทางวิชาการและวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ ทั้งยังคอยช่วยเหลือดูแล ชี้แนะแนวทางการดำเนินชีวิต และการทำงาน เป็นอย่างดีเสมอมา

ผศ.ดร.จิตรภา เกตุแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประธานกรรมการสอบ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาคุมสอบ

ผศ.ดร.เมตตา กิติวรธ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการสอบ ที่ได้คอยให้คำแนะนำ และสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นอย่างดีมาโดยตลอด สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้จัดทำขอมอบให้บิดา มารดา ผู้ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดียิ่ง ถ้าหากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ภณชกร อีลิปต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปรัชญาการค้นพบพื้นฐานเทอร์โมอิเล็กทริก.....	4
2.1.1 เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric).....	4
2.1.2 การประยุกต์ใช้งาน.....	5
2.2 หลักการนำความร้อนของวัสดุ.....	6
2.3 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase-change material).....	6
2.3.1 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ Phase Change Material (PCM).....	7
2.4 แผงระบายความร้อน.....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	15
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด.....	15
3.1.1 การเตรียมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้.....	15
3.1.2 การเตรียมแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้.....	16
3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับระบบทดสอบประสิทธิภาพ.....	18
3.1.4 วิธีการสร้างระบบทดสอบประสิทธิภาพแผงระบายความร้อน.....	22
3.2 วิธีการทดสอบ.....	23
3.3 การประยุกต์การใช้งานจริง.....	23
3.4 วิธีการวิเคราะห์ผล.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	25
4.1 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	25
4.2 ผลการทดลองการใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้รวมเข้ากับแผงระบายความร้อน ที่สามารถโค้งงอได้.....	26
4.2.1 การตรวจสอบการรั่วซึมของสารเปลี่ยนสถานะขณะใช้งาน.....	26
4.2.2 การทดสอบโดยมีสภาวะอัตราเร็วลมคงที่ 2 เมตรต่อวินาที.....	27
4.2.3 การทดสอบผลกระทบของอัตราเร็วลมที่แตกต่างกันกับประสิทธิภาพของ แผงระบายความร้อน.....	32
4.3 การนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	34
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	37
เอกสารอ้างอิง.....	38
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก.....	42
ภาคผนวก ข.....	56
ประวัติผู้เขียน.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของ PCM แต่ละชนิด.....	8
4.1	ความต้านทานไฟฟ้า และ ความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก แบบโค้งงอได้ต้นแบบทั้ง 4 ชั้น.....	27
4.2	การเปรียบเทียบความสามารถของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ กับอิทธิพลของอัตราเร็วลม.....	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.4.1	แผนกระจายความร้อนแบบครีปโลหะ.....9
2.4.2	แผนกระจายความร้อนแบบท่อนำความร้อน.....9
2.4.3	ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ.....10
2.5.1	แผนผังการประดิษฐ์ WTEGs ที่ใช้แสงอาทิตย์ในการช่วยผลิตพลังงาน.....11
2.5.2	การวัดแรงดันวงจรเปิดของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสวมใส่.....11
2.5.3	แผนผังการประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีขั้วอิเล็กโทรดเป็นแผนกระจายความร้อน.....12
2.5.4	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ FTEGs ในการสร้างพลังงานจากมนุษย์เทียบกับงานอื่นๆ.....13
2.5.5	ขั้นตอนการประดิษฐ์แผนกระจายความร้อนโค้งงอได้.....14
2.5.6	ผลการทดสอบแรงดันวงจรเปิดกับแผนกระจายความร้อนที่มีปริมาณสารเปลี่ยนสถานะต่างกัน.....14
3.1	กระบวนการสร้างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอ.....16
3.2	กระบวนการสร้างแผนกระจายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ได้.....17
3.3	ท่อความร้อน.....18
3.4	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....18
3.5	NI cDAQ-9211.....19
3.6	โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K.....19
3.7	RS PRO รุ่น RSDM3055A.....20
3.8	พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง.....20
3.9	Anemometer.....21
3.10	แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....21
3.11	ภาพแผนผังระบบทดสอบประสิทธิภาพแผนกระจายความร้อน.....22
3.12	ระบบทดสอบประสิทธิภาพแผนกระจายความร้อน.....22
3.13	ภาพแผนผังระบบจำลองการใช้งานจริง.....24
3.14	ระบบจำลองการใช้งานจริงเพื่อชาร์จโทรศัพท์.....24
4.1	โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ต้นแบบ 4 ชั้น แต่ละชั้นมีขนาด 3.5 x 3.5 ตารางเซนติเมตร (A-D) อ้างอิงถึงโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4.....26
4.2	การทดลองเพื่อตรวจสอบการรั่วไหลของสารเปลี่ยนสถานะขณะใช้งาน.....27
4.3	ความต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีอัตราเร็วลมคงที่ 2 เมตรต่อวินาที.....28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	แบบจำลองแสดงกลไกภายในวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อดูดความร้อนจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ ลูกศรบ่งบอกถึงการเปลี่ยนสถานะ คือ จากของเหลวเป็นของแข็ง และจากของแข็งเป็นของเหลว.....30
4.5	ภาพถ่ายแผงระบายความร้อนขณะใช้งาน (10 มม.) จากกล้องความร้อน.....31
4.6	ภาพถ่ายแผงระบายความร้อนขณะใช้งาน (7 มม.) จากกล้องความร้อน.....31
4.7	ภาพถ่ายแผงระบายความร้อนขณะใช้งาน (4 มม.) จากกล้องความร้อน.....32
4.8	แรงดันวงจรเปิดจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....32
4.9	ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....33
4.10	ความต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีอัตราเร็วลมที่แตกต่างกัน บนแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะ ความหนา 10 มิลลิเมตร.....34
4.11	ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีอัตราเร็วลมที่แตกต่างกัน บนแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะ ความหนา 10 มิลลิเมตร.....35
4.12	ภาพแผนผังสำหรับการทดสอบการนำไปใช้จริง.....36
4.13	การทดสอบการชาร์จไฟฟ้าให้กับโทรศัพท์ด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อน และ อัตราเร็วลมความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที.....37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความร้อนระดับต่ำ (Low-level heat) คือความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ถือเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างแพร่หลาย แต่มักถูกเพิกเฉยและไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ พลังงานส่วนใหญ่ที่ในอุตสาหกรรมทั่วทั้งโลกถูกสูญเสียไปในรูปของความร้อนระดับต่ำนี้ถึง 72% โดยประมาณ นอกจากนี้ยังมีแหล่งที่มาของความร้อนระดับต่ำตามธรรมชาติอีกด้วย เช่น งานเชิงธรณีวิทยาและพลังงานจากแสงอาทิตย์ ทั้งสองแหล่งนี้มีพลังงานมากกว่าการใช้พลังงานของมนุษย์ทั้งโลกในหนึ่งปี ดังนั้นการใช้ประโยชน์และเก็บสำรองจากพลังงานจำนวนมากจึงเป็นเรื่องที่สำคัญในการสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานมากขึ้น โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (TEGs) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นไฟฟ้าผ่านการใช้ความต่างของอุณหภูมิ ที่ผ่านมามีการค้นคว้าวิธีการหลากหลายเพื่อพัฒนาโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกให้สามารถโค้งงอได้ (FTEGs) ความโค้งงอได้ของ FTEGs เป็นการเพิ่มความสามารถในการนำพลังงานที่สูญเสียจากแหล่งที่มาต่าง ๆ ทั้งในพื้นที่ที่มีลักษณะโค้งหรือไม่เรียบได้ อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับความโค้งงอของ FTEGs เท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับแผงระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพด้วย ดังนั้นแผงระบายความร้อนที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพสูงและโค้งงอได้ จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก แผงระบายความร้อนชนิดโลหะแบบทั่วไปไม่เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับ FTEGs เนื่องจากไม่สามารถโค้งงอได้และมีขนาดใหญ่ ปัจจุบันได้มีแผงระบายความร้อนแบบโค้งงอได้ขึ้นมาแก้ไขปัญหาลแล้ว เช่น แผงระบายความร้อนที่ใช้วัสดุเช่นโพลีเมอร์ดูดซับขนาดใหญ่ (SAP) และ สารดูดความชื้น (solid-state silica gel) กับไฮโดรเจล (hydrogel) ผสมกันเพื่อเป็นตัวเก็บความร้อนจากการระเหยของน้ำและความร้อนสัมผัส แผงระบายความร้อนนี้มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนที่ดี มีความเบาและใช้งานได้ยาวนาน แต่ปัญหาหลักคือการดูแลรักษาโดยต้องมีการเติมน้ำอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แผงระบายความร้อนทำงานอย่างราบรื่น ด้วยเหตุนี้ทำให้ตัวมันเองไม่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติตลอดเวลา นอกจากนี้ยังมีแผงระบายความร้อนที่มีโครงสร้างโค้งงอได้และใช้วัสดุการเปลี่ยนสถานะ (PCM) เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แผงระบายความร้อนนี้สามารถดูดซับหรือปล่อยความร้อนที่มีปริมาณมากขณะเกิดการเปลี่ยนสถานะของตัวเอง ปัญหาหลักในการใช้ PCM คืออาจมีความเสี่ยงในการรั่วไหลขณะละลายเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิระหว่าง 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้อีกหนึ่งทางเลือกที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการระบายความร้อนคือ การรวมแผงระบายความร้อนกับการเคลื่อนที่ของลมที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเข้าด้วยกัน อัตราเร็วลมจะช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้ดียิ่งขึ้นจากการระบายรังสีความร้อนจากแผงระบายความร้อนสู่บรรยากาศ

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้และเพิ่มประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้าด้วยแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้โดยมีพื้นฐานจากวัสดุโพลีเมอร์และสารเปลี่ยนสถานะ โดยในการทดลองมีการเปรียบเทียบความหนาของแผงระบายความร้อนจำลองการใช้งานที่มีสภาวะของอัตราเร็วลมเข้ามาและการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้โดยการใช้สารเปลี่ยนสถานะ
- 2) ศึกษาประสิทธิภาพของแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ผ่านการนำไปใช้งานบนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้
- 3) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้กับปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ที่ได้รับจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้
- 4) ศึกษาผลกระทบของอัตราเร็วลมที่พัดผ่านแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้กับปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้โดยมีพื้นฐานจากโพลีเมอร์และมีสารเปลี่ยนสถานะ พาราฟิน ชนิด RT 42 โดยมีความหนา 3 ค่าคือ 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร
- 2) ในการออกแบบและสร้างแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้โดยมีพื้นฐานจากโพลีเมอร์และมีสารเปลี่ยนสถานะมีเงื่อนไขคือเมื่อสารเปลี่ยนสถานะเมื่อเกิดการละลายเป็นของเหลวจะต้องไม่รั่วไหลออกมาภายนอกและยังคงความสามารถในการโค้งงออยู่
- 3) ประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้ขนาด 3.5×3.5 ตารางเซนติเมตร ที่มีจำนวนตัวเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P และ N รวมกัน 64 ตัว อยู่ในจำนวน 4 ชั้น
- 4) ออกแบบและสร้างระบบการทดสอบที่สามารถให้ความร้อนตั้งแต่ 50 - 80 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้ได้ตลอดการทดสอบ บันทึกอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า และเวลาโดยบันทึกข้อมูลพร้อมกันทุกวินาทีตลอดการทดสอบ
- 5) ทดสอบประสิทธิภาพของแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ที่มีความหนา 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร อุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส บนท่อความร้อนที่มีพื้นผิวโค้ง ให้อัตราเร็วลมคงที่ 2 เมตรต่อวินาที โดยทำการบันทึกแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิและเวลาพร้อมกันเป็นเวลา 60 นาที ควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมด้วยเครื่องปรับอากาศ 25 องศาเซลเซียส
- 6) ทำการจำลองสถานะที่มีอัตราเร็วลมที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราเร็วลมต่อประสิทธิภาพของแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร บันทึกเวลา แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิทั้งสองตำแหน่งที่ด้านล่างและบนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้
- 7) สร้างต้นแบบทดสอบการประยุกต์ใช้ในการชาร์จโทรศัพท์มือถือด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแผงระบายความร้อนหนา 10 มิลลิเมตร และอัตราเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) แผงระบายความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกได้
- 2) สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงระบายความร้อนที่ความหนาต่างกันได้ผ่านปริมาณแรงดันไฟฟ้าจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก
- 3) ทราบถึงผลกระทบของอัตราเร็วลมต่อการระบายความร้อนของแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ได้ที่จะส่งผลกระทบต่อ การสร้างแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้ได้
- 4) สามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ เช่นการชาร์จโทรศัพท์มือถือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเผยแพร่ระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้โดยการใช้สารเปลี่ยนสถานะ โดยแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 2.1 ปรากฏการณ์พื้นฐานทางเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.2 หลักการนำความร้อนของวัสดุ
- 2.3 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase-change material)
- 2.4 แผงระบายความร้อน
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรากฏการณ์พื้นฐานเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)

2.1.1 เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric)

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในทางกลับกันก็ยังสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนได้เช่นกัน สำหรับคำว่า “เทอร์โมอิเล็กทริก” มาจากคำว่า “เทอโม (thermo)” โดยมีความหมายว่าความร้อน และคำว่า “อิเล็กทริก (electric)” โดยมีความหมายว่าไฟฟ้า เมื่อนำความหมายมารวมกันจะเป็น “ความร้อนและไฟฟ้า” ดังนั้นเทอร์โมอิเล็กทริกคือปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยมีวัสดุตัวกลางที่มีคุณสมบัติ เทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric materials) ซึ่งเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน โดยอาศัยหลักการสันสะเทือนของโครงสร้างภายในวัสดุเชิงพิกัสควอนตัม เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างปลายทั้งสองข้าง พบว่ามีการถ่ายเทอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า นั่นคือการสันของอนุภาคโฟนอน (phonon) และการเคลื่อนที่ของพาหะ มีทั้งอิเล็กตรอน (electron) และโฮล (hole) จะได้พลังงานไฟฟ้า ในทางตรงข้ามเมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีความต่างศักย์ไฟฟ้า จะมีการถ่ายเทความต่างศักย์ไฟฟ้าจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะได้พลังงานความร้อน

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect)

เป็นปรากฏการณ์ทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยจะมี 3 ปรากฏการณ์ ได้แก่

- 1.ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) คือ เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด
- 2.ปรากฏการณ์เพลเทีย (Peltier effect) คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า
- 3.ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่มีอุณหภูมิต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสจากจุดเย็นไปยังจุดร้อน หรือจากจุดร้อนไปยังจุดเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาประกอบให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)” โดยเป็นการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ (semi-conductor) ชนิดเอ็น (N-type) และชนิดพี (P-type) มาต่อกันเป็นคู่ ๆ โดยการวางสลับกัน และมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน โดยแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการต่อแบบอนุกรมทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกจนถึงตัวสุดท้าย และด้านบนกับด้านล่างจะถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก เมื่อนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แล้วให้อุณหภูมิแผ่นเซรามิกด้านบนและด้านล่างที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โมดูลผลิตได้ และเมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (load) หรือภาระไฟฟ้า จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลตามปรากฏการณ์ของซีเบค โดยทั่วไปจะเรียกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator ; TEG) ในทางกลับกันเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนรวมถึงที่ผิวด้านล่าง ตามปรากฏการณ์ของเพลเทีย โดยทั่วไปเรียกเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง (Thermoelectric cooling ; TEC)

2.1.2 การประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์การใช้งานอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก หรือเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล สามารถนำมาใช้งานได้ 2 ลักษณะได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนหรือเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง

1.) เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์

เป็นการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ซีเบค โดยสามารถใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนได้ ซึ่งเป็นการใช้พลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการต่างๆ นำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น ความร้อนจากท่อไอเสียรถยนต์ ความร้อนจากหม้อต้มน้ำ ความร้อนสูง ความร้อนจากแดด ความร้อนที่เกิดจากภาวะโลกร้อน หรือความร้อนจากร่างกายมนุษย์ เป็นต้น

2.) เทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง

เป็นการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์เพลเทีย โดยสามารถใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาผลิตพลังงานความร้อนหรือทำความเย็นจากพลังงานไฟฟ้าได้ เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำความร้อนหรือความเย็นตามที่ต้องการ เช่น ตู้แช่เย็นในรถยนต์ ชุดระบายความร้อนของ CPU แก้วนำความร้อน หรือลูกประคบร้อน เป็นต้น

2.2 หลักการนำความร้อนของวัสดุ

การนำความร้อนของวัสดุ เป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายโอนความร้อนมี 3 ลักษณะดังนี้

1. การนำความร้อน คือ เป็นกระบวนการที่พลังงานความร้อนถูกส่งผ่านผ่านสื่อนำความร้อน เช่น อากาศหรือน้ำ โดยการเคลื่อนที่ของสื่อนำความร้อนนั้นทำให้พลังงานความร้อนถูกพาไปยังส่วนอื่นของสื่อหรือส่วนของสิ่งแวดล้อม โดยธรรมชาติและการทำงานของเครื่องมือหลายอย่าง ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในหลายแบบ เช่น การเคลื่อนที่ของอากาศหรือน้ำที่ร้อนขึ้นและเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวที่เย็นกว่า หรือการเคลื่อนที่ของอากาศหรือน้ำที่เย็นลงและเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวที่ร้อน

2. การพาความร้อน คือ เป็นกระบวนการที่พลังงานความร้อนถูกส่งผ่านผ่านวัสดุหรือสิ่งของต่าง ๆ โดยการสัมผัสของอนุภาคภายในวัสดุ เมื่อวัสดุอุณหภูมิสูงและวัสดุใกล้กับแหล่งความร้อน อนุภาคภายในวัสดุจะเคลื่อนที่เรื่อย ๆ และส่งพลังงานความร้อนให้กับอนุภาคที่อยู่ใกล้ ๆ ซึ่งทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น การพาความร้อนมักเกิดขึ้นในวัสดุที่มีที่สัมผัสกับแหล่งความร้อน เช่น เหล็ก โลหะ ทิน หรือวัสดุอื่น ๆ ซึ่งสามารถนำความร้อนจากส่วนที่ร้อนไปยังส่วนที่เย็นของวัสดุได้ โดยไม่เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุนั้น ๆ

3. การแผ่รังสีความร้อน คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อพลังงานความร้อนถูกส่งผ่านออกมาจากแหล่งร้อน โดยมักใช้รังสีอินฟราเรดหรือรังสีอื่น ๆ การแผ่รังสีความร้อนนั้นสามารถทำให้วัสดุหรือสิ่งแวดล้อมรอบข้างมีการทำงานเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโมเลกุลได้ ซึ่งอาจเป็นผลจากการกระจายพลังงานความร้อนในรูปแบบของความร้อนและแสง การแผ่รังสีความร้อนมีความสำคัญเนื่องจากมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การทำงานของสิ่งมีชีวิต และการทำงานของวัสดุในสถานการณ์ต่างๆ ตัวอย่างเช่น ในการอบอาหารโดยใช้เตาไมโครเวฟที่ส่งผ่านพลังงานความร้อนผ่านการแผ่รังสีอินฟราเรดเพื่อทำให้อาหารร้อนขึ้น หรือการทำความร้อนของโลหะที่วางบนพื้นผิวที่ร้อน โดยการสัมผัสกับพลังงานความร้อนที่ถูกแผ่ระหว่างโลหะและพื้นผิวโดยตรง

2.3 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase-change material)

วัสดุเปลี่ยนสถานะ phase change material (PCM) เป็นวัสดุที่ผ่านการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว โดยเรียกลักษณะการเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวและของเหลวกลับเป็นของแข็งนี้ว่า “วัฏจักรการละลายและการแข็งตัว (Melting-solidification cycle)” โดยวัสดุจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ด้วยการดูดซับพลังงานความร้อนจากรอบๆ วัสดุในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุคงที่หรือเกือบจะคงที่และในทางกลับกัน เมื่อวัสดุถ่ายเทพลังงานความร้อนออกจากตัววัสดุเองก็จะกลับคืนสู่สภาวะของแข็ง วัสดุเปลี่ยนสถานะแต่ละประเภทจะมีจุดเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกัน พลังงานที่ดูดซับมาและคายออกในวัฏจักรการละลายและการแข็งตัวรู้จักในชื่อ “ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (latent heat of fusion)” ความร้อนแฝงเป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการนี้โดยพลังงานความร้อนของวัสดุจะเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันอุณหภูมิของวัสดุก็จะไม่ถูกเพิ่มขึ้นไปด้วย ในทางกลับกันความร้อนสัมผัส (Sensible) คือความร้อนที่ส่งผลกลับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุในกระบวนการทางความร้อนตามมาตรฐานอาจเริ่มด้วยวัสดุที่มีความเย็นแล้วจึงได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลวผ่านความร้อนที่เหมาะสม เป็นกระบวนการความร้อนที่เปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวผ่านความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสก็จะเพิ่มอุณหภูมิให้จุด

เดือด เมื่อถึงจุดเดือดของเหลวก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำผ่านความร้อนแฝงของการระเหย (Latent heat of vaporization) เป็นการเปลี่ยนสถานะแบบเสีจสมบูรณ์

ทั้งนี้ปริมาณของการดูดหรือคายพลังงานความร้อนในระหว่างวัฏจักรการละลายและการแข็งตัวจะขึ้นอยู่กับค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของวัสดุความร้อนแฝงของการหลอมเหลวจะมีหน่วยเป็น J/g หรือ kJ/kg

2.3.1 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ Phase Change Material (PCM)

วัสดุเปลี่ยนสถานะ แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ประเภทสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic)

1) Organic PCM (สารอินทรีย์)

สารอินทรีย์มีชนิดที่นิยมมากที่สุดในการนำมาใช้เป็น PCM ประกอบด้วย แอลเคน(Alkane) (C_nH_{2n+2}) แอลเคนมีอีกชื่อหนึ่งว่า พาราฟิน (Paraffin) หรือเรียกรวมๆว่า พาราฟินซีรี่ (Paraffin Series) และกรดไขมัน ($CH_3(CH_2)_nCOOH$) สารอินทรีย์อยู่ในสถานะพร้อมใช้งานและมีราคาถูก อีกทั้งยังนำมาใช้งานได้ง่าย พาราฟิน(Paraffin) ได้รับความนิยมนมากในวงการการศึกษาทางด้านการจัดการความร้อนโดยจุดเปลี่ยนสถานะหรือหลอมเหลวของพาราฟินสามารถพบได้ตั้งแต่ 35-70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้จุดหลอมเหลวจะมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนที่เฉพาะเจาะจง การเลือกใช้จะหลอมเหลวจึงเป็นไปตามการใช้งานนั้นๆ ส่วนกรดไขมันมีคุณสมบัติที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าพาราฟิน ถูกพัฒนามาใช้ในเส้นใยโพลีอะคริไนด์ไนไตรล์ (Polyacrylonitrile) ในการใช้ PCM ในกลุ่มถูกนิยมใช้เป็นวัสดุเก็บสะสมพลังงานในวัสดุอาคาร เนื่องจากช่วยในการลดต้นทุนในการใช้เครื่องปรับอากาศ อีกทั้งสารอินทรีย์ยังมีค่าความร้อนแฝงที่สูง ทำให้สามารถจัดเก็บพลังงานในมวลขนาดเล็ก แต่ช่วยการหลอมละลายของกรดไขมันมีน้อยกว่าพาราฟิน โดยสามารถในการกักเก็บพลังงานความร้อนของพาราฟินโดยทั่วไปอยู่ที่ 200-300 kJ/kg ในขณะที่กรดไขมันสามารถกักเก็บได้ 100-200 kJ/kg ในเชิงพาณิชย์จึงนิยมใช้พาราฟินมากกว่ามีการจำหน่ายในวงกว้างในท้องตลาด

2) Inorganic (สารอนินทรีย์)

เป็น PCM ชนิดสารอนินทรีย์จำพวกเกลือ (Salt) และเกลือไฮเดรต (Salt Hydrates) ทั้งสองมีลักษณะที่คล้ายกัน จุดเปลี่ยนสถานะหรือจุดหลอมเหลวมีช่วงที่กว้างมากตั้งแต่ 10-900 องศาเซลเซียส ช่วงจุดเปลี่ยนสถานะที่การทับซ้อนกันบางช่วงของพาราฟินและกรดไขมัน แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้เกลือและเกลือไฮเดรตเป็นที่นิยมมากกว่าในจุดเปลี่ยนสถานะที่สูงโดยการเลือกใช้ PCM ชนิดสารอนินทรีย์ จะถูกนำมาใช้ในลักษณะงานที่มีจุดเปลี่ยนสถานะที่สูงมากเช่นกัน งานเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

สารอนินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงที่จุดเปลี่ยนสถานะที่รวดเร็วแทนที่จะค่อยๆเปลี่ยนสถานะสารอนินทรีย์มีความร้อนแฝงใกล้เคียงกับสารอนินทรีย์ แต่มีการนำความร้อนที่สูงกว่าสารอนินทรีย์มีความหนาแน่นที่สูงกว่าสารอินทรีย์ ซึ่งจะเป็นผลดีหรือผลเสียก็แล้วแต่การใช้งาน โดยความหนาแน่นที่สูงขึ้นทำให้มวลมากขึ้นไปด้วย ซึ่งนั่นหมายถึงความหนาแน่นของพลังงานก็จะมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เนื่องจากพลังงานถูกเก็บไว้บนพื้นฐานของ มวล/หน่วย ซึ่งเป็นข้อดีของสารชนิดนี้ แต่ถึงกระนั้นการเพิ่มของมวลก็จะส่งผลถึงน้ำหนักที่ตามมา ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมแก่งานที่ให้ความสำคัญต่อ

เรื่องน้ำหนักมวลสาร แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ข้อดีเหล่านั้นการเลือกใช้สารอินทรีย์ก็ถูกจำกัดด้วยช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงมาก จึงเป็นข้อจำกัดของสารชนิดนี้

ปัญหาที่สำคัญของสารชนิดนี้คือความไม่เสถียรของเกลือไฮเดรต เนื่องด้วยมีสารประกอบที่มีโมเลกุลของน้ำอยู่ด้วย จึงมีแนวโน้มที่จะมีการคายน้ำออกมาในระหว่างการนำความร้อนนำไปสู่การสลายตัวของตัวสารอินทรีย์เองและอาจส่งผลให้เกิดเกลือมีการแตกตัวออกจากกัน การเลือกใช้สารอินทรีย์จำเป็นต้องระมัดระวังผลกระทบจากตัวสารอินทรีย์มีแนวโน้มสูงที่เกิดสถานะ Super Cooling หมายถึงตัวสารไม่ได้เป็นของแข็งแต่เริ่มต้น แต่อาจจะต้องใช้กรรมวิธีให้สสารนั้นแข็งก่อนอาจจะด้วยการแช่แข็งอันเนื่องมาจากความไม่เสถียรของสารและอาจจะส่งผลต่อวัฏจักรการหลอมละลายของ PCM ในครั้งต่อไป

เนื่องจาก PCM มี 2 ประเภทหลักคือ ประเภทสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) โดยแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามองค์ประกอบทางเคมีในสารนั้นๆ ในการเลือกจึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดตามแต่ละชนิดงาน จึงได้รวบรวมคุณสมบัติของ PCM แต่ละชนิดไว้ในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของ PCM แต่ละชนิด

Classification	inorganic	organic
Advantage	High volumetric latent heat storage capacity Availability and low cost Non-flammable High thermal conductivity High heat of fusion	High heat of fusion Availability in a large temperature range Safe and non-reactive Non-Corrosion Carbohydrate and lipid based PCMs can be produced from renewable sources. Non-Supercooling Non-Undercooling
Disadvantages	Change of volume is very high. Super cooling is a major problem in solid-liquid transition. Corrosion	Flammable: This can be partially alleviated by specialist containment Volumetric latent heat storage capacity can be low. Low thermal conductivity in their solid state

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แผงระบายความร้อน

แผงระบายความร้อน (Heatsink) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการลดความร้อนที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น CPU, GPU, หรือชิปอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ที่มีการทำงานอย่างมาก โดยหลักการหนึ่งของ heatsink คือการนำความร้อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และพาความร้อนนั้นไปส่งให้กับอากาศโดยใช้พื้นผิวที่มีพื้นที่มากขึ้น เพื่อให้ความร้อนนั้นไปแพร่กระจายในอากาศได้มากขึ้น ทำให้เกิดการระบายความร้อนได้ดีขึ้น Heatsink สร้างขึ้นจากวัสดุที่มีความนำความร้อนได้ดี เช่น อลูมิเนียมหรือทองแดง (Copper) เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมในการส่งความร้อน Heatsink มีด้วยกันหลายรูปแบบตามการออกแบบและการใช้งานต่าง ๆ เช่น:

1. รูปแบบครีบลโลหะ (Finned Heatsinks): มีรูปร่างเป็นแผ่นบางแบ่งเป็นช่อง ที่จัดเรียงตามแนวระบายความร้อน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับอากาศ ทำให้ความร้อนระบายได้ดีขึ้น

รูปที่ 2.4.1 แผงระบายความร้อนแบบครีบลโลหะ

2. ท่อนำความร้อน (Heat Pipes): มีท่อที่มีสารที่สามารถสะสมและนำความร้อนเคลื่อนที่ข้ามแผ่น heatsink เพื่อช่วยในการลดความร้อนได้อย่างมาก

รูปที่ 2.4.2 แผงระบายความร้อนแบบท่อนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Liquid Cooling): ใช้น้ำหรือสารทำความเย็นในการระบายความร้อนจากอุปกรณ์ โดยการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อ น้ำหรือท่อที่มีสารทำความเย็นไปยัง heatsink ที่มีพื้นที่ผิวใหญ่



รูปที่ 2.4.3 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

การระบายความร้อนของ heatsink จะเกิดขึ้นโดยการส่งความร้อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ใต้ heatsink มาสัมผัสกับพื้นผิวของ heatsink เพื่อให้ความร้อนถูกส่งออกไปในอากาศโดยใช้พัดลมหรือโดยการเคลื่อนที่ของอากาศ ซึ่งสิ่งนี้จะช่วยในการลดความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Operation of Wearable Thermoelectric Generators Using Dual Sources of Heat and Light

Myeong Hoon Jeong, Kwang-Chon Kim, Jin-Sang Kim, and Kyoung Jin Choi

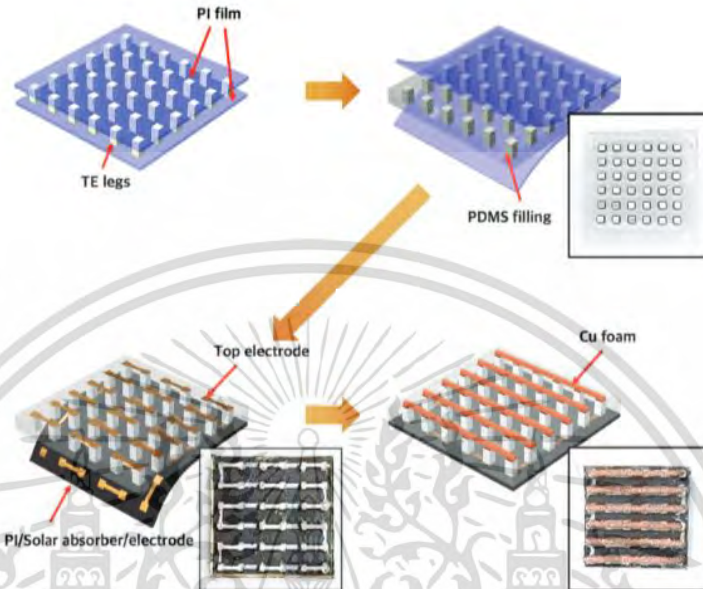
งานวิจัยนี้เสนอการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (thermoelectric generators) สำหรับสวมใส่ (wearable) เพื่อสร้างพลังงาน โดยใช้แหล่งความร้อนและแสงสว่างเป็นแหล่งพลังงานพร้อมกัน โดยทั่วไป เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จะใช้แค่แหล่งเดียวในการสร้างพลังงาน ซึ่งอาจจะมีข้อจำกัดในการสร้างพลังงานในสถานะที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิไม่มากพอ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้แหล่งความร้อนและแสงสว่างพร้อมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างพลังงาน ทำให้สามารถใช้งานได้มากขึ้นในสถานการณ์ที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิและแสงสว่าง เช่น เวลาที่ได้รับแสงแดดและอุณหภูมิร่างกายสูง และใช้ความร้อนจากกิจกรรมที่ก่อให้เกิดความร้อนเช่นการออกกำลังกาย งานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการพัฒนา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและช่วยลดการใช้พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่และอุปกรณ์ต่าง ๆ

ขั้นตอนการประดิษฐ์ WTEGs เริ่มด้วยการวางชิ้นส่วนเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P และ N ระหว่างแผ่นฟิล์มโพลีเอไมด์ (PI) จากนั้นใส่ polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer ระหว่างแผ่นฟิล์มโพลีเอไมด์เพื่อเป็นโครงสร้างให้ชิ้นส่วนเทอร์โมอิเล็กทริก ลอกแผ่นฟิล์มออกและวาง

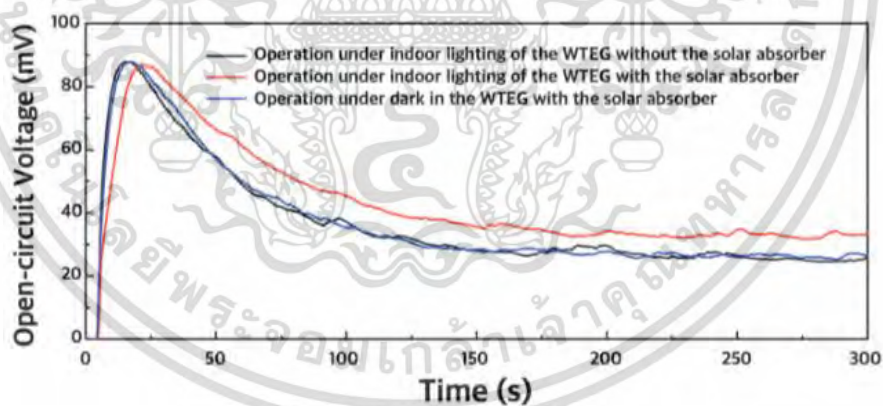
ขั้วไฟฟ้าเงินลงด้านบน PDMS โดยมีนิกเกิลเคลือบอยู่เพื่อเพิ่มการยึดเกาะ และนำแผ่นดูดซับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์ที่ถูกสร้างจากซิลิโคนที่มีความสามารถในการดูดซับแสงอาทิตย์ที่ 95% ปิดทับลงบนแผ่น (PI) แผงระบายความร้อนจากโพมทองแดงที่มีการนำความร้อนและพื้นที่ผิวมาก ถูกติดตั้งลงบนแผ่น (PI) เพื่อช่วยระบายความร้อน เพิ่มความต่างอุณหภูมิ และ กำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 2.5.1 แผนผังการประดิษฐ์ WTEGs ที่ใช้แสงอาทิตย์ในการช่วยผลิตพลังงาน



รูปที่ 2.5.2 การวัดแรงดันวงจรเปิดของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสวมใส่

เมื่อได้รับแสงแดด แรงดันไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสวมใส่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วลดลงเรื่อยๆ และคงที่อยู่ที่ระดับประมาณ 60 มิลลิโวลต์ การลดแสงแดดจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วและกลับไปสู่ระดับเริ่มต้นประมาณ 30 มิลลิโวลต์ แม้ว่า จะไม่ได้รับแสงแดดโดยตรง โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดสวมใส่ที่มีแผ่นดูดซับแสงอาทิตย์ยังสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้เล็กน้อย

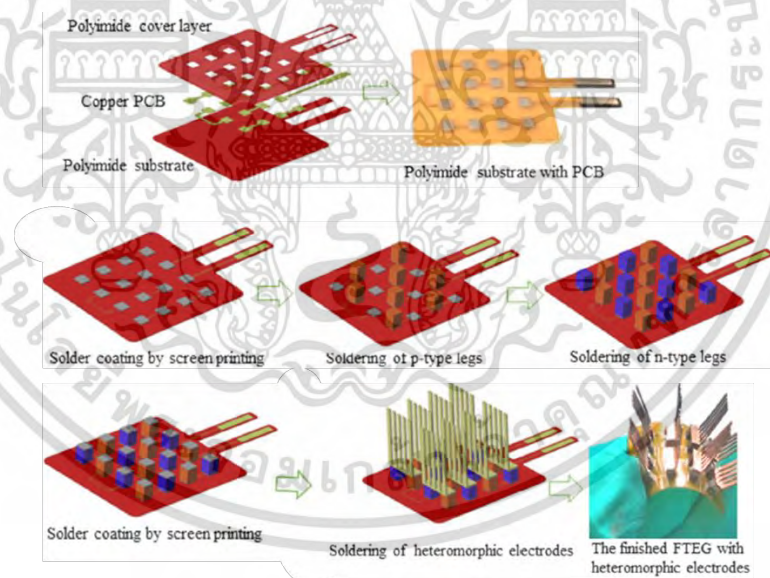
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High performance flexible thermoelectric generator using bulk legs and integrated electrodes for human energy harvesting

Nianling Kuang, Aijia Niu, Wei Wang, Zhengxing Zuo, Tianzhuo Zhan, Haidong Wang

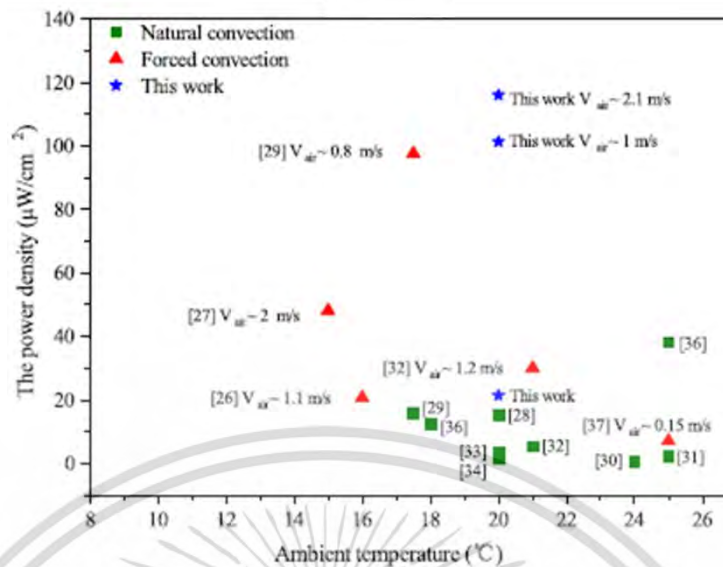
งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถใช้งานในสถานการณ์ที่ต้องการความโค้งงอ โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกนี้ใช้ชิ้นส่วนเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P และ N ขนาดใหญ่ (bulk legs) ที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นพื้นฐาน พร้อมทั้งมีขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นแผงระบายความร้อนในตัว โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกนี้มีความโค้งงอและประสิทธิภาพสูงในเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการเก็บรวบรวมพลังงานจากมนุษย์ในสถานการณ์ที่ต้องการความโค้งงอ เช่น ในเครื่องแต่งกายหรืออุปกรณ์พกพา หรือ การเก็บรวบรวมพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ในการสวมใส่

การประดิษฐ์โมดูลนี้เริ่มต้นโดยการทำวงจรถ่ายที่สามารถโค้งงอได้ด้วยแผ่นทองแดงหนา 0.035 มิลลิเมตร จากนั้นนำโพลีเอไมด์ (PI) หนา 0.025 มิลลิเมตร ที่มีช่องว่างตามวงจรถ่ายประกบด้านบน ด้านล่างใช้โพลีเอไมด์ (PI) ความหนา 0.05 มิลลิเมตร ปิดด้านล่างของวงจรถ่าย เคลือบน้ำยาประสานความหนา 0.1 มิลลิเมตร ลงบนวงจรถ่ายและวางชิ้นส่วนเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P และ N ตามลงไปและบัดกรีด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ทำการเคลือบน้ำยาประสานอีกครั้งและวางขั้วอิเล็กโทรดที่มีแผงระบายความร้อนในตัวลงบนชิ้นส่วนสารเปลี่ยนสถานะ บัดกรีเพื่อเชื่อมต่ออีกครั้ง



รูปที่ 2.5.3 แผนผังการประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีขั้วอิเล็กโทรดเป็นแผงระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ FTEGs ในการสร้างพลังงานจากมนุษย์เทียบกับงานอื่นๆ

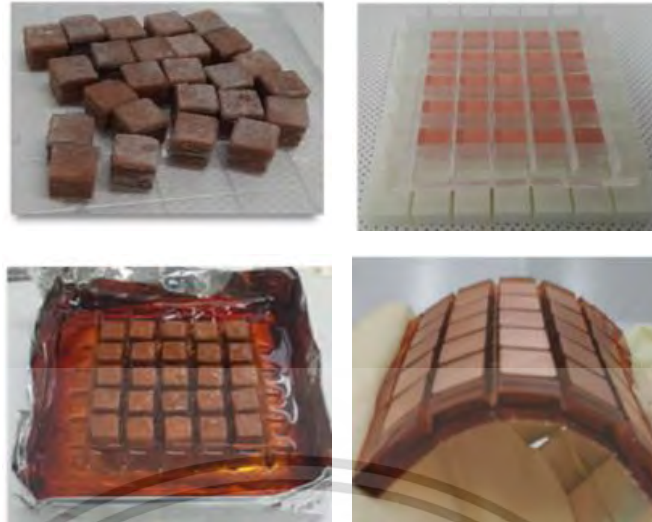
FTEGs ที่มีขั้วอิเล็กโทรดเป็นแผงระบายความร้อนมีค่าสูงกว่างานอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ เหตุผลหลักคือขั้วอิเล็กโทรดที่มีแผงระบายความร้อนในตัวสามารถเพิ่มกระจายความร้อนให้กับฝั่งเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกได้โดยตรง ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสามารถขึ้นไปได้ถึง 116.1, 101.3 และ 21.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรขึ้นอยู่กับพื้นที่ของโมดูลโดยมีอัตราเร็วลม 2, 1 และ ไม่มีลม ตามลำดับ

Flexible heatsink based on a phase-change material for a wearable thermoelectric generator.

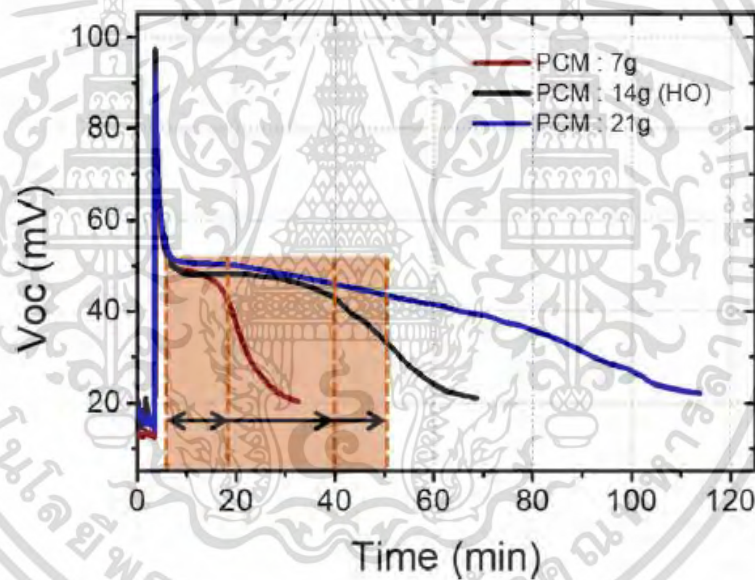
Gyusoup Lee, Choong Sun Kim, Seongho Kim, Yong Jun Kim, Hyeongdo Choi, Byung Jin Cho

การวิจัยนี้นำเสนอแผงระบายความร้อนสำหรับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่โค้งงอได้ โดยใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นที่เก็บความร้อน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้แผงระบายความร้อนที่โค้งงอได้และใช้วัสดุที่เปลี่ยนสถานะเป็นที่เก็บความร้อน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกได้

ขั้นตอนการประดิษฐ์แผงระบายความร้อน เริ่มจากการนำโฟมทองแดงขนาด $1 \times 1 \times 0.5$ ลูกบาศก์เซนติเมตรมาเติมด้วยสารเปลี่ยนสถานะเหลว และ ปลอ่ยให้เย็นตัวด้านบนและล่างของเบ้าหล่อวางด้วยแผ่นโลหะโดยจัดเรียงเป็นตารางขนาด 5×5 ช่อง จากนั้นเทพอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยางลงในเบ้าหล่อให้เต็มช่องว่าง หลังแข็งตัวแกะออกจากเบ้าหล่อ



รูปที่ 2.5.5 ขั้นตอนการประดิษฐ์แผงระบายความร้อนโค้งงอได้



รูปที่ 2.5.6 ผลการทดสอบแรงดันวงจรเปิดกับแผงระบายความร้อนที่มีปริมาณสารเปลี่ยนสถานะต่างกัน

การเพิ่มปริมาณสารเปลี่ยนสถานะในแผงระบายความร้อนมีผลทำให้เวลาในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณของแรงดันวงจรเปิดไม่ได้เพิ่มขึ้นสอดคล้องกันตามสัดส่วนของสารเปลี่ยนสถานะ เนื่องจากการดูดซับความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงในขณะเปลี่ยนสถานะไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนตามปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะ ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการที่สารเปลี่ยนสถานะมีการนำความร้อนที่ต่ำ ทำให้ภายในแผงระบายความร้อนเกิดการกระจายอุณหภูมิไม่ทั่วถึงกันทุกส่วน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน

1. ศึกษา ออกแบบและสร้างแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ได้โดยมีพื้นฐานจากวัสดุโพลีเมอร์และสารเปลี่ยนสถานะ
2. สร้างไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้
3. ออกแบบและสร้างระบบทดสอบประสิทธิภาพแผงระบายความร้อนผ่านการสร้างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจากไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก
4. ทดสอบประสิทธิภาพของแผงระบายความร้อนความหนา 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร และไม่มีแผงระบายความร้อนผ่านการสร้างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้โดยมีอัตราเร็วลมคงที่ 2 เมตรต่อวินาที
5. วิเคราะห์ แรงดันวงจรเปิด ความต่างของอุณหภูมิและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าขาออก ของไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้ของแผงระบายความร้อนแต่ละความหนา
6. ใช้แผงระบายความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร นำไปทดสอบผลกระทบของอัตราเร็วลมต่อประสิทธิภาพของการกำเนิดไฟฟ้าจากไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกโดยให้อัตราเร็วลมตั้งแต่ 0, 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที
7. ออกแบบและสร้างระบบจำลองการใช้งานจริงสำหรับการชาร์จโทรศัพท์มือถือ

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

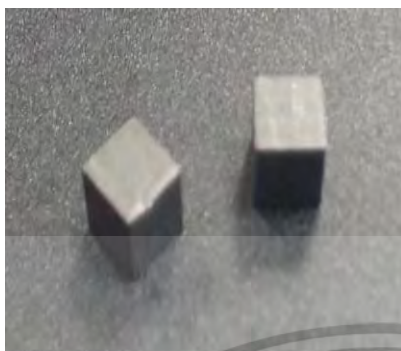
อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น การเตรียมไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้ การเตรียมแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ได้ อุปกรณ์ – เครื่องมือสำหรับระบบทดสอบประสิทธิภาพและระบบจำลองการใช้งานจริง

3.1.1 การเตรียมไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้

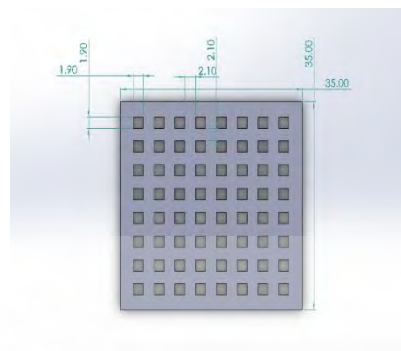
1. เตรียมแผ่นซิลิโคนขนาด $3.5 \times 3.5 \times 0.2$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีการเจาะรูสี่เหลี่ยมขนาด $2 \times 2 \times 2$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร จำนวน 64 ช่อง จัดเรียงแบบ 8×8 ช่อง จากบริษัท Fantastic Triumph Co., Ltd., Bangkok, Thailand
2. บรรจุตัวเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด P และ N ที่ผลิตจาก บิทมัสเทลูไรด์จากบริษัท Wuhan Xinrong New Materials Co., Ltd., Wuhan, China โดยทั้งสองด้านมีนิเกิลความหนา 4 ไมโครเมตร จาก Siam Jin Charoen Enterprise Co., Ltd., Samut Prakan, Thailand เคลือบอยู่บนหน้าทั้งสองด้าน
3. หยอดน้ำยาประสาน $\text{Sn}_{0.955}\text{Ag}_{0.038}\text{Cu}_{0.007}$ จากบริษัท Chip Quik, NY, USA ด้วยเครื่องหยดอัตโนมัติลงบนตัวเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละตัว เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องหยดอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

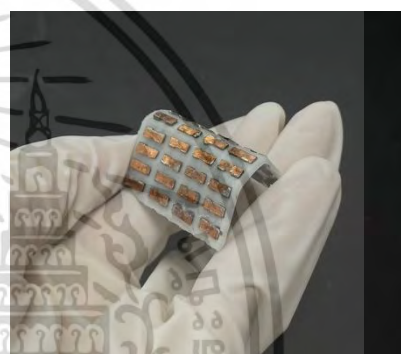
4. ใช้แผ่นทองแดงความหนา 0.1 มิลลิเมตร วางเป็นตัวเชื่อมระหว่างตัวเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละตัวจากนั้นใช้ความร้อนเชื่อมติดกันแบบอนุกรม



(a)



(b)



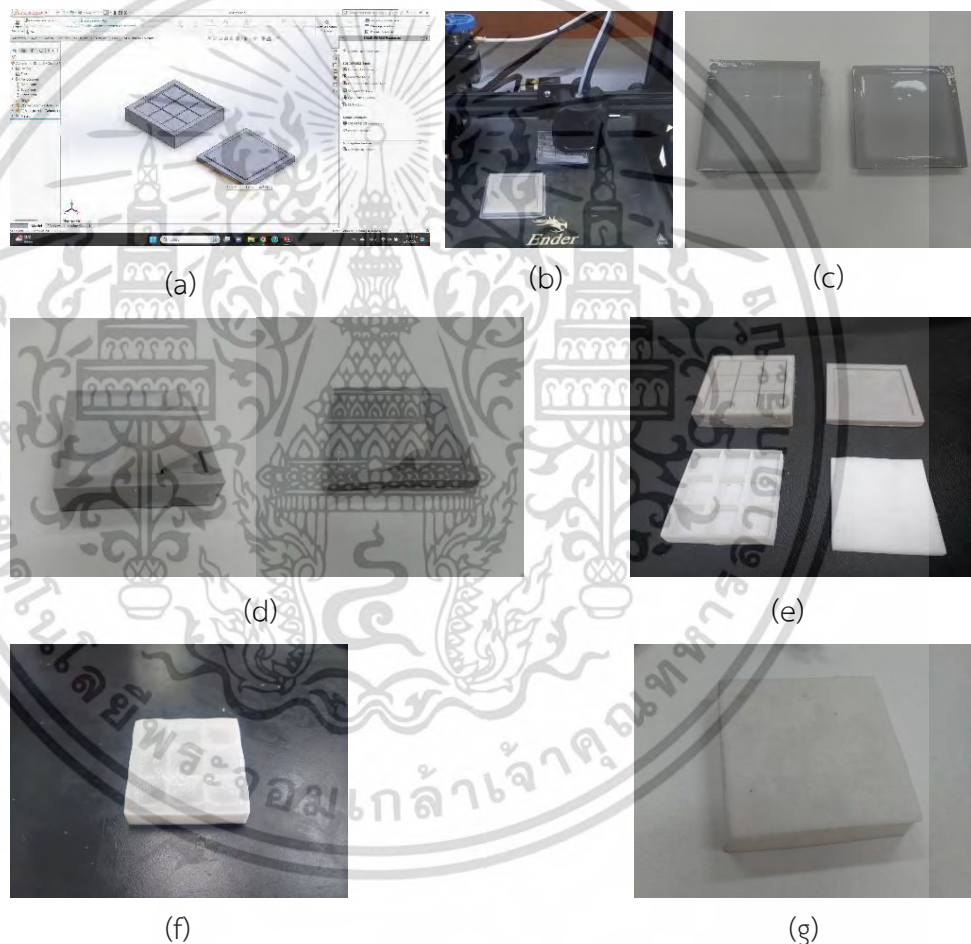
รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอ (a) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด $2 \times 2 \times 2$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร (b) แม่พิมพ์แผ่นยางซิลิโคนมีรู 8 แถว 8 คอลัมน์ แต่ละรูมีขนาด 1.9×1.9 ตารางมิลลิเมตร โดยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกวางอย่างสม่ำเสมอที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (c) ฝังวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกภายในยางซิลิโคน (d) ต้นแบบของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่โค้งงอได้ขนาด 3.5×3.5 ตารางเซนติเมตร

3.1.2 การเตรียมแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้

1. ออกแบบเข้าหล่อซิลิโคนด้วยโปรแกรม SolidWorks 2021 โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนโครงสร้างและฝาปิดด้านบน ส่วนโครงสร้างมีขนาด 50×50 ตารางมิลลิเมตร ถูกแบ่งออกเป็น 9 ช่อง แต่ละช่องมีขนาด 15.3×15.3 ตารางมิลลิเมตร และแต่ละช่องมีความห่างกัน 1 มิลลิเมตร ทั้ง 9 ช่องมีความลึกจากขอบนอกอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร ฝาด้านบนมีขนาด 50×50 ตารางมิลลิเมตร มีความลึกจากขอบนอก 1 มิลลิเมตร
2. ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติในการพิมพ์เข้าหล่อซิลิโคน ทำการพิมพ์ออกมา 3 ความหนา คือ 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผสมซิลิโคนเหลวและตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Fantastic Triumph Co., Ltd., Bangkok, Thailand ด้วยอัตราส่วน 25 กรัม ซิลิโคนต่อ 6 หยด ตัวเร่งปฏิกิริยา ผสมให้เข้ากันจากนั้นเทลงเข้าหล่อซิลิโคนทั้งสองชิ้น พักให้ซิลิโคนแข็งตัวประมาณ 2 วัน จากนั้นจึงนำออกจากเบ้าหล่อทั้งสอง
4. ละลายสารเปลี่ยนสถานะ RT42 (Rubitherm®Technologies GmbH, Berlin, Germany) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเทลงในซิลิโคนส่วนที่เป็นโครงสร้าง พักไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้แข็งตัว
5. นำส่วนฝาปิดที่ด้านบนจากนั้นฉวีกรอบด้วยซิลิโคนเหลวอัตราส่วนผสมเดียวกันเพื่อป้องกันการรั่วซึมจากการใช้งาน



รูปที่ 3.2 กระบวนการสร้างแม่ระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ได้ (a) ออกแบบเบ้าหล่อโครงด้วยโปรแกรม SolidWorks 2019 (b) พิมพ์เบ้าหล่อด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (c) ผสมซิลิโคนเหลวกับตัวเร่งปฏิกิริยาและเทลงเข้าหล่อ (d) พักให้ซิลิโคนแข็งตัวและแกะออกจากเบ้า (e) อุ่นสารเปลี่ยนสถานะให้อยู่ในรูปของเหลวและเทลงโครง (f) พักประมาณ 30 นาที ในอุณหภูมิห้องให้สารเปลี่ยนสถานะแข็งตัว (g) นำแผ่นซิลิโคนมาปิดทับและใช้ซิลิโคนเหลวทารอบรอยต่อเพื่อป้องกันการรั่วซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับระบบทดสอบประสิทธิภาพ

แหล่งกำเนิดความร้อนทรงกระบอก สร้างจากท่อสแตนเลสความยาว 50 เซนติเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ภายในบรรจุด้วยไส้ทำความร้อนยาว 60 เซนติเมตร ยึดทั้งสองด้านของไส้ทำความร้อนด้วยอิฐฉนวนกันความร้อน ใช้คู่กับและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 ท่อความร้อน

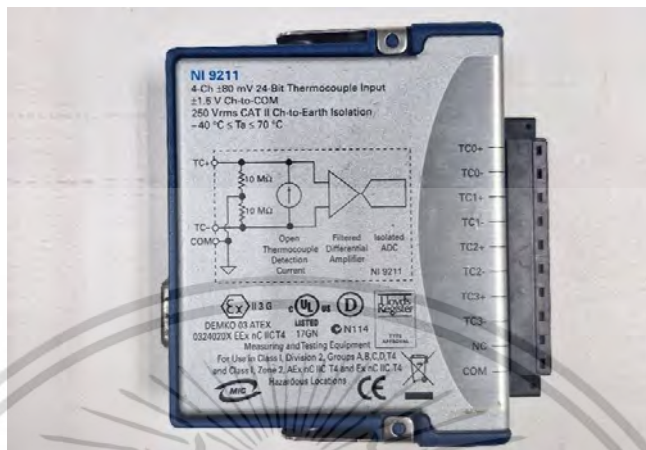
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามค่าตามที่กำหนดไว้ โดยที่จะมีหน้าที่ประมวลผลสัญญาณอนาล็อก หรือสัญญาณอินพุตจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) มาใช้ในการสั่งงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 3.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

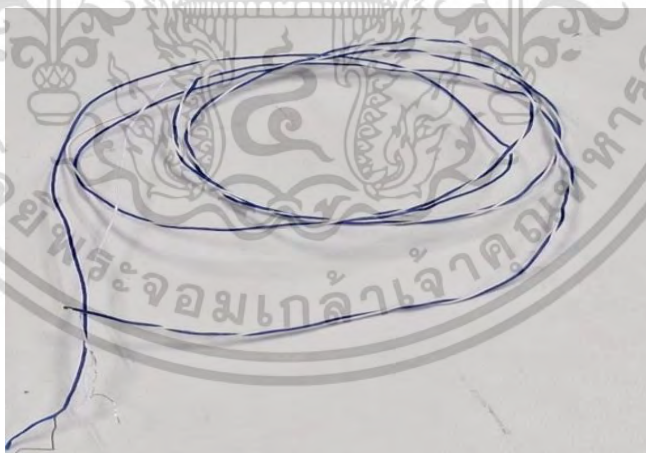
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NI cDAQ-9211 อุปกรณ์วัดและบันทึกอุณหภูมิของบริษัท National Instrument Corporation รุ่น 9211 ความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิและมีความเร็วในการส่งผลลัพธ์สูง ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานทางอุตสาหกรรมและวิจัยในหลายแขนง



รูปที่ 3.5 NI cDAQ-9211

โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K ช่วงการใช้งานตั้งแต่ -267 ถึง 260 องศาเซลเซียส เป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่มีความไวและแม่นยำสูง สามารถใช้ได้ในงานที่หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการ และการทดลอง มีช่วงการวัดอุณหภูมิระหว่าง -200 องศาเซลเซียส ถึง +1350 องศาเซลเซียส และเป็นที่นิยมในการใช้งานเนื่องจากมีความคงทนต่อการใช้งานและมีราคาที่เหมาะสม



รูปที่ 3.6 โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ RS PRO รุ่น RSDM3055A จากบริษัท RS Component Co., Ltd. มีความสามารถในการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและมีความสามารถในการวัดความถี่ ใช้งานง่าย มีความหลากหลายในการใช้งานและสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่าง สะดวกรวดเร็ว



รูปที่ 3.7 RS PRO รุ่น RSDM3055A

พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเคลื่อนที่อากาศด้วยการใช้พลังงานไฟฟ้า กระแสตรง มักใช้ในการระบายอากาศในสถานที่ต่าง ๆ



รูปที่ 3.8 พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง

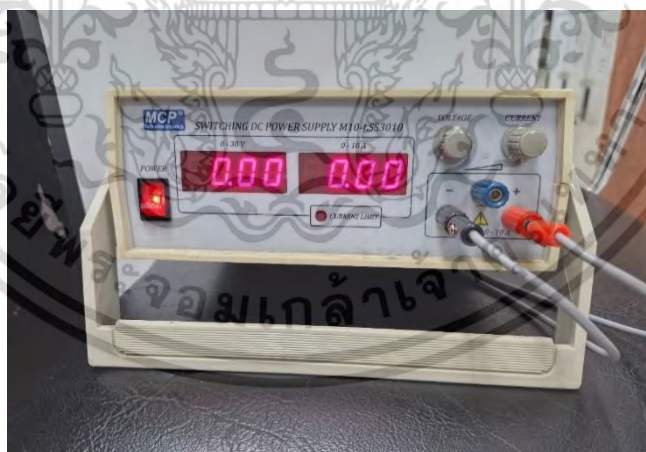
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดอัตราเร็วลม (Anemometer) จากบริษัท TENMARS รุ่น TM-4002 เป็นเครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบพกพาที่มีความแม่นยำสูง มีฟังก์ชันการวัดหลายๆ รูปแบบ เช่น ความเร็ว, อัตราการไหล, และอุณหภูมิ มีการออกแบบให้ใช้งานง่ายและสะดวก มีความทนทานและคงทนต่อสภาพแวดล้อม



รูปที่ 3.9 Anemometer

แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จากบริษัท MCP Lab Electronic รุ่น M10-LSS3010 สามารถให้แรงดันไฟฟ้า 0-30 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 0-10 แอมแปร์ มีความเสถียรและมีความแม่นยำสูง

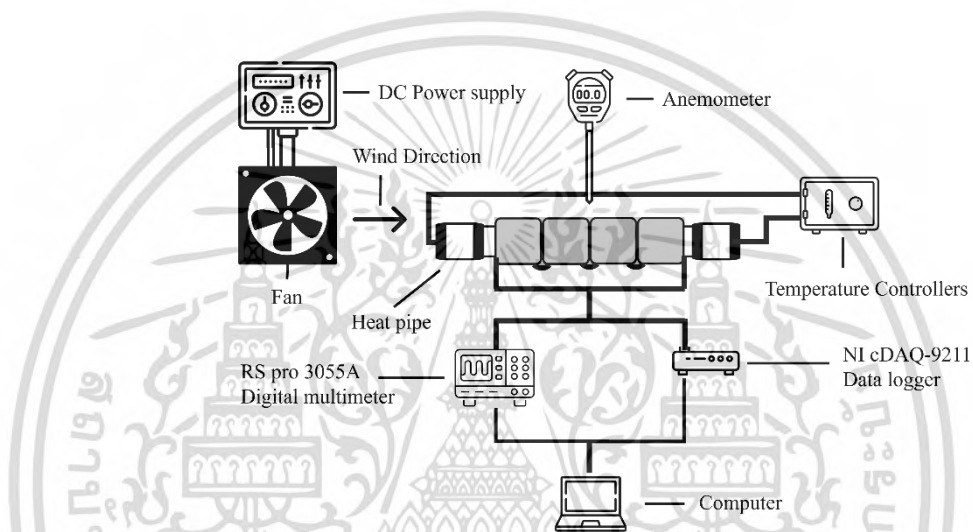


รูปที่ 3.10 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

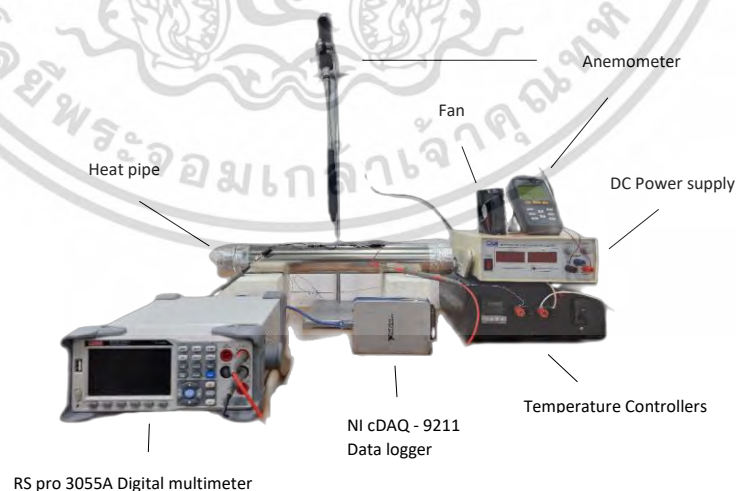
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 วิธีการสร้างระบบทดสอบประสิทธิภาพแผงระบายความร้อน

1. วางเครื่องวัดอุณหภูมิ NI cDAQ 9211 จัดวางสายโพรบวัดอุณหภูมิไว้ที่ด้านบนและล่างของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ติดตั้งพัดลมไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยให้ทิศทางการพัดผ่านด้านบนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก วัดอัตราเร็วลมด้วยอุปกรณ์อัตราเร็วลม
2. ทำการต่อสายเครื่องวัดอุณหภูมิและมัลติมิเตอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์และเปิดโปรแกรมสำหรับการวัดและบันทึก เชื่อมต่อสายของแหล่งกำเนิดความร้อนเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิติดโพรบวัดอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิตั้งที่แหล่งกำเนิดความร้อนรูปทรงกระบอก



รูปที่ 3.11 ภาพแผนผังระบบทดสอบประสิทธิภาพแผงระบายความร้อน



รูปที่ 3.12 ระบบทดสอบประสิทธิภาพแผงระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดสอบ

สำหรับการทดสอบมีเงื่อนไขที่จะทำการศึกษาดังนี้ เปลี่ยนความหนาของแผงระบายความร้อนจาก 10, 7 และ 4 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการไม่มีแผงระบายความร้อนบนตัวของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและทดสอบการผลกระทบของอัตราเร็วลมโดยให้ลมระบายที่ด้านบนของแผงระบายความร้อนที่ 3, 2, 1 และ 0 เมตรต่อวินาที ในการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

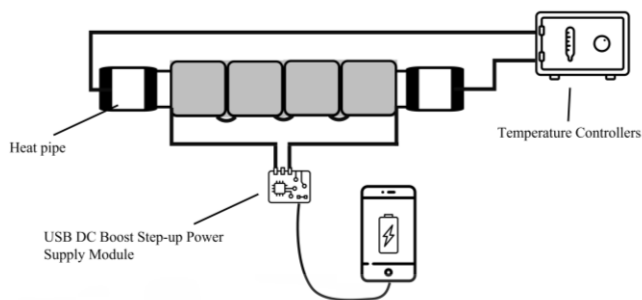
1. วางโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีการอนุกรมกัน 4 ชั้น ลงบนแหล่งกำเนิดความร้อนรูปทรงกระบอก ทำการเชื่อมต่อสายไฟด้านบนและลบของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับมัลติมิเตอร์
2. ทาซิลิโคนนำความร้อนลงบนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกให้ทั่วจากนั้นวางแผงระบายความร้อนด้านบนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยเริ่มต้นที่ความหนาแผงระบายความร้อน 10 มิลลิเมตร
3. ทำการเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้กับพัดลม โดยอ้างอิงปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เปิดจากเครื่องวัดอัตราเร็วลม กำหนดอัตราเร็วลมเริ่มต้นที่ 2 เมตรต่อวินาที เริ่มการบันทึกอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจากโปรแกรม
4. เปิดการทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิโดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ 25 องศาเซลเซียส บันทึกข้อมูลเป็นเวลา 60 นาที
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รออุณหภูมิกลับสู่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ทำการเปลี่ยนความหนาจาก 10 มิลลิเมตรเป็น 7, 4 และ 0 มิลลิเมตร ตามลำดับ นำข้อมูลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Origin Graph เพื่อศึกษาความต่างอุณหภูมิด้านเย็นและร้อน แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและความหนาแน่นกำลังของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก
6. ทำการทดลองศึกษาผลกระทบของอัตราเร็วลมต่อการระบายความร้อนโดยการใช้แผงระบายความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร วางลงบนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจากนั้นทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อปรับอัตราเร็วลมโดยมีอัตราเร็วลมที่ทดสอบที่ 3, 2, 1, 0 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 80 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ 25 องศาเซลเซียส บันทึกข้อมูลเป็นเวลา 60 นาที
7. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รออุณหภูมิกลับสู่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม นำข้อมูลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Origin Graph เพื่อศึกษาความต่างอุณหภูมิด้านเย็นและร้อน แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและความหนาแน่นกำลังของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

3.3 การประยุกต์การใช้งานจริง

1. นำเครื่องกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริก 4 ตัว มาต่อกันแบบอนุกรมวางลงบนท่อความร้อนเชื่อมต่อสายเครื่องควบคุมอุณหภูมิกับท่อความร้อนเข้าด้วยกัน
2. ทาซิลิโคนนำความร้อนและวางแผงระบายความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร ลงบนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละตัว
3. ต่อขั้วบวกและลบของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเข้าโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำเป็นสูง 0.9 – 5 โวลต์ เชื่อมต่อสายชาร์จสมาร์ตโฟนเข้ากับโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า
4. ให้อัตราเร็วลมกระทำกับระบบคงที่ 1 เมตรต่อวินาที ควบคุมอัตราเร็วลมด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ให้ความร้อนคงที่ 80 องศาเซลเซียส ตรวจสอบสถานะการชาร์จและกระแสไฟฟ้าด้วย แอมป์มิเตอร์ (Ampere)



รูปที่ 3.13 ภาพแผนผังระบบจำลองการใช้งานจริง



รูปที่ 3.14 ระบบจำลองการใช้งานจริงเพื่อชาร์จโทรศัพท์

3.4 วิธีการวิเคราะห์ผล

- นำข้อมูลอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเข้าสู่โปรแกรม Origin Graph เพื่อทำการเปรียบเทียบความต่างอุณหภูมิ แรงดันวงจรเปิดและความหนาแน่นกำลังของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกของแต่ละความหนาของแผงระบายความร้อน
- นำข้อมูลอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเข้าสู่โปรแกรม Origin Graph เพื่อทำการเปรียบเทียบความต่างอุณหภูมิ แรงดันวงจรเปิดและความหนาแน่นกำลังของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกของอัตราเร็วลมที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

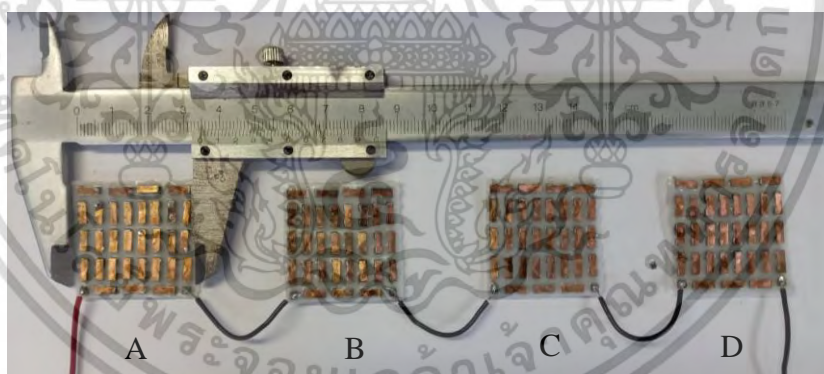
บทที่ 4

ผลการวิจัย และ การอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะด้วยการปรับความสูงของแผงระบายความร้อนเป็น ไม่มีแผงระบายความร้อน, 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในการทดสอบใช้โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิด้านร้อน และ เย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก อุณหภูมิด้านร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมถูกควบคุมให้คงที่ที่ 80 และ 25 องศาเซลเซียสตามลำดับ

4.1 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

ขนาดของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ถูกวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ดังรูปที่ 4.1 มัลติมิเตอร์ชนิดดิจิทัลถูกใช้เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ การวัดความต้านทานไฟฟ้าถูกทำสามครั้ง และ คำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย ตาราง 4.1 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ขนาด 3.5×3.5 ตารางเซนติเมตร จากการศึกษานี้เป็นประมาณ 0.6 ถึง 0.7 โอห์ม เป็นที่ชัดเจนว่าความต้านทานไฟฟ้าของแต่ละโมดูลคล้ายกันแสดงถึงกระบวนการผลิตที่มีความสม่ำเสมอไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.1 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ต้นแบบ 4 ชั้น แต่ละชั้นมีขนาด 3.5×3.5 ตารางเซนติเมตร (A-D) อ้างอิงถึงโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความต้านทานไฟฟ้า และ ความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ต้นแบบทั้ง 4 ชั้น

Flexible Thermoelectric	Resistance (Ω)				S. D.
	R ₁	R ₂	R ₃	R _{Average}	
A	0.60	0.70	0.70	0.67	0.06
B	0.60	0.70	0.60	0.63	0.06
C	0.70	0.70	0.80	0.73	0.06
D	0.80	0.60	0.70	0.70	0.10

4.2 ผลการทดลองการใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้รวมเข้ากับแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้

4.2.1 การตรวจสอบการรั่วซึมของสารเปลี่ยนสถานะขณะใช้งาน

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพภาชนะของวัสดุเปลี่ยนสถานะในการป้องกันการรั่วไหล ได้วางแผนระบายความร้อนโค้งงอได้บนเตาความร้อนพื้นเรียบ และ ตรวจวัดอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรด (IR) ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 เตาความร้อนพื้นเรียบได้รักษาอุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส การทดสอบถูกทำสามครั้งโดยไม่มีครั้งไหนที่เกิดการรั่วไหลของวัสดุเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทดสอบ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการออกแบบ และการสร้างภาชนะป้องกันการรั่วของวัสดุเปลี่ยนสถานะในขณะใช้งาน

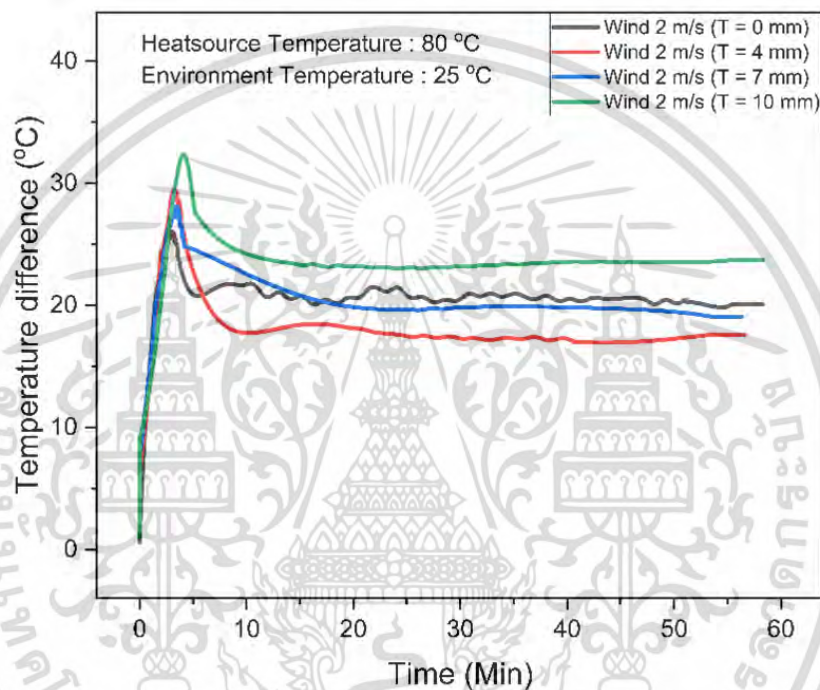


รูปที่ 4.2 การทดลองเพื่อตรวจสอบการรั่วไหลของสารเปลี่ยนสถานะขณะใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบโดยมีสถานะอัตราเร็วลมคงที่ 2 เมตรต่อวินาที

การทดสอบในสถานะที่มีอัตราเร็วลมคงที่ที่ 2 เมตรต่อวินาที พักอยู่ด้านบนของแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้ อัตราเร็วลมถูกควบคุมด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และตรวจดูอัตราเร็วลมด้วยเครื่องมือวัดอัตราเร็วลม Anemometer อุณหภูมิด้านร้อนถูกส่งให้จากท่อความร้อนที่ถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้มีความร้อนคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K ถูกใช้วัดอุณหภูมิที่โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อน และ เย็นผ่านอุปกรณ์ Ni c-Daq 9211 และ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกด้วย มัลติมิเตอร์ ผลการทดสอบความต่างของอุณหภูมิของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีดังนี้

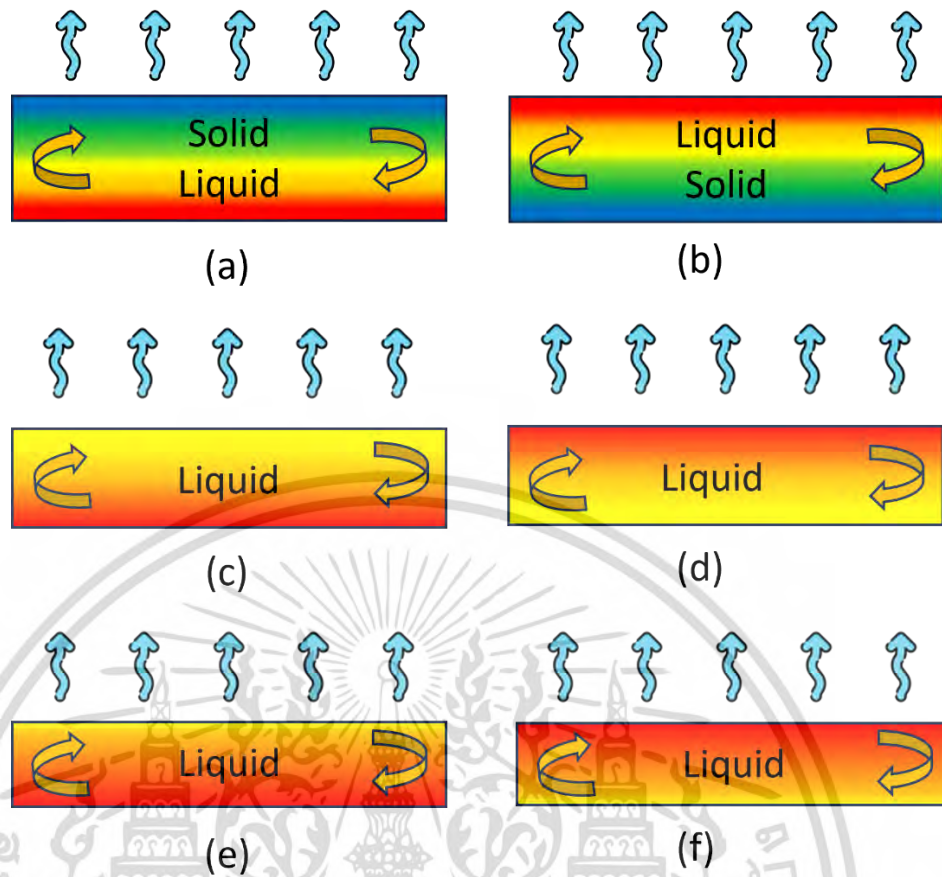


รูปที่ 4.3 ความต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีอัตราเร็วลมคงที่ 2 เมตรต่อวินาที

ผลการทดสอบจากการติดตั้งแผงระบายความร้อนลงบนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าความต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลา จุดสูงสุดที่เวลาประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นความต่างอุณหภูมิจะเริ่มลดลง การติดตั้งแผงระบายความร้อนความหนา 4, 7, และ 10 มิลลิเมตร สามารถให้ความต่างอุณหภูมิได้สูงสุด 27, 28 และ 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ กลับกันโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีแผงระบายความร้อนสามารถมีความต่างอุณหภูมิที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส ที่ 5 นาที แรกหลังจากนั้นความต่างอุณหภูมิจะมีการลดลงในทุกตัวอย่างจนถึงจุดคงที่ที่เวลา 10 นาที เป็นต้นไป หลังจากจุดนี้เป็นต้นไป ความต่างอุณหภูมิของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีแผงระบายความร้อน สูงกว่าที่มีแผงระบายความร้อนความหนา 4 และ 7 มิลลิเมตร สามารถนำมาเป็นข้อสรุปได้ว่าการใช้แผงระบายความร้อนที่ความหนาน้อยลง ทำให้ช่วงเวลาการใช้งานของแผงระบายความร้อนที่มีสารเปลี่ยนสถานะด้านในนั้นลดน้อยลง ตามปริมาณความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะในแผงระบายความร้อน เมื่อสารเปลี่ยนสถานะดูดซับความร้อนจนถึงจุดที่ตัวมันเองเกิดการหลอมเหลว แผงระบายความร้อนนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไปขัดขวางการระบายความร้อนที่ด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก และ ไปลดความต่างอุณหภูมิลง ในทางกลับกันโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ติดตั้งแผงระบายความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร สามารถคงความต่างอุณหภูมิจากการไม่มีแผงระบายความร้อนได้ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า 10 มิลลิเมตร เป็นความหนาที่เหมาะสมของแผงระบายความร้อนที่ใช้กับความร้อนจากแหล่งความร้อน และ อัตราเร็วลมในการทดสอบนี้

ในการออกแบบแผงระบายความร้อนที่โค้งงอได้ได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะ ความหนาที่มากกว่า 10 มิลลิเมตรจะทำให้แผงระบายความร้อนไม่สามารถโค้งงอได้หรือโค้งงอได้ยาก ความหนาที่มากที่สุดจึงจำกัดอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร นอกจากนี้ต้องมีการพิจารณาพฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะทั้งในสภาวะหลอมเหลว และการแข็งตัว สำหรับแผงระบายความร้อนบนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะชนิดโค้งงอได้ที่ไม่มีอัตราเร็วลม การแข็งตัวของสารเปลี่ยนสถานะมักใช้เวลาที่นานกว่า ทำให้มีความยากในการควบคุมความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะภายใน ดังนั้นการใช้ความหนา และ ให้ความเย็นที่เหมาะสมเพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะแข็งตัวจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับแผงระบายความร้อนบนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อเสริมความเข้าใจ และ ข้อมูลเพิ่มเติมของแผงระบายความร้อนบนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะชนิดโค้งงอได้และผลกระทบของอัตราเร็วของลมในการพาความร้อนระหว่างการหลอมเหลว และการแข็งตัว แบบจำลองรูปภาพ (รูปที่ 4.4) สามารถช่วยอธิบายผลกระทบของอัตราเร็วลม และ ความหนาของสารเปลี่ยนสถานะตลอดกระบวนการหลอมเหลว และการแข็งตัวกลับของสารเปลี่ยนสถานะอย่างชัดเจน

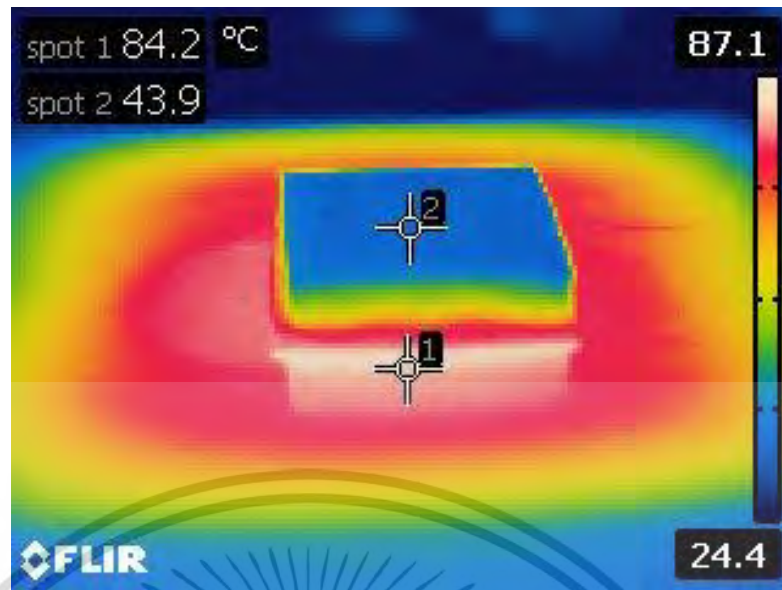


รูปที่ 4.4 แบบจำลองแสดงกลไกภายในวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อดูดความร้อนจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ ถูกครอบงำถึงการเปลี่ยนสถานะ คือ จากของเหลวเป็นของแข็ง และจากของแข็งเป็นของเหลว

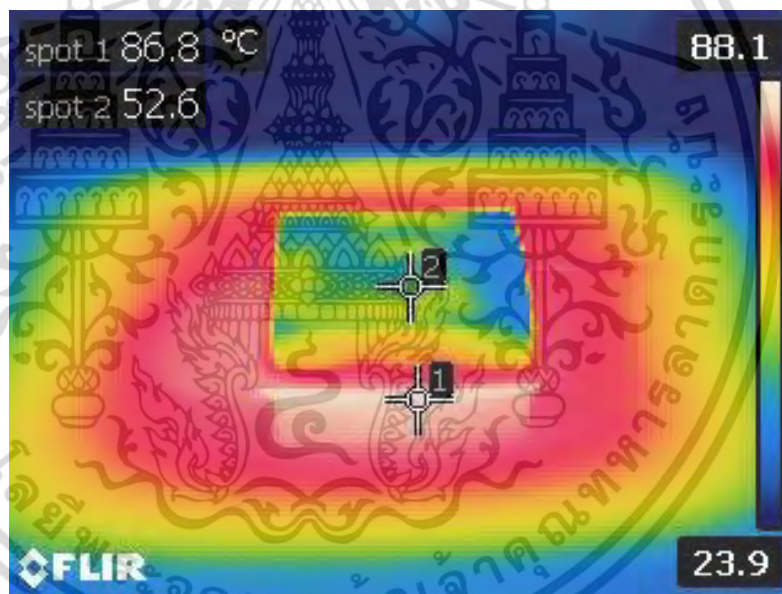
การส่งผ่านความร้อนภายในแผงระบายความร้อนบนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะชนิดโค้งงอได้ หลังจากที่สารเปลี่ยนสถานะทั้งหมดหลอมเหลวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ด้านบนของวัสดุเปลี่ยนสถานะกับสภาพแวดล้อมเนื่องจากมีอัตราเร็วของลมผ่าน ส่งผลให้อุณหภูมิที่ด้านบนของวัสดุเปลี่ยนสถานะลดลง และ เปลี่ยนสถานะกลับเป็นของแข็ง (รูปที่ 4.4a) ต่อมา วัสดุเปลี่ยนสถานะหลอมเหลวอุณหภูมิสูงที่อยู่ด้านล่างจะขยับมาที่ด้านบน และ วัสดุเปลี่ยนสถานะที่อยู่ในรูปของแข็งจะลงไปอยู่ด้านล่างแทน ผลลัพธ์ คือ วัสดุเปลี่ยนสถานะที่อยู่ในรูปของแข็งจะดูดซับความร้อนจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดโค้งงอได้ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความต่างอุณหภูมิ (รูปที่ 4.4b) แต่เมื่อความหนาของแผงระบายความร้อนลดลงส่งผลให้ปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะภายในลดลงตามทำให้ความจุความร้อนลดลงตาม การพาความร้อนที่เกิดจากอัตราเร็วลมเกิดขึ้นด้านบนไม่เพียงพอที่จะทำให้สารเปลี่ยนสถานะด้านบนเกิดการแข็งตัว ประสิทธิภาพการระบายความร้อนให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกลดลง (รูปที่ 4.4c และ 4.4d) และ เมื่อความหนาลดลงไปที่ 4 มิลลิเมตร ความจุความร้อนลดลงมากจนทำให้แผงระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างมีอุณหภูมิสูงจนไม่เกิดการหมุนเวียนของสารเปลี่ยนสถานะภายใน ความร้อนของแผงระบายจึงมีอุณหภูมิที่สูงและทำให้อุณหภูมิด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกลดลง (รูปที่ 4.4e และ 4.4f) สอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องความร้อน

(รูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7) รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

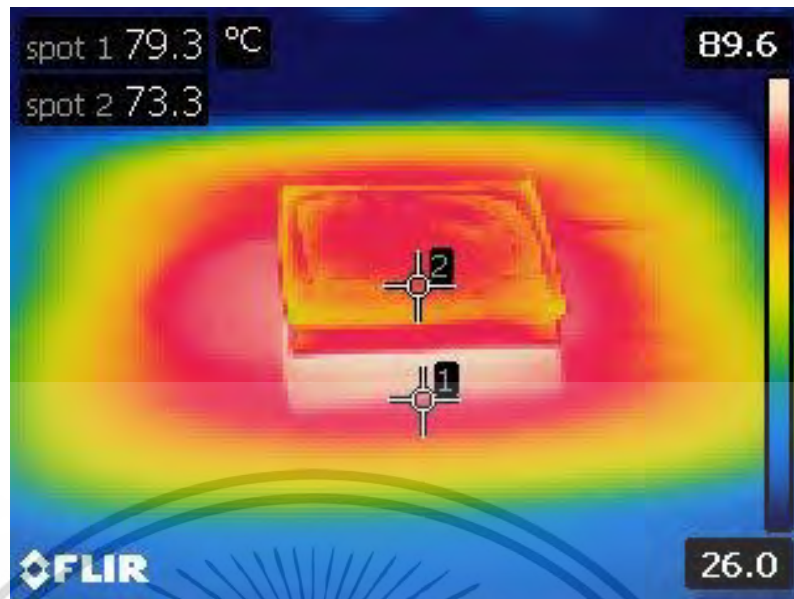


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายแผงระบายความร้อนขณะใช้งาน (10 มม.) จากกล้องความร้อน



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายแผงระบายความร้อนขณะใช้งาน (7 มม.) จากกล้องความร้อน

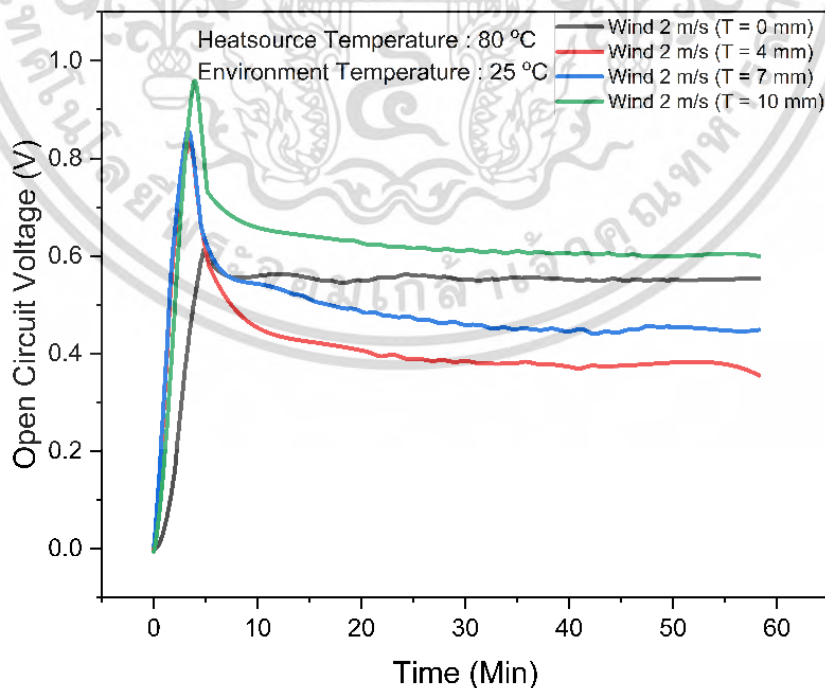
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายแผงระบายความร้อนขณะใช้งาน (4 มม.) จากกล้องความร้อน

นอกจากนี้อิทธิพลจากอัตราเร็วลมสามารถช่วยเพิ่มการระบายความร้อนจากแผงระบายความร้อนได้ตามอัตราเร็วลมที่เพิ่มมากขึ้นโดยแค่การเพิ่มอัตราเร็วลมที่ 1 เมตรต่อวินาทีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากกว่าการไม่มีอัตราเร็วลมถึง 4 เท่า

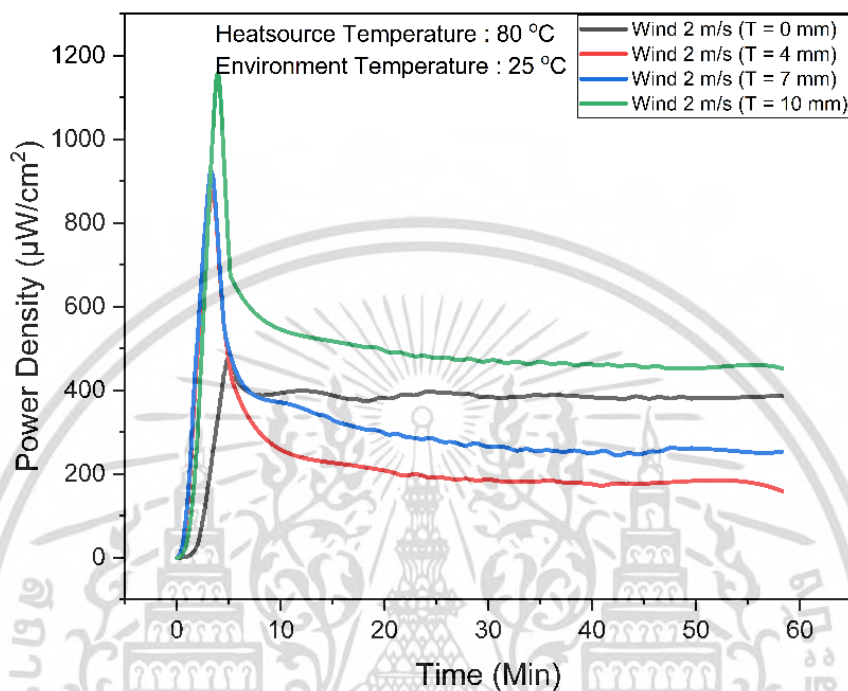
ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งมี และ ไม่มีแผงระบายความร้อนมีดังนี้



รูปที่ 4.8 แรงดันวงจรเปิดจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากเวลาผ่านไป 10 นาที โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อนความสูง 10 มิลลิเมตร สามารถให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดได้ 0.65 โวลต์ มากกว่าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีแผงระบายความร้อน ตรงข้ามกันที่แผงระบายความร้อนความสูง 4 และ 7 มิลลิเมตร ให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดได้ต่ำกว่าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

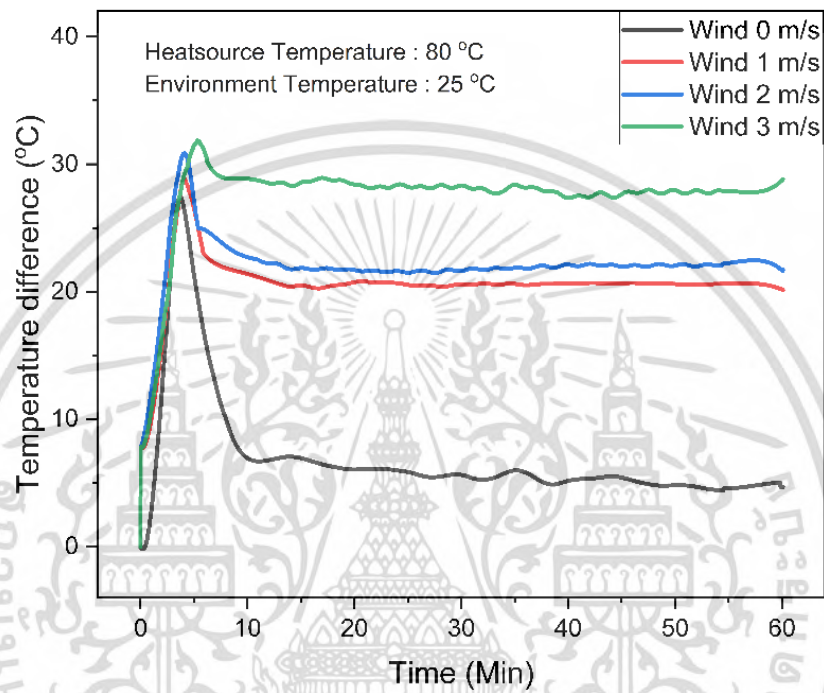


รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

หลังจากเวลาผ่านไป 10 นาที โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามากที่สุดถึง 500 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร การทดสอบนี้เป็นการยืนยันว่าแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะ เมื่อถูกนำไปใช้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้สามารถให้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดที่จะขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ เช่น ให้พลังงานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก

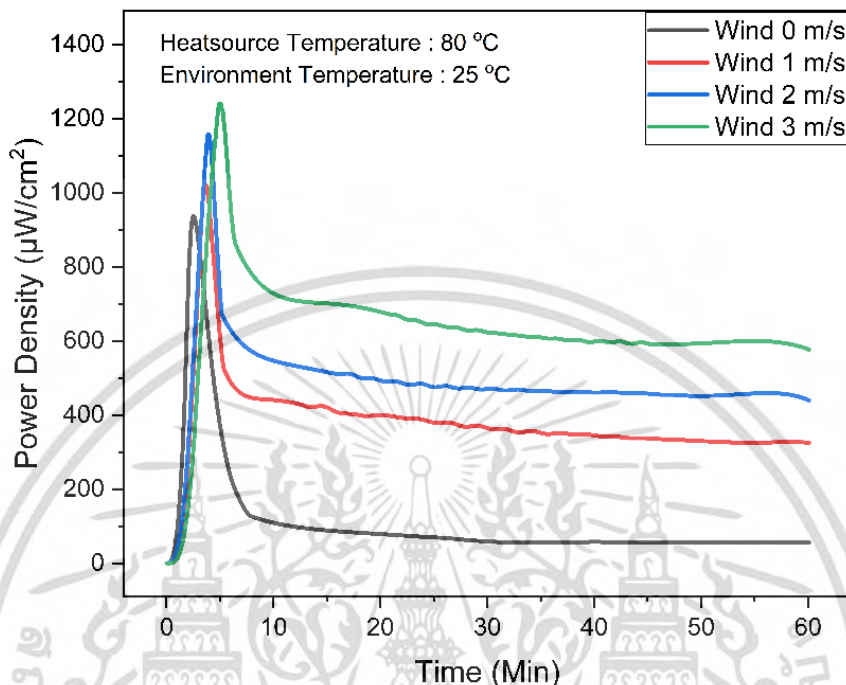
4.2.3 การทดสอบผลกระทบของอัตราเร็วลมที่แตกต่างกันกับประสิทธิภาพของแผงระบายความร้อน

ในการทดสอบนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วลมตั้งแต่ 0, 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที โดยควบคุมอุณหภูมิสภาพแวดล้อมให้คงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องปรับอากาศ และใช้แผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะความหนา 10 มิลลิเมตร กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้



รูปที่ 4.10 ความต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีอัตราเร็วลมที่ต่างกันอย่างบนแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะความหนา 10 มิลลิเมตร

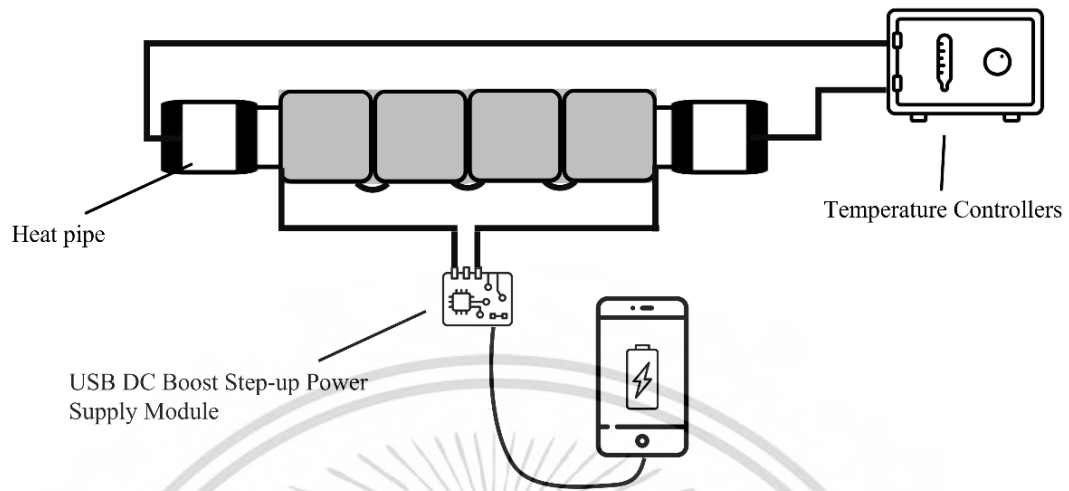
ความต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านเฉลี่ยของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วลม คือ 5, 20, 21 และ 30 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับอัตราเร็วลมที่ 0, 1, 2, และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และ ความต่างอุณหภูมิกงอยู่เกือบคงที่ที่อัตราเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อมีอัตราเร็วลมที่แตกต่างกันบนแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะความหนา 10 มิลลิเมตร

เมื่อไม่มีอัตราเร็วลมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะสามารถให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้ 100 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ เมื่อมีแรงลมที่ 1 เมตรต่อวินาที ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีอัตราเร็วลม ผลลัพธ์แสดงถึงการให้อัตราเร็วลมกับการใช้แผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกได้อย่างมีนัยยะสำคัญ และ เมื่อโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร มีอัตราเร็วลมช่วยระบายที่ 3 เมตรต่อวินาที สามารถให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้มากถึง 1250 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และสามารถคงกำลังไฟฟ้าที่ 625 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ได้นานถึง 60 นาที

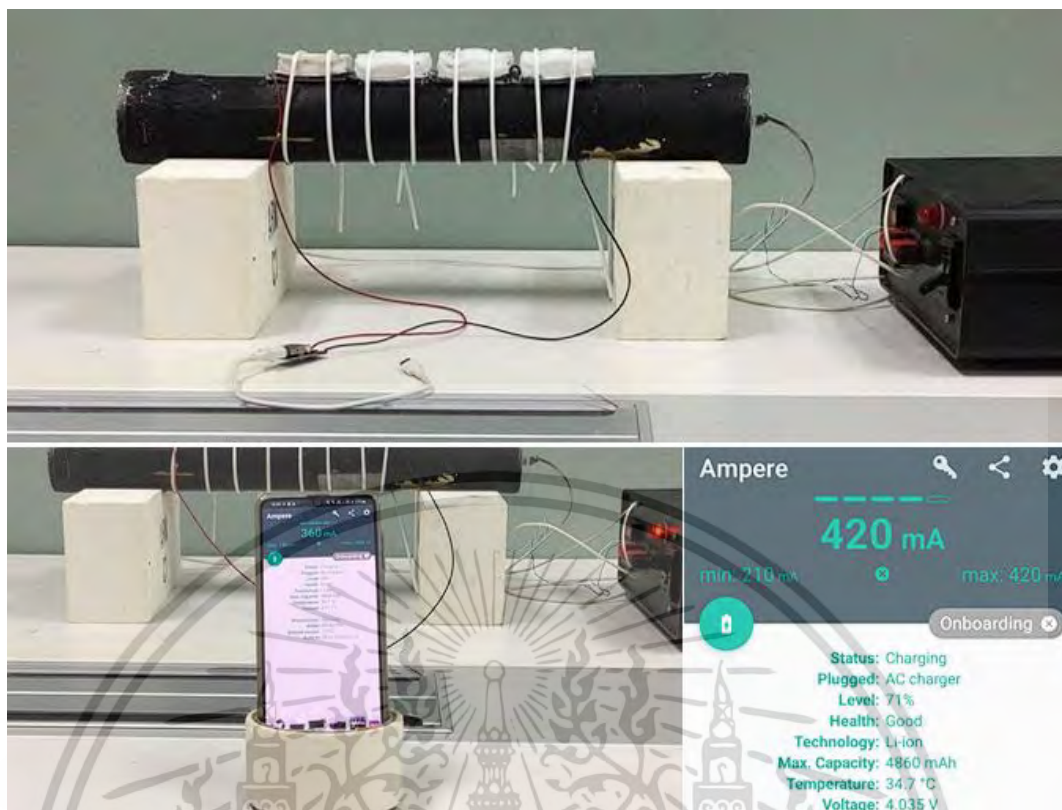
4.3 การนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.12 ภาพแผนผังสำหรับการทดสอบการนำไปใช้จริง

การทดสอบประสิทธิภาพของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นร่วมกับแผงระบายความร้อนโค้งงอได้ และ อัตราเร็วลม การทดลองได้ถูกจัดขึ้นดังภาพที่ 4.9 ใช้ซิลิโคนนำความร้อนเพื่อลดความต้านทานความร้อนระหว่างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก และ แผงระบายความร้อน โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ 4 ตัว เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม และ แผงระบายความร้อนโค้งงอได้ถูกติดตั้งบนท่อความร้อนโดยมีแผ่นกราฟิตติดระหว่างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก และ ท่อความร้อนเพื่อป้องกันการลัดวงจรให้อัตราเร็วลมที่ 1 เมตรต่อวินาที นำโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำเป็นสูง 0.9 – 5 โวลต์ ไปเชื่อมต่อกับสมาร์ทโฟน และ อีกด้านเชื่อมต่อกับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้ เมื่อเกิดความต่างอุณหภูมิที่โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจะทำให้มีการสร้างไฟฟ้าออกมา โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันต่ำขึ้นเป็นแรงดันที่สูง โดยการลดกระแสไฟฟ้าลงเพื่อรักษาพลังงาน และได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ

ในการทดลองนี้ได้ใช้โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อแสดงให้เห็นถึงเป็นไปได้ในการใช้งานพลังงานไฟฟ้าแรงดันน้อย โดยมีเป้าหมายที่จะให้พลังงานแก่อุปกรณ์เคลื่อนที่ การชาร์จโทรศัพท์มือถือได้เป็นข้อพิสูจน์ถึงความเป็นไปได้นี้ โดยสามารถยืนยันได้ด้วยการใช้แอปพลิเคชันแอมป์แอมป์ (Ampere) เพื่อบอกสถานการณ์ชาร์จ และ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่กำลังชาร์จ ดังภาพที่ 4.10



รูปที่ 4.13 การทดสอบการชาร์จไฟฟ้าให้กับโทรศัพท์ด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อน และ อัตราเร็วลมความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความสามารถของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบโค้งงอได้กับอิทธิพลของอัตราเร็วลม

แผงระบายความร้อน	อัตราเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	ความหนาแน่น กำลังไฟฟ้า (ไมโคร วัตต์ต่อตาราง เซนติเมตร)	อ้างอิง
Copper electrode	2	48	[14]
Copper foam	-	15	[16]
Assembled copper foam on to PDMS film	-	16	[17]
Assembled copper foam on to PDMS film	0.8	98	[17]
Phase-change material (CaCl ₂ ·6H ₂ O)	-	35	[25]
Phase-change inorganics (CaCl ₂ ·6H ₂ O)	1.5	50	[25]
Heteromorphic copper electrode	-	21	[18]
Heteromorphic copper electrode	2.1	116	[18]
Phase-change material (RT42)	-	100	งานนี้
Phase-change material (RT42)	1	400	งานนี้
Phase-change material (RT42)	3	625	งานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 นำเสนอการเปรียบเทียบผลการทดสอบประสิทธิภาพของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบไค้งงอได้ในงานวิจัยก่อนหน้า และ งานวิจัยนี้ โดยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบไค้งงอได้ที่เราพัฒนาพร้อมกับแผนระบายความร้อนไค้งงอได้ที่มีวัสดุเปลี่ยนสถานะทั้งแบบมีอัตราเร็วลม และ ไม่มีอัตราเร็วลม เข้ามาเกี่ยวข้อง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้า และ ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่มากกว่าในงานวิจัยก่อนหน้า [14, 16 – 18, 25] งานของเรามีตัวเลขค่อนข้างสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบไค้งงอได้ที่ถูกบันทึกไว้ในงานวิจัยอื่นๆ เป็นการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการออกแบบของงานวิจัยนี้ และ ความเป็นไปได้ของการใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบไค้งงอได้อื่นๆ ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวคิดและความเป็นไปได้ที่จะนำแผงระบายความร้อนที่สามารถยืดหยุ่นได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะมาใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก มีความหนา 3 ระดับคือ 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร โดยมุ่งหวังให้สามารถช่วยกระจายความร้อนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก แผงระบายความร้อนถูกออกแบบมาเฉพาะเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารเปลี่ยนสถานะภายในขณะใช้งาน เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถโค้งงอได้ถูกนำมาใช้กับแผงระบายความร้อนที่สามารถโค้งงอได้บนพื้นฐานของสารเปลี่ยนสถานะที่มีความสูง 4, 7 และ 10 มิลลิเมตร สามารถให้ความต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกได้มากถึง 27, 28 และ 32 องศาเซลเซียสตามลำดับ หลังเวลาผ่านไป 10 นาที ความต่างอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีแผงระบายความร้อนจะมีค่ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อนความหนา 4 และ 7 มิลลิเมตร ในทางกลับกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผงระบายความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตรสามารถคงความต่างอุณหภูมิให้สูงมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีแผงระบายความร้อน และหากเพิ่มแรงลมเข้าไปในระบบจะสามารถเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีนัยยะสำคัญ สุดท้ายการจำลองการใช้จริงด้วยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกผนวกกับแผงระบายความร้อน เปลี่ยนความร้อนจากต่อความร้อนทรงกระบอกเป็นพลังงานไฟฟ้ามาชาร์จโทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

แผงระบายความร้อนยังมีข้อจำกัดในการใช้งานช่วงอุณหภูมิสูงที่จะใช้งานได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 10 นาที หากสามารถหาสารเปลี่ยนสถานะที่มีช่วงจุดหลอมเหลวที่สูงเทียบเท่าอุณหภูมิจากแหล่งกำเนิดความร้อนได้อาจทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น และส่วนของบรรจุภัณฑ์ที่เป็นซิลิโคนหากสามารถเติมสารบางอย่างที่จะช่วยในการนำความร้อนให้มากขึ้นกว่าเดิมจะสามารถช่วยให้การนำความร้อนไปสู่สารเปลี่ยนสถานะดีมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Forman, C.; Muritala, I.K.; Pardemann, R.; Meyer, B. Estimating the global waste heat potential. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 57, 1568–1579.
2. Li, T.; Zhang, X.; Lacey, S.D.; Mi, R.; Zhao, X.; Jiang, F.; Song, J.; Liu, Z.; Chen, G.; Dai, J. Cellulose ionic conductors with high differential thermal voltage for low-grade heat harvesting. *Nat. Mater.* 2019, 18, 608–613.
3. Lee, S.W.; Yang, Y.; Lee, H.-W.; Ghasemi, H.; Kraemer, D.; Chen, G.; Cui, Y. An electro-chemical system for efficiently harvesting low-grade heat energy. *Nat. Commun.* 2014, 5, 3942.
4. Poletayev, A.D.; McKay, I.S.; Chueh, W.C.; Majumdar, A. Continuous electrochemical heat engines. *Energy Environ. Sci.* 2018, 11, 2964–2971.
5. Cao, T.; Shi, X.L.; Chen, Z.G. Advances in the design and assembly of flexible thermoelectric devices. *Prog. Mater. Sci.* 2023, 131, 101003.
6. Toan, N.V.; Tuoi, T.T.K.; Sui, H.; Trung, N.H.; Samat, K.F.; Ono, T. Ultra-flexible thermoelectric generator sheet and electrodeposited thermoelectric material for waste heat harvesting. *Energy Rep.* 2022, 8, 5026–5037.
7. Gobpant, J.; Klongratog, B.; Rudradawong, C.; Sakdanuphab, R.; Junlabhut, P.; Nuthongkum, P.; Limsuwan, P.; Sakulkalavek, A. High-performance flexible thermoelectric generator based on silicone rubber and cover with graphite sheet. *Appl. Therm. Eng.* 2024, 236, 121656.
8. Shi, Y.; Wang, Y.; Mei, D.; Feng, B.; Chen, Z. Design and fabrication of wearable thermoelectric generator device for heat harvesting. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2018, 3, 373–378.
9. Zhou, Z.; Huang, Y.; Wei, B.; Yang, Y.; Yu, D.; Zheng, Y.; He, D.; Zhang, W.; Zou, M.; Lan, J.-L.; et al. Compositing effects for high thermoelectric performance of Cu₂Se-based materials. *Nat. Commun.* 2023, 14, 2410.
10. Xie, L.; Yin, L.; Yu, Y.; Peng, G.; Song, S.; Ying, P.; Cai, S.; Sun, Y.; Shi, W.; Wu, H.; et al. Screening strategy for developing thermoelectric interface materials. *Science* 2023, 382, 921–928.
11. Lee, B.; Cho, H.; Park, K.T.; Kim, J.S.; Park, M.; Kim, H.; Hong, Y.; Chung, S. High-performance compliant thermoelectric generators with magnetically self-assembled soft heat conductors for self-powered wearable electronics. *Nat. Commun.* 2020, 11, 5948.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

12. Maksymuk, M.; Parashchuk, T.; Dzundza, B.; Nykyruy, L.; Chernyak, L.; Dashevsky, Z. Highly efficient bismuth telluride-based thermoelectric micro converter. *Mater. Today Energy* 2021, 21, 100753.
13. Mao, X.; Li, Z.; Liu, Y.; Nie, X.; Li, B.; Jiang, Q.; Gao, C.; Gao, Y.; Wang, L. Tuning the structure of borane-nitrogen derivatives towards high-performance carbon nanotubes-based n-type thermoelectric materials. *Chem. Eng. J.* 2021, 405, 126616.
14. Xu, Q.; Deng, B.; Zhang, L.; Lin, S.; Han, Z.; Zhou, Q.; Li, J.; Zhu, Y.; Jiang, F.; Li, Q.; et al. High-performance flexible thermoelectric generator based on bulk materials. *Cell Rep. Phys. Sci.* 2022, 3, 100780.
15. Kim, S.J.; We, J.H.; Cho, B.J. A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric. *Energy Environ. Sci.* 2014, 7, 1959–1965.
16. Jeong, M.H.; Kim, K.-C.; Kim, J.-S.; Choi, K.J. Operation of wearable thermoelectric generators using dual sources of heat and light. *Adv Sci.* 2022, 9, 2104915. [Google Scholar]
17. Lv, J.-R.; Ma, J.-L.; Dai, L.; Yin, T.; He, Z.-Z. A high-performance wearable thermoelectric generator with comprehensive optimization of thermal resistance and voltage boosting conversion. *Appl. Energy* 2022, 312, 118696.
18. Kuang, N.; Niu, A.; Wang, W.; Zuo, Z.; Zhan, T.; Wang, H. High performance flexible thermoelectric generator using bulk legs and integrated electrodes for human energy harvesting. *Energy Convers. Manag.* 2022, 272, 116337.
19. Kim, C.S.; Yang, H.M.; Lee, J.; Lee, G.S.; Choi, H.; Kim, Y.J.; Lim, S.H.; Cho, S.H.C.B.J. Self- powered wearable electrocardiography using a wearable thermoelectric power generator. *ACS Energy Lett.* 2018, 3, 501–507.
20. Park, H.; Kim, D.; Eom, Y.; Wijethunge, D.; Hwang, J.; Kim, H.; Kim, W. Mat-like flexible thermoelectric system based on rigid inorganic bulk materials. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2017, 50, 494006.
21. Park, H.; Lee, D.; Kim, D.; Cho, H.; Eom, Y.; Hwang, J.; Kim, H.; Kim, J.; Han, S.; Kim, W. High power output from body heat harvesting based on flexible thermoelectric system with low thermal contact resistance. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2018, 51, 365501.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

22. Lee, G.; Kim, C.S.; Kim, S.; Kim, Y.J.; Choi, H.; Cho, B.J. Flexible heatsink based on a phase-change material for a wearable thermoelectric generator. *Energy* 2019, 179, 12–18.
23. Prasad, J.S.; Anandalakshmi, R.; Muthukumar, P. Numerical investigation on conventional and PCM heat sinks under constant and variable heat flux conditions. *Clean. Techn. Environ. Policy* 2021, 23, 1105–1120.
24. Desai, A.N.; Shah, H.; Singh, V.K. Novel inverted fin configurations for enhancing the thermal performance of PCM based thermal control unit: A numerical study. *Appl. Therm. Eng.* 2021, 195, 117155.
25. Zhu, S.; Miao, L.; Peng, Y.; Gao, J.; Lai, H.; Liu, C.; Zhang, Y.; Zhang, X.; Chen, Z.; Pei, Y. Persistently self-powered wearable thermoelectric generator enabled by phase-change inorganics as the heat sink. *Mater. Today Phys.* 2023, 32, 101011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



Technical Sales

(866) 531-6285
orders@ni.com

[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#)

Requires manual's and dimensional drawings, visit the product page (product tab) on ni.com

Last Revised: 2014-11-06 07:31:43.0

NI 9211

±80 mV Thermocouple Input, 14 S/s, 4 Ch Module



- 4 thermocouple or ±80 mV analog inputs
- -40 to 70 °C operating range
- 24-bit resolution; 50/60 Hz noise rejection

- Hot-swappable operation
- NIST-traceable calibration

Overview

The NI 9211 C Series thermocouple input module for use with NI CompactDAQ and CompactRIO chassis includes a 24-bit delta-sigma ADC, antialiasing filters, open-thermocouple detection, and cold-junction compensation for high-accuracy thermocouple measurements. It contains NIST-traceable calibration and a channel-to-earth ground double-isolation barrier for safety, noise immunity, and high common-mode voltage range.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information

- Real-Time OS
- Windows

Driver Information

- NI-DAQmx
- NI-RIO

Software Compatibility

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress
- Visual Basic
- Visual C#
- Visual C++
- Visual Studio
- Visual Studio .NET

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Thermocouple Module	Channels	Sample Rate	Resolution	Feature
NI 9213	16	1,200 S/s	24-bit	Lowest cost/channel
NI 9219	4	50 S/s/ch	24-bit	Channel-to-channel isolation
NI 9211	4	14 S/s	24-bit	Low-channel count

[Back to Top](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application and Technology

High-accuracy C Series analog input modules for NI CompactDAQ and CompactRIO provide high-performance measurements for a wide variety of industrial, in-vehicle, and laboratory sensors and signal types. Each module includes built-in signal conditioning and an integrated connector with screw terminal or cable options for flexible and low-cost signal wiring. All modules feature CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings.

C Series Compatibility

The C Series hardware family features more than 50 measurement modules and several chassis and carriers for deployment. With this variety of modules, you can mix and match measurements such as temperature, acceleration, flow, pressure, strain, acoustic, voltage, current, digital, and more to create a custom system. Install the modules in one of several carriers to create a single module USB, Ethernet, or Wi-Fi system, or combine them in chassis such as NI CompactDAQ and CompactRIO to create a mixed-measurement system with synchronized measurements. You can install up to eight modules in a simple, complete NI CompactDAQ USB data acquisition system to synchronize all of the analog output, analog input, and digital I/O from the modules. For a system without a PC, CompactRIO holds up to eight modules and features a built-in processor, RAM, and storage for an embedded data logger or control unit. For higher-speed control, CompactRIO chassis incorporate a field-programmable gate array (FPGA) that you can program with NI LabVIEW software to achieve silicon-speed processing on I/O data from C Series modules.

Advanced Features

When used with CompactRIO, C Series analog input modules connect directly to reconfigurable I/O (RIO) FPGA hardware to create high-performance embedded systems. The reconfigurable FPGA hardware within CompactRIO provides a variety of options for custom timing, triggering, synchronization, filtering, signal processing, and high-speed decision making for all C Series analog modules. For instance, with CompactRIO, you can implement custom triggering for any analog sensor type on a per-channel basis using the flexibility and performance of the FPGA and the numerous arithmetic and comparison function blocks built into the LabVIEW FPGA Module.

Key Features

- High-accuracy, high-performance analog measurements for any CompactRIO embedded system, R Series expansion chassis, or NI CompactDAQ chassis
- Screw terminals, BNC, D-Sub, spring terminals, strain relief, high voltage, cable, solder cup backshell, and other connectivity options
- Available channel-to-earth ground double-isolation barrier for safety, noise immunity, and high common-mode voltage range
- CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings
- Built-in signal conditioning for direct connection to sensors and industrial devices

Visit ni.com/compactrio or ni.com/compactdaq for up-to-date information on module availability, example programs, application notes, and other developer tools.

Connectivity Accessories

NI CompactDAQ and CompactRIO systems are designed to provide flexible options for low-cost field wiring and cabling. Most C Series modules have a unique connector block option that offers secure connections to your C Series system. Table 2 contains all of the connector blocks available for C Series I/O modules.

Accessory	Description
NI 9932	10-position strain relief and high-voltage screw-terminal connector kit
NI 9933	37-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9934	25-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9935	15-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9936	10-position screw-terminal plugs (quantity 10)
NI 9939	16-position connector kit with strain relief

Note: To meet shock and vibration requirements, you must affix terminals to the ends of the wires on all screw-terminal connectors.

Table 2. Connector Blocks for C Series I/O Modules

Table 3 lists the recommended connector block accessories for each C Series analog input module.

C Series Analog Input Module	Recommended Module Accessory
NI 9201	NI 9932, NI 9936
NI 9201 with D-Sub	NI 9934 ¹
NI 9211	NI 9932, NI 9936
NI 9215	NI 9932, NI 9936
NI 9217	NI 9939
NI 9221	NI 9932, NI 9936
NI 9221 with D-Sub	NI 9934 ¹

¹Requires a 25-pin D-Sub connector such as the NI 9934 accessory kit.

Table 3. Recommended Connector Block Accessories

The NI 9932 kit provides strain relief and operator protection from high-voltage signals for any 10-position screw-terminal module.



Figure 1. NI 9932 10-Position Strain Relief and High-Voltage Screw-Terminal Connector Kit

The NI 9936 consists of 10-position screw-terminal plugs for any 10-position screw-terminal module.



Figure 5. NI 9936 10-Position Screw-Terminal Plugs

Visit ni.com/compactrio or ni.com/compactdaq for up-to-date information on accessories.

[Back to Top](#)

Ordering Information

For a complete list of accessories, visit the product page on ni.com.

Products	Part Number	Recommended Accessories	Part Number
----------	-------------	-------------------------	-------------

No accessories required.

[Back to Top](#)

Software Recommendations

LabVIEW Professional Development System for Windows



- Advanced software tools for large project development
- Automatic code generation using DAQ Assistant and Instrument I/O Assistant
- Tight integration with a wide range of hardware
- Advanced measurement analysis and digital signal processing
- Open connectivity with DLLs, ActiveX, and .NET objects
- Capability to build DLLs, executables, and MSI installers

[Back to Top](#)

Support and Services

System Assurance Programs

NI system assurance programs are designed to make it even easier for you to own an NI system. These programs include configuration and deployment services for your NI PXI, CompactRIO, or Compact FieldPoint system. The NI Basic System Assurance Program provides a simple integration test and ensures that your system is delivered completely assembled in one box. When you configure your system with the NI Standard System Assurance Program, you can select from available NI system driver sets and application development environments to create customized, reorderable software configurations. Your system arrives fully assembled and tested in one box with your software preinstalled. When you order your system with the standard program, you also receive system-specific documentation including a bill of materials, an integration test report, a recommended maintenance plan, and frequently asked question documents. Finally, the standard program reduces the total cost of owning an NI system by providing three years of warranty coverage and calibration service. Use the online product advisors at ni.com/advisor to find a system assurance program to meet your needs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Calibration

NI measurement hardware is calibrated to ensure measurement accuracy and verify that the device meets its published specifications. To ensure the ongoing accuracy of your measurement hardware, NI offers basic or detailed recalibration service that provides ongoing ISO 9001 audit compliance and confidence in your measurements. To learn more about NI calibration services or to locate a qualified service center near you, contact your local sales office or visit ni.com/calibration.

Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- **Support** - Visit ni.com/support to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- **Discussion Forums** - Visit forums.ni.com for a diverse set of discussion boards on topics you care about.
- **Online Community** - Visit community.ni.com to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit ni.com/repair.

Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower-cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships and training credits** - to buy now and schedule training later.

Visit ni.com/training for more information.

Extended Warranty

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit ni.com/warranty.

OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

[Back to Top](#)

Detailed Specifications


The following specifications are typical for the range -40 to 70 °C unless otherwise noted.

Input Characteristics

Number of channels	4 thermocouple channels, 1 internal autozero channel, 1 internal cold-junction compensation channel
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-Sigma
Sampling mode	Scanned
Voltage measurement range	±80 mV
Temperature measurement ranges	Works over temperature ranges defined by NIST (J, K, T, E, N, B, R, S thermocouple types)
Conversion time	70 ms per channel; 420 ms total for all channels including the autozero and cold-junction channels
Common-mode voltage range	
Channel-to-COM	±1.5 V
COM-to-earth ground	±250 V
Common-mode rejection ratio (0 to 60 Hz)	
Channel-to-COM	95 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COM-to-earth ground	>170 dB
Input bandwidth (-3 dB)	15 Hz
Noise rejection (at 50 and 60 Hz)	85 dB min
Overvoltage protection	±30 V between any input and COM
Differential input impedance	20 MΩ
Input current	50 nA
Input noise	1 μV _{rms}
Gain error	0.05% max at 25 °C, 0.06% typ at -40 to 70 °C, 0.1% max at -40 to 70 °C
Offset error (with autozero channel on)	15 μV typ, 20 μV max
Gain error from source impedance	Add 0.05 ppm per Ω when source impedance >50 Ω
Offset error from source impedance	Add 0.05 μV typ, 0.07 μV max per Ω source impedance >50 Ω
Cold-junction compensation sensor accuracy	
0 to 70 °C	0.6 °C typ, 1.3 °C max
-40 to 70 °C	1.7 °C max
MTBF	633,012 hours at 25 °C; Bellcore Issue 2, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method

 Note Contact NI for Bellcore MTBF specifications at other temperatures or for MIL-HDBK-217F specifications.

Temperature Measurement Accuracy

Measurement sensitivity¹

With autozero channel on

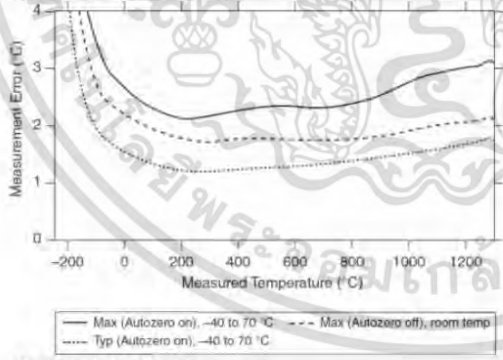
Types J, K, T, E, N	<0.07 °C
Types B	<0.25 °C
Types R, S	<0.60 °C

With autozero channel off

Types J, K, T, E, N	<0.05 °C
Types B	<0.20 °C
Types R, S	<0.45 °C

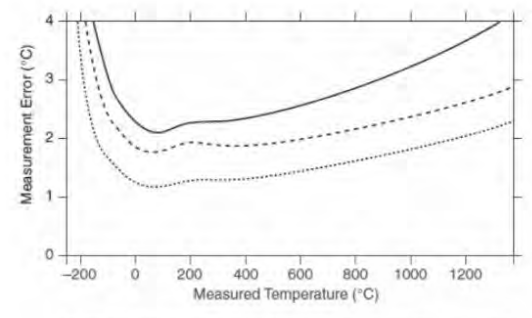
The following figures show the typical and maximum errors for each thermocouple type when used with the NI 9211 over the full temperature range. The figures also display the maximum errors for the thermocouple types with the NI 9211 at room temperature, which is 15 to 35 °C. The figures account for gain errors, offset errors, differential and integral nonlinearity, quantization errors, noise errors, and isothermal errors. The figures do not account for the accuracy of the thermocouple itself.

Thermocouple Types J and N Errors

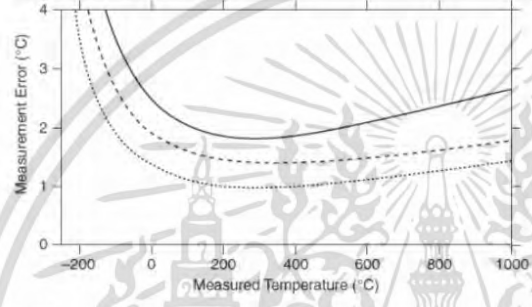


Thermocouple Type K Errors

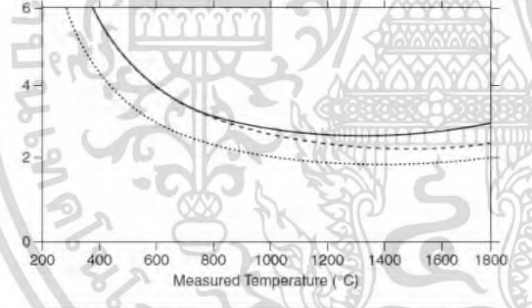
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Thermocouple Types T and E Errors

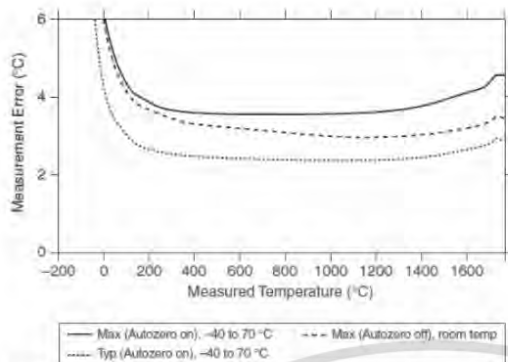


Thermocouple Type B Errors



Thermocouple Types R and S Errors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Power Requirements

Power consumption from chassis

Active mode	170 mW max
Sleep mode	4 mW max
Thermal dissipation (at 70 °C)	
Active mode	170 mW max
Sleep mode	4 mW max

Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Note For two-dimensional drawings and three-dimensional models of the C Series module and connectors, visit ni.com/dimensions and search by module number.

Screw-terminal wiring	12 to 24 AWG wire with 10 mm (0.39 in.) of insulation stripped from the end
Torque for screw terminals	0.5 to 0.6 N·m (4.4 to 5.3 lb·in.)
Ferrules	0.25 mm ² to 2.5 mm ²
Weight	150 g (5.3 oz)

Safety

Safety Voltages

Connect only voltages that are within the following limits.

Channel-to-COM	±30 V max
Isolation	
Channel-to-channel	None
Channel-to-earth ground	
Continuous	250 V _{rms} , Measurement Category II
Withstand	2,300 V _{rms} , verified by a 5 s dielectric withstand test

Measurement Category II is for measurements performed on circuits directly connected to the electrical distribution system (MAINS²). This category refers to local-level electrical distribution, such as that provided by a standard wall outlet (for example, 115 AC voltage for U.S. or 230 AC voltage for Europe). Examples of Measurement Category II are measurements performed on household appliances, portable tools, and similar hardware.

Caution Do not connect the NI 9211 to signals or use for measurements within Measurement Categories III or IV.

Hazardous Locations

U.S. (UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, AEx nC IIC T4
Canada (C-UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, Ex nC IIC T4
Europe (DEMKO)	EEx nC IIC T4

Safety Standards

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1


Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the *Online Product Certification* section.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 (IEC 61326): Class A emissions; Industrial immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions


 **Note** For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.

 **Note** For EMC compliance, operate this device with double-shielded cables.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

 **Note** For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.

Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by module number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the system and either affix ferrules to the ends of the terminal wires or use the NI 9932 backshell kit to protect the connections.

Operating vibration

Random (IEC 60068-2-64) 5 g_{rms}, 10 to 500 Hz

Sinusoidal (IEC 60068-2-6) 5 g, 10 to 500 Hz

Operating shock (IEC 60068-2-27)

30 g, 11 ms half sine, 50 g, 3 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations

Environmental

National Instruments C Series modules are intended for indoor use only but may be used outdoors if installed in a suitable enclosure. Refer to the manual for the chassis you are using for more information about meeting these specifications.

Operating temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)

-40 to 70 °C

Storage temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)

-40 to 85 °C

Ingress protection

IP 40

Operating humidity (IEC 60068-2-56)

10 to 90% RH, noncondensing

Storage humidity (IEC 60068-2-56)

5 to 95% RH, noncondensing

Maximum altitude

2,000 m

Pollution Degree (IEC 60664)


2

Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

 **EU Customers** At the end of their life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.

电子信息产品污染控制管理办法 (中国 RoHS)



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

Calibration

You can obtain the calibration certificate for this device at ni.com/calibration.

Calibration interval

1 year

¹ Measurement sensitivity represents the smallest change in temperature that a sensor can detect. It is a function of noise. The values assume the full measurement range of the standard thermocouple sensor according to ASTM E230-87.

² MAINS is defined as a hazardous live electrical supply system that powers hardware. Suitably rated measuring circuits may be connected to the MAINS for measuring purposes.

[Back to Top](#)

©2010 National Instruments. All rights reserved. CompactRIO, CVI, FieldPoint, LabVIEW, Measurement Studio, National Instruments, National Instruments Alliance Partner, NI, ni.com, NI CompactDAQ, and SignalExpress are trademarks of National Instruments. The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from National Instruments and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with National Instruments.

[My Profile](#) | [RSS](#) | [Privacy](#) | [Legal](#) | [Contact NI](#) © 2014 National Instruments Corporation. All rights reserved.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEATURES

- Real 5 1/2 digit reading resolution
- Up to 150 rdgs/s measurement speed
- True-RMS AC voltage and AC current measuring
- 1 GB hard flash size, mass storage configuration files and data files
- Built-in cold terminal compensation for thermocouple temperature measurements
- USB Device, USB Host, LAN (plus GPIB with RSDM3055A only)
- Supports remote control via commands and is compatible with commands of mainstream multimeters
- Includes EasySDM computer software
- Dimensions 282 x 260 x 105 mm
- Weight 3.33 kg
- 4.3 TFT-LCD 280*272
- Support double display, Chinese and English menu
- Built-in help system makes information acquisition easier
- File management (support for U-disc and local storage)
- 3-year warranty

RS PRO Digital Multimeters - RSDM3055A Bench Digital Multimeter

RS Stock No.: 1236466



RS Professionally Approved Products bring to you professional quality parts across all product categories. Our product range has been tested by engineers and provides a comparable quality to the leading brands without paying a premium price.



Product Description

RS PRO RSDM3055 and RSDM3055A Digital Multimeter (DMM)

RS PRO RSDM3055 (123-6465) is a 5 digit multimeter with a dual-readout display. RS PRO RSDM3055A (123-6466) is of similar specification but, in addition, includes a USB to GPIB adapter. These devices can measure capacitance, voltage, electrical current, frequency, period, temperature and resistance with diode and continuity check.

These models come equipped with a 4.3 inch TFT LCD screen. They feature many powerful math and statistical functions and are designed for users who need high performance together with multiple functions and automatic measurements. The powerful testing engine measures speed up to 150 rdgs / s.

Other attributes include 1 GB nand total memory capacity, mass storage instrument settings, historical data and external U disk storage. The instruments can support VXI11, USBTMC remote control as well as interconnection with National Instruments' LabVIEW. An SCPI command programming manual is provided in support of remote control operation programming.

RS PRO RSDM3055 (123-6465) is compatible with mainstream multimeter command sets and uses the compatible language with SCPI for transmission and control. So conversion from an existing test environment is simple.

RS PRO range of handheld and bench digital multimeters are RS approved meaning that they are great value for money and high quality you can rely on

General Specifications

Model Number (p)	RSDM3055A
Multimeter Type	Bench
Functions Measured	AC Current, AC Voltage, Capacitance, Continuity, DC Current, DC Voltage, Diode, Frequency, Period, Resistance, Temperature
True RMS	Yes
Display Type	LCD
Operating Temperature (Min to Max)	0-50°C
Storage Temperature (Min to Max)	-20°C-70°C
Diode Test	Yes
Continuity Test	Yes
IO Interface	USB

Digital Multimeters



Measurement

Type	Absolute Maximum Measurement	Resolution	Best Accuracy
DC Current	10A ac		0.06%
AC Current	10A dc		0.50%
Resistance	100MΩ		0.02%
DC Voltage	1000V dc		0.02%
AC Voltage	750V ac		0.20%
Capacitance	10mF		1%
Temperature	+400 (T) °C, +660 (RTD) °C, +1000 (E) °C, +1200 (J) °C, +1300 (N) °C, +1370 (K) °C, +1760 (R) °C, +1760 (S) °C, +1820 (B) °C		0.16 (RTD) °C, 0.5 (E) °C, 0.5 (J) °C, 0.5 (K) °C, 0.5 (N) °C, 0.5 (R) °C, 0.5 (T) °C, 0.6 (S) °C, 0.76 (B) °C
Frequency	1MHz		

Electrical Specifications

Battery Type	1.5 V AAA
Safety Category Voltage	600 V, 1000 V

Mechanical Specifications

Dimensions	282 x 260 x 105mm
Width	260mm
Length	282mm
Height	105mm
Weight	3.3kg

Protection Category

Safety Category Level	CAT I, CAT II
-----------------------	---------------

Approvals

Compliance/Certifications	IEC61010-1:2001.
Declarations	RoHS Certificate of Compliance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Digital Multimeters



Similar Products

Stock No.	Brand	Product Name	Multimeter Type	Functions Measured	Digit Resolution
144-5337	RS PRO	HS608 MeterScope Handheld Digital Multimeter	Handheld	AC Current, AC Voltage, Capacitance, DC Current, DC Voltage, Frequency, Resistance, Temperature	
124-1960	RS PRO	IDM505 Handheld Digital Multimeter	Handheld	AC Current, AC Voltage, Capacitance, Continuity, DC Current, DC Voltage, Diode, Duty Cycle, Frequency, Resistance, Temperature	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TM-4001 / TM-4002 / TM-4003

Hot-Wire Air Velocity Meter

Feature:

- Fast Response Probe.
- Air Flow Volume.
- Instant / Avg / 2/3 V max Flow Measurement.
- Velocity m/s, ft/min, knots, km/hr, mph.
- Data hold & Maximum / Minimum function.
- Manual data memory and read function (99 records). (TM-4001/TM-4002)
- LCD triple display.
- Telescoping probe.
- Temperature measurement.
- Humidity measurement.(TM-4002/4003)
- Auto data memory (30,000 records).(TM-4003)
- USB interface. (TM-4003)
- Calculate Dew point temperature, Wet bulb temperature. (TM-4002 / TM-4003)
- Absolute pressure measurement.(TM-4003)

Air flow(volume) calculation :

Unit	Range	Resolution	Accuracy
CMM	0~9999	0.1	---
CFM	0~9999	0.1	---

Temperature Measurement:

Unit	Range	Resolution	Accuracy
°C	-20~50	0.1	±1°C
°F	-4~122	0.1	±1.8°F

Humidity:

Unit	Range	Resolution	Accuracy
%RH	20~80	0.1	±3.5%RH
%RH	<20 , >80	0.1	±5%RH

Air Velocity Measurement:

Unit	Range	Resolution	Accuracy
m/s	0.01 to 25.00 m/s	0.01	±3% of reading ±1%FS
Km/hr(kph)	0.02 to 144.0 km/hr	0.1	
mph	0.12 to 89.5 MPH	0.1	
Knots(kts)	0.01 to 77.75 knots	0.01	
ft/min(fpm)	0 to 7874.0 ft/min	0.1	
Beaufort	1~12	1	---

Functions :

	Air speed	Flow	99 Record	30000 Records	Temperature	Humidity	Pressure	USB
TM-4001 (with HP-01)	●	●	●		●			
TM-4002 (with HP-02)	●	●	●		●	●		
TM-4003 (with HP-02)	●	●		●	●	●	●	●



- Dimension : 156x73x35 mm(LxWxH)
- Weight : 250g.
- Power :
Internal : 6 batteries 1.5V AAA-UM4.
External : Power Adutor AC/100~240V
to DC 9V/0.5A.

Absolute Pressure:

Unit	Range	Resolution	Accuracy
hPa	350~1100	0.1	±2hPa
mmHg	263~825	0.1	±1.5mmHg
inHg	10.3~32	0.1	±0.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Thermal Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apthermeng

Research Paper



High-performance flexible thermoelectric generator based on silicone rubber and cover with graphite sheet

Jakrit Gobpant^a, Bhanupol Klongratog^a, Chalernpol Rudradawong^a, Rachsak Sakdanuphab^{b,c}, Prasapporn Junlabhut^d, Pilaipon Nuthongkum^d, Pichet Limsuwan^a, Apaporn Sakulkalavek^{a,b,*}

^a Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

^b Electronic and Optoelectronic Device Research Unit, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

^c College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Rd. Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

^d Faculty of Science, Rajabhat Rajanagarindra University, Chachoengsao 24000, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Flexible thermoelectric generators
Silicone rubber
Graphite sheet

ABSTRACT

Harvesting thermal energy through a flexible thermoelectric generator (FTEG) offers an excellent micro-power solution for energizing node sensors in the realm of Internet of Things (IoT) and wearable electronics. Nonetheless, current FTEG suffer from drawbacks including low efficiency, significant thermal resistance, and complex manufacturing procedures. In this study, a high-performance FTEG using silicone rubber was designed and fabricated using a straightforward process. The finite-element method was used to optimize the copper electrode thickness, and the bendable substrate layers with various thermal conductivity were studied for the first time. The copper electrode thickness of 0.1 mm was selected because it offers high flexibility and bendability while still providing a relatively high-power output. The $5 \times 5 \text{ cm}^2$ FTEG device was fabricated and covered with a bendable substrate. Silicon rubber ($0.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), silicon rubber added 5% graphene ($0.14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), and graphite sheets ($15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) were used as bendable substrates. The FTEG cover with graphite sheets has a maximum output voltage of 1.1 V under a temperature difference (ΔT) at 65°C . Its maximum output power is 162.4 mW, corresponding to a power density of $6499.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ under the same above ΔT . The experimental findings indicated that integrating a bendable substrate with high thermal conductivity and electrical insulation properties enhances the performance of the FTEG.

1. Introduction

The market for wireless sensors and their accompanying micro-power devices is increasing exponentially [1]. These devices should be maintenance-free and not require battery replacement or charging systems. Recently, there has been significant exploration and development of various energy harvesting technologies as potential solutions for powering diverse systems [2–5]. Thermal energy sources have considerable potential among the available energy sources in the environment. They can be obtained from various sources, such as the wasted heat generated by electric household appliances, office equipment, industrial machines, exhaust lines of automobiles and motorcycles, and even from human body heat [2]. Thermoelectric generators (TEGs), which transform heat into electrical energy, hold great promise as a viable solution for self-powered microelectronic systems [2,6–13]. A TEG device is

composed of a series of p-type and n-type semiconductor elements, commonly referred to as “legs,” that are connected electrically in series while being thermally connected in parallel. The temperature difference across the TEG device produces a voltage that can be utilized to power an external load. However, traditional TEGs are rigid devices in which the thermoelectric elements are enclosed between two inflexible substrates that are electrically insulating but thermally conductive (such as Al_2O_3).

In recent years, various approaches for creating flexible thermoelectric generators (FTEGs) have been considered [2,6–13]. Flexible thermoelectric generators (FTEGs) show particular promise due to their excellent thermoelectric performance and flexibility, making them highly suitable for capturing waste heat from diverse sources, including round or irregular surfaces [12–14]. Many previous studies demonstrated the flexibility of the TEGs by removing the ceramic substrate of

* Corresponding author at: Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
E-mail address: apaporn.sa@kmitl.ac.th (A. Sakulkalavek).

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121656>

Received 24 June 2023; Received in revised form 31 August 2023; Accepted 20 September 2023

Available online 21 September 2023

1359-4311/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

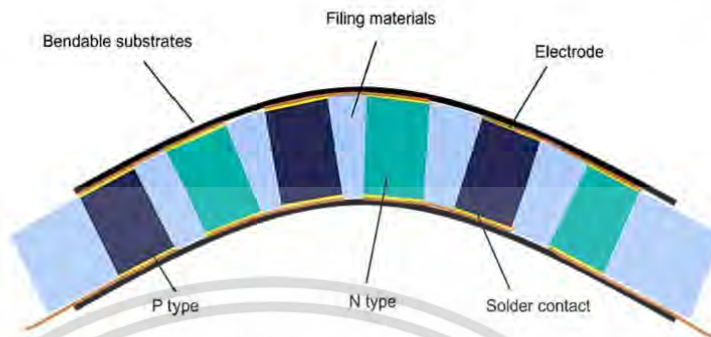


Fig. 1. FTEG components.

the inflexible TEGs and filling the space between n- and p-thermoelectric elements with a polymer material with low thermal conductivity [2,7,8,15]. Furthermore, thin metal electrodes are suggested for use in interconnecting thermoelectric elements for a high degree of flexibility. In this fabrication process, an FTEG device comprises five components: thermoelectric legs (made of p- and n-type materials) with a transition layer, solder, electrodes, filling materials, and bendable substrates (Fig. 1).

As illustrated in Fig. 1, the electrodes are critical components in the FTEG device because they conduct electricity and directly affect the output power obtained from the device. Previous studies focus on thin film-based electrodes such as vacuum-depositing gold [16] and aluminum thin film [17]. In most conventional thermoelectric modules, the electrode material is copper because of its low cost and high electrical conductivity [6]. Although using a thin copper electrode can enhance flexibility, it can also increase electrical resistance [2]. Thus, the thickness of the copper electrode will be optimized based on both highly conductive and flexible.

Apart from flexibility, it is crucial for a suitable filling material to possess high stretchability and the ability to withstand external physical or thermal shocks. Polydimethylsiloxane (PDMS) is commonly employed as a filling material for FTEGs due to its ability to safeguard the thermoelectric legs and electrodes, particularly when undergoing bending or deformation [17,18]. Nevertheless, the difference in thermal expansion coefficients between the thermoelectric material and PDMS can lead to mechanical damage to the thermoelectric elements when subjected to heating. [7]. Ramesh et al. produced FTEG devices using three distinct filler materials: (i) pure PDMS (with a thermal conductivity of $0.15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), (ii) an aerogel-silicone composite with a thermal conductivity of $0.12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, and (iii) an aerogel-silicone composite with a thermal conductivity of $0.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. The result demonstrated that the measured open-circuit voltage (V_{oc}) increases with decreasing filler thermal conductivity [8].

In addition, most FTEG devices require bendable substrates to support the thermoelectric components, including legs, electrodes, and filler materials. An ideal substrate should also possess high elasticity and withstand specific external physical or thermal stresses [6]. Polyimide is a frequently used substrate for most thin-film-based FTEGs [11,13,19–21]. Compared with polyimide relatively thin substrates, considerably thicker bendable substrates, such as PDMS and 3D-printed elastomer matrix, are also used [3,4,8,22–24]. These substrates have high flexibility and stretchability but relatively low thermal conductivity. In practical use, the bendable substrate layers must focus on preventing electrical short circuits and minimizing energy loss to enhance

FTEG performance. The bendable substrate should possess high thermal conductivity and electrical resistivity. Recently, Toan et al. [7] fabricated a FTEG comprising 160 pairs of n-type and p-type thermoelectric elements. The filling material employed was silicone rubber. In the subsequent steps, the FTEG was covered with a 0.5 mm thick layer of α -gel. This α -gel, known for its high thermal conductivity, effectively dissipates heat. The fabricated FTEG shows output voltage of 1 V when subjected to a temperature difference (ΔT) of 60 °C. Furthermore, it achieved a maximum output power of 77.41 mW, corresponding to a power density of $552.9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ under the same aforementioned ΔT . These results unequivocally highlight the superior performance of the fabricated flexible TEG when compared to recent related works. However, the thermal conductivity of the bendable substrate was not extensively documented.

This work aims to propose a simple process for fabricating high-performance FTEG, which integrates various bendable substrates. Bendable substrates such as silicon rubber ($0.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), 5% graphene-added silicon rubber ($0.14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), and graphite sheets ($15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) were utilized. Moreover, the copper electrode thickness was fine-tuned to strike a balance between high conductivity and flexibility. This optimization was achieved through a finite-element model designed to simulate the characteristics of charge carrier transport. Finally, the V_{oc} (Open-Circuit Voltage) and output power of FTEG devices with different bendable substrates were measured and compared with previous studies.

2. Materials and simulation setup

2.1. Finite-element simulations

Fig. 2 illustrates the geometry of the TEG and its materials structure with two parts of the thermoelectric legs: one leg considered p-type and the other n-type. The geometric dimensions, length, and cross-section area of the thermoelectric legs, the electrode layer, the distance separating elements, and heat spreaders will be designed during the heat conduction and electric charge simulations. The heat conduction analysis of the schematic TEG leads to the generated electric power and maximum conversion efficiency.

The mathematical model represents the concepts of the thermoelectric generator of single p-n legs with copper metal and thermal contacts on the top and bottom, as presented in the [supplementary information \(SI\)](#). The numerical solutions to the governing equations are obtained using the ANSYS software and the finite-element method (FEM). One method of improving the performance of an FTEG device is

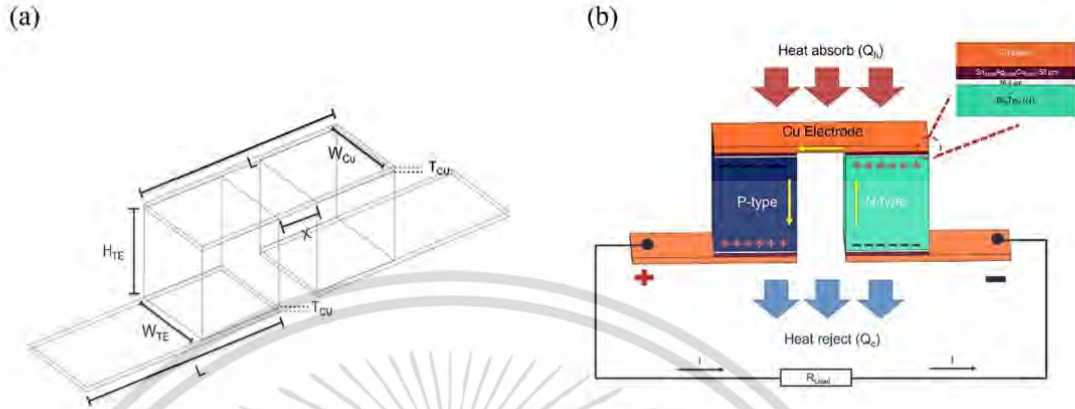


Fig. 2. (a) Geometric dimensions of the thermoelectric pair and (b) schematic of a model for a thermoelectric generator (TEG).

to optimize the thickness of the copper electrode. Before using the model for analysis, the model was validated in a previous study [25]. The results are presented in Fig. S1.

In this study, the copper electrode thickness is optimized within a specific value to maintain its flexibility. In this case, the device resistance is composed of the resistance of the p- and n-legs and the copper electrode thickness as presented in Equation (1);

$$R(n) = R_{Bi_2Te_3} + R_{Cu_{electrode}} \\ = \frac{2n}{\sigma_{Bi_2Te_3}} \frac{H_{TE}}{W_{TE}} + \frac{4n}{\sigma_{Cu}} \frac{T_{Cu}}{W_{TE}} + \frac{n-L}{\sigma_{Cu}} \frac{L}{T_{Cu}W_{TE}} + \frac{(n-1)}{\sigma_{Cu}} \frac{L}{T_{Cu}W_{TE}} \quad (1)$$

where n is the number of p-n legs, H_{TE} is thermoelectric leg length, W_{TE} is thermoelectric leg width, and T_{Cu} and L are the thickness and length of the Cu electrode. The properties of the thermoelectric legs, copper electrode, and solder are summarized in Table 1.

2.2. Design and fabrication process

The $5 \times 5 \text{ cm}^2$ FTEG module prototype was fabricated using p-type and n-type thermoelectric legs composed of bismuth telluride base materials from a commercial supplier. These legs were $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ in size and had Ni ($4 \mu\text{m}$) as transition layer contacts on either side. They were arranged in an 18×18 array with 2 mm spacing, separating the p-type and n-type elements for 98 pairs. The legs were encased in silicone rubber to increase insulation and flexibility. A dot of $\text{Sn}_{0.955}\text{Ag}_{0.038}\text{Cu}_{0.007}$ solder paste with a 0.3-mm diameter was placed on the patterned electrodes by an automated dispensing machine. A copper electrode was used to connect the p-type and n-type thermoelectric elements. The thickness of the copper electrode was optimized using simulation. The fabrication process is presented in Fig. 3. The prototype FTEG is depicted in Fig. 3(f), this is referred to as open cell of FTEG. Finally, the open cell of FTEG was covered with various type of bendable substrate, SR, silicon rubber 5% graphene added (SR@G), and graphite sheets.

Table 1
Thermoelectric material-based bismuth telluride properties, copper electrode, and solder paste.

Materials	σ (S/m)	S ($\mu\text{V}/\text{K}$)	K (W/mK)
$\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ (p-type)	1.01×10^6	-207	1.35
$\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}_{0.3}$ (n-type)	1.0×10^6	-195	1.42
Copper electrode	5.96×10^7	N/A	400
$\text{Sn}_{0.955}\text{Ag}_{0.038}\text{Cu}_{0.007}$	8×10^8	N/A	64

2.3. Measurement unit setup

The schematic and photograph of an experimental setup for the FTEG performance are depicted in Fig. 4 (a) and 4(b). The FTEG with various bendable substrate was inserted between a ceramic hot plate and cooling system. The bottom side of the FTEG device is where the hot plate is located. Typically, a cooling system is employed, which could involve water, oil, or a fan, to create a significant temperature difference across the module, allowing for more effective energy harvesting [26].

In this study, the cold side of the FTEG is used fan for colling system. The hot and cold side temperatures were measured by a K-type thermocouple with accompanying data recorded using a National Instruments NI cDAQ-9174 data logger to capture the temperature characteristics. The FTEG is connected to varying resistance (R_{load}), and the open-circuit voltage (V_{oc}) and current (I) are measured using Keithley 2100-digit multimeter and RS pro 3055A digital multimeter. Different states, such as open-circuit and load-connected states, are examined through testing. The evaluation is conducted with and without load resistors being attached. The output power was estimated according to Equation (2) [8].

$$P = \frac{V_{OC}^2}{4R_{out}} \quad (2)$$

where R_{out} is the matching load resistance of the FTEG.

3. Results and discussion

3.1. The simulation result of copper electrode thickness

Fig. 5 presents the simulation results of the output power of single p-n legs at varying copper electrode thicknesses. The temperature difference and load resistance were maintained at $100 \text{ }^\circ\text{C}$ and $0.3 \text{ }\Omega$. As depicted in Fig. 5, as the copper electrode thickness increases, the output power rapidly increases and then reaches a stable value. The maximum output power was 6.02 mW when the copper electrode thickness was approximately 0.23 mm . We further study the output power of the p-n legs by simulating the temperature difference are $200 \text{ }^\circ\text{C}$ and $300 \text{ }^\circ\text{C}$. The maximum output power corresponding with copper electrode thickness is presented in Table 2: the maximum output power and suitability of the copper electrode increase as the temperature difference increases.

The output power of a thermoelectric generator is directly proportion to current density. The maximum current density of a thermoelectric element is limited by mobility of charge carrier (electron and hole).

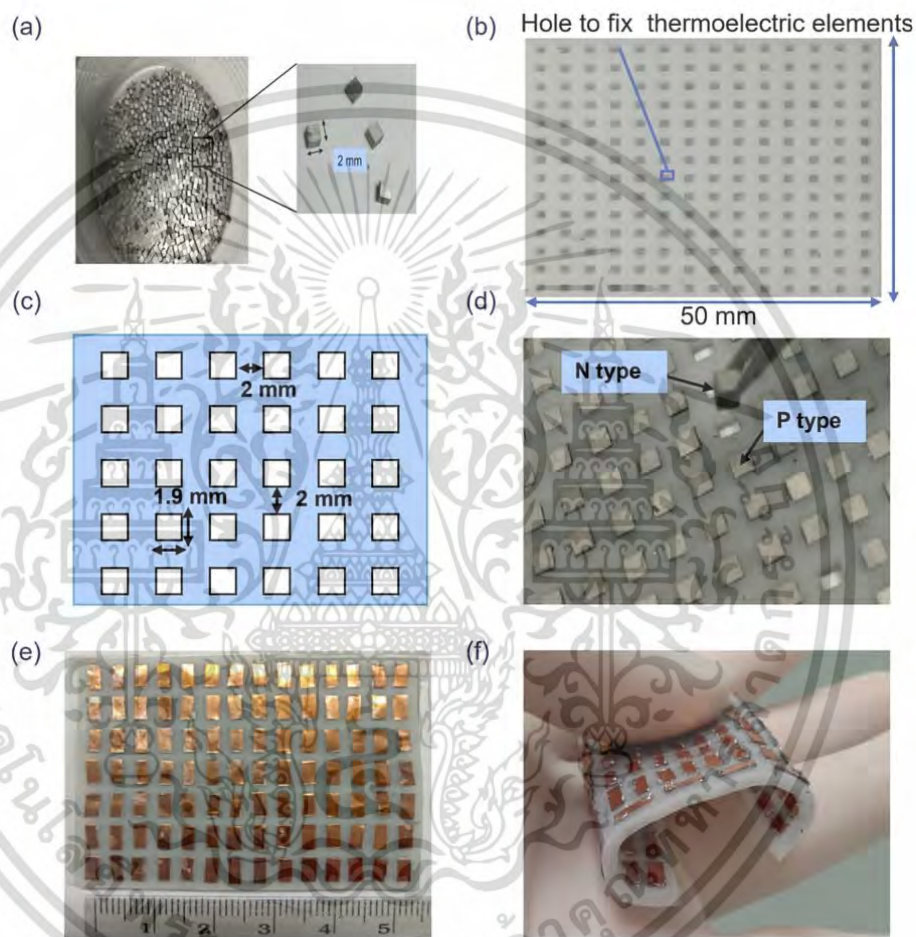


Fig. 3. Fabrication process of FTEG. (a) Thermoelectric elements with dimensions of $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. (b) Silicone rubber sheet with holes 18 rows and 18 columns of holes (c) The size of the hole was $1.9 \times 1.9 \text{ mm}^2$, and the thermoelectric material was uniformly spaced at 2 mm (d) The thermoelectric elements are embedded within the patterned silicone rubber. (e) Solder adhesive and copper sheet were applied on top and bottom of the thermoelectric elements and completely fabricated. (f) Open cell $5 \times 5 \text{ cm}^2$ FTEG module prototype.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

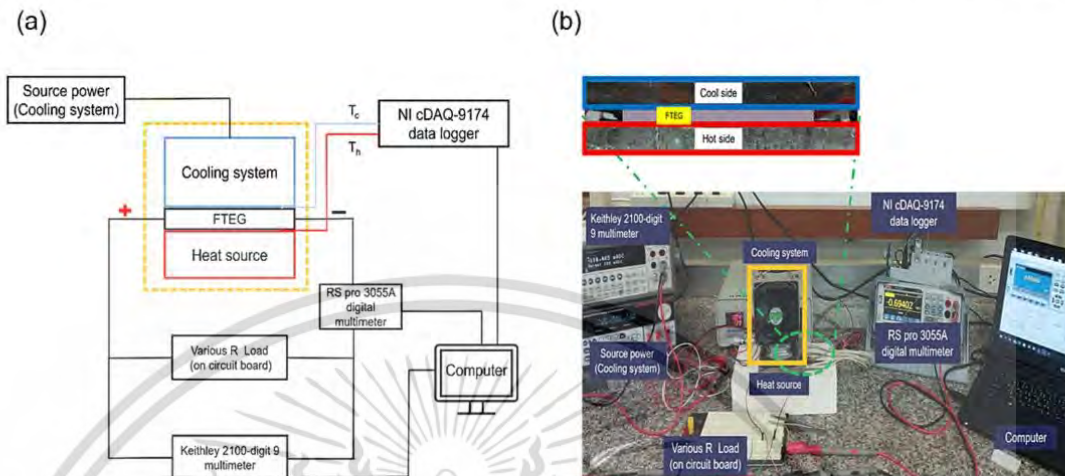


Fig. 4. Schematic and photograph of an experimental setup for FTEG performance.

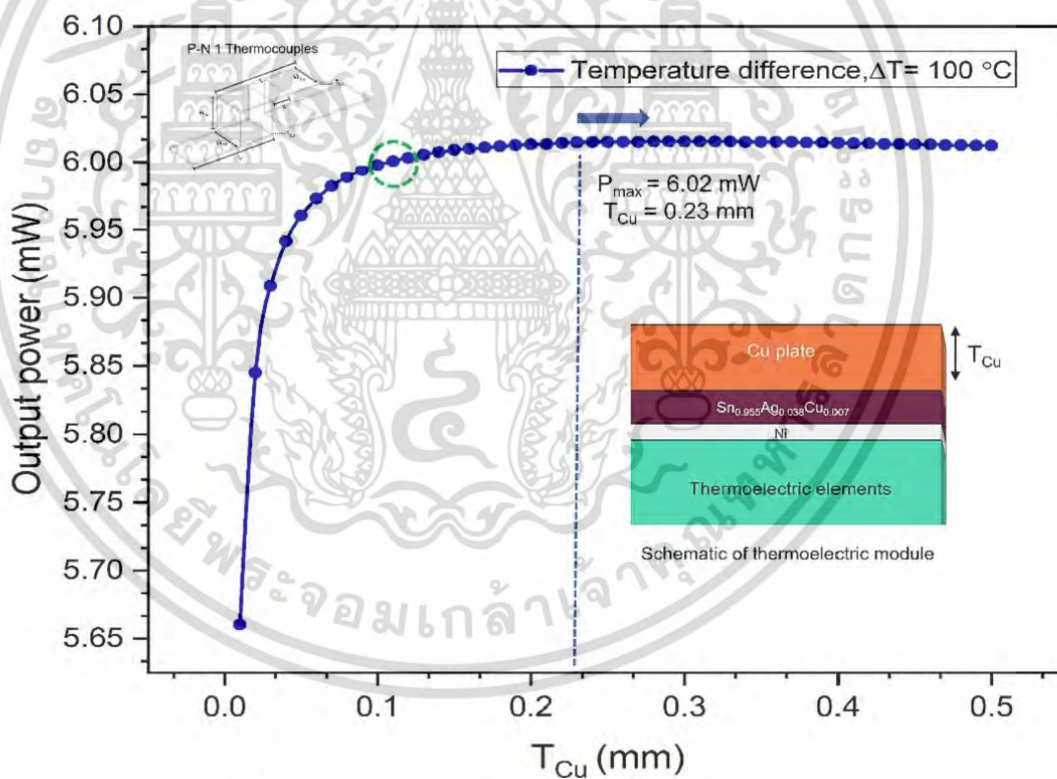


Fig. 5. Variation in output power of thermocouples with thickness of the copper contacts.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2
Relationship between copper contact thickness and output power of thermocouples at different temperature differences.

Temperature difference, ΔT (°C): $T_c = 30$ °C	I (mA)	V (mV)	P_{max} (mW)	T_{Cu} (mm)
100	141.60	42.48	6.02	0.23
200	290.74	87.22	25.36	0.25
300	439.91	131.97	58.06	0.28

The higher charge mobility automatically leads to higher current density, but high carrier density can compensate for a lower-mobility semiconductor. The total current density (J) is the sum of the electron (J_e) and hole (J_h) components, as presented in Eq. (3):

$$J = J_e + J_h = (en\mu_e + ep\mu_h)E \quad (3)$$

where e is charge carrier,

- n and p are electron and hole density.
- μ_e and μ_h are electron and hole mobility.
- E is the magnitude of the electric field applied to a material.

In this study, copper electrode behaves as a channel for charge carrier flow. Thicker channels can reach high carrier mobility, down to

$$\frac{R_{N \text{ and P type } R_{\text{Silicone rubber}}} + (T_h - T_c)}{R_{N \text{ and P type } R_{\text{Silicone rubber}}} + 2R_{\text{bendable substrate layers}} + 2R_{\text{Contact}} + 2R_{Cu} + \frac{R_{N \text{ and P type } R_{\text{Silicone rubber}}}}{R_{N \text{ and P type } R_{\text{Silicone rubber}}}} \quad (4)$$

channel thickness that limited charge carrier mobility. Furthermore, the charge carrier increased with increasing temperature difference, resulting in the proper copper electrode increasing, as shown in Table 2. According to the results of a mathematical modeling study, the electrode thickness that resulted in the highest power output was approximately 0.2 mm. However, because of its inflexibility and rigidity, a copper electrode thickness of 0.1 mm was selected. This thickness offers a high level of flexibility and bendability while still providing a comparable power output with copper electrode of 0.2 mm.

3.2. Experimental results of FTEG cover with various bendable

This study used silicone rubber with a thermal conductivity of $0.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ as the filler material. Three types of bendable substrate layers with various thermal conductivity were studied. The thermal conductivities of silicone rubber ($0.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) and silicone rubber with 5% graphene added ($0.14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) were measured using the laser flash method. The details were presented in SI (Fig. S2). The graphite sheet was obtained from a commercial supplier; its thermal conductivity in the Z-direction is $15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. The FTEG fabrication process is presented in Fig. 2; all bendable substrate layers were maintained at a thickness of 0.2 mm and were affixed to the FTEG through the application of adhesive bonding. Fig. 6(a) illustrates the photo images of the FTEG covered with various bendable substrates.

In the experimental setup, the hot and cold sides were measured by a K-type thermocouple, and the reported temperatures at steady-state were 147 °C and 82 °C. The open-circuit voltage (V_{oc}) of the FTEG with various bendable substrates rises proportionally as the temperature difference harvested across the device increases. This relationship is depicted in Fig. 6(b). At steady-state, the V_{oc} were 0.75 V, 1.0 V and 1.1

V for FTEG (SR), FTEG (SR@G) and FTEG (graphite sheet). Load resistors are connected to the output terminal of the device to evaluate the internal resistance and the effect of bendable substrate on output power of the produced FTEG.

Fig. 6 (c) presents the relationship between the output power and different load resistor values. The FTEG integrated with a graphite sheet exhibits the highest output power, reaching 160 mW under a temperature difference (ΔT) of 65 °C and a load resistor of 2Ω . The total electrical resistance of the $5 \times 5 \text{ cm}^2$ FTEG module prototype obtained in this study was approximately 2Ω . This value was comparable to previous studies [27,28]. The relationships between the power density and temperature difference are depicted in Fig. 6(d). The maximum power density of the load output is 6.5 mW/cm^2 obtained in the FTEG with the graphite sheet when considering a substrate area of 25 cm^2 comprising thermoelectric materials and gaps between thermoelectric components. The findings indicate that by integrating the proposed FTEG devices with a bendable substrate possessing high thermal conductivity, both the output power and power density can be substantially improved.

On the basis of the thermal equivalent circuit model (Fig. 7(a)), the temperature difference between both sides of thermoelectric elements ($\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1}$) is defined in Equation (4);

$$\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1}$$

where $R_{N \text{ and P type}}$ is the thermal resistance of the thermoelectric element, $R_{\text{Silicone rubber}}$ is the thermal resistance of silicone rubber, $R_{\text{bendable substrate layers}}$ is the thermal resistance of bendable substrate layers, R_{Cu} is the thermal resistance of the copper electrode, and R_{Contact} is the thermal resistance of the solder contact.

The output power of the thermoelectric generator is directly proportional to the temperature difference between both sides of thermoelectric elements (ΔT_1). steady-state model is developed, and a comprehensive investigation of design parameters is carried out using finite element method (FEM) to evaluate ΔT_1 . The simulation maintains the hot and cold side temperatures at 147 °C and 82 °C. Upon applying the heat source, the temperature on the hot side increases significantly, whereas the temperature on the cold side experiences a slight rise. This phenomenon occurs because of heat transfer from the hot side to the cold side of the FTEG through conduction. From simulation results, the ΔT_1 were approximately 146.4 °C, 126.9 °C and 123.4 °C for FTEG (graphite sheet), FTEG (SR@G), and FTEG (SR). The simulation results reveal that the low thermal conductivity of bendable substrate inhibits heat dissipation, decreasing the temperature difference between the hot and cold junctions of the thermoelectric elements [29]. Consequently, the restricted temperature difference significantly reduces the output power of the FTEG.

Table 3 presents the performance of FTEGs in previous studies and this study. Our developed FTEG cover with graphite sheet exhibits higher output power and greater power density than recent publications [2,7,9–13]. To our knowledge, this value is considered relatively high compared with other reported FTEG, demonstrating the effectiveness of our design and the potential practicality of the FTEG.

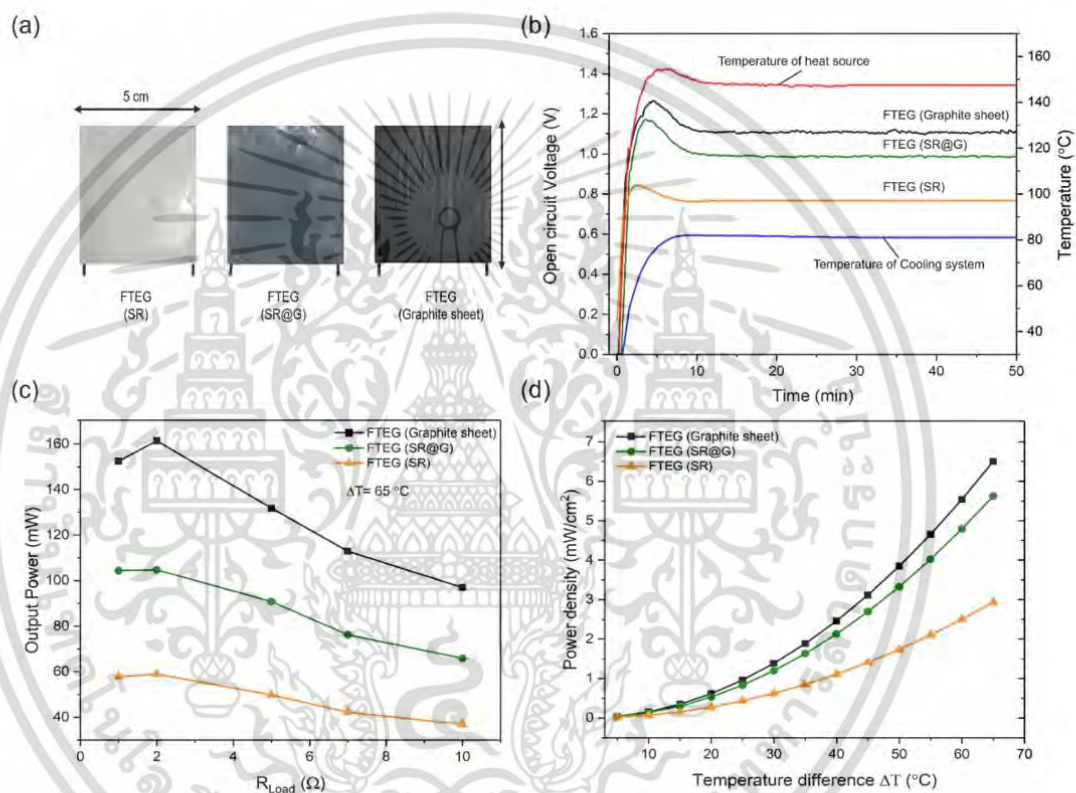


Fig. 6. (a) Photos of FTEG (graphite sheet), FTEG(SR@G), FTEG(SR), and device dimensions, (b) monitoring temperature data over time in the open-circuit condition with various bendable substrate, (c) the generated output power of the FTEG module, and (d) the relationships between power density with various heat spreaders materials at temperature differences up to 65 °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

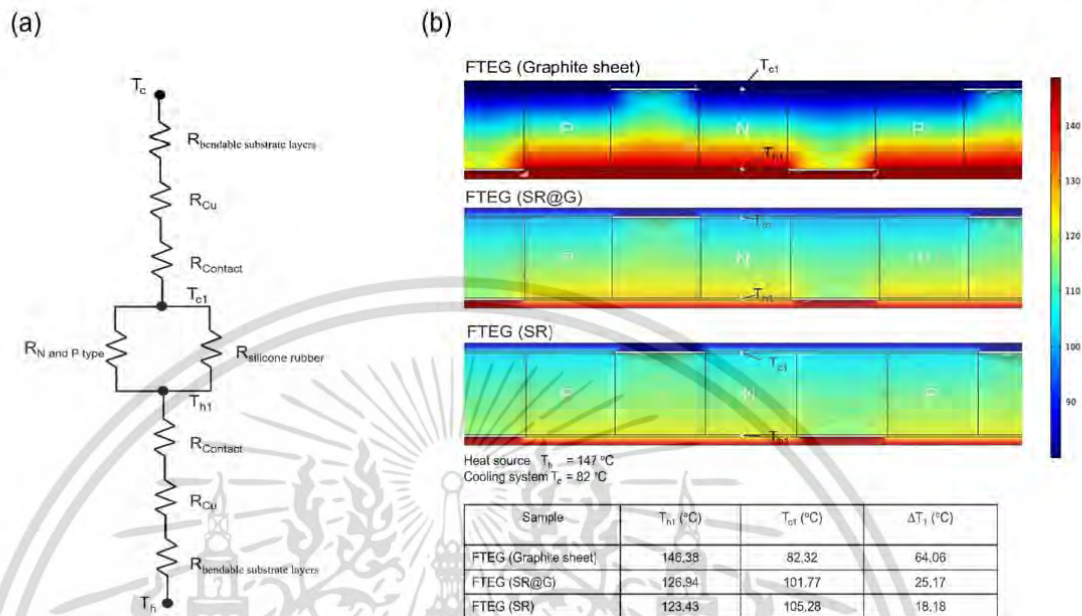


Fig. 7. (a) Thermal equivalent circuit and (b) results of mathematical model, illustrating the heat transfer characteristics of different samples.

Table 3
Comparison of FTEG performance.

N-P Pairs	Encapsulate & Substrate	Size dimensions (mm^2)	Temperature difference ΔT (K)	Power (mW)	Power density ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	References
204	Polyimide	210×75	52	95.9	608	[2]
160	Silicon rubber	240×90	60	77.4	358	[7]
24	PDMS	10×10	4	0.005	5	[9]
12	PCB	43×13	35	0.023	4.12	[10]
10	Polyimide	60×35	50	0.029	1.38	[11]
220	PDMS	39×43	40	7.02	41.8	[12]
100	Polyimide	-	100	90	-	[13]
98	Silicone rubber (Graphite sheet)	50×50	65	162.4	6499.1	This study
98	Silicone rubber (SR@G)	50×50	65	140.5	5619.6	This study
98	Silicone rubber (SR)	50×50	65	73.3	2931.5	This study

4. Conclusion

This study demonstrates the fabrication and evaluation of the FTEG and its applications as a power generator. The FTEG containing 98 pairs of the n- and p-type thermoelectric elements are fabricated successfully, based on the silicone rubber as a filling material. The copper electrode thickness in FTEG is conducted by finite-element simulation. As the copper electrode thickness increases, the output power rapidly increases and reaches a stable value. The maximum output power was found when the copper electrode thickness was approximately 0.2 mm. However, because of its inflexibility and rigidity, a copper electrode thickness of 0.1 mm was selected. Three types of bendable substrate layers with various thermal conductivity, silicone rubber ($0.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), silicone rubber with 5% graphene added ($0.14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), and graphite sheet ($15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) were studied. The results confirm that the bendable substrates typically have poor thermal conductivity such that the heat generated during operation is difficult to remove, decreasing the temperature difference across the thermoelectric element. Consequently,

the fabricated FTEG cover with graphite sheet has a maximum output power of 162.4 mW, corresponding to a power density of 6499.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ under $\Delta T = 65^\circ\text{C}$. The fabricated FTEG exhibits higher performance and flexibility than in related studies. Fabricated FTEG shows higher performance much better in comparison to the recent related works.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This study was supported by National Research Council of Thailand (NRCT) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (N42A660508) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (RE-KRIS/FF65/02), Thailand. It was also supported by the National Research Council of Thailand (NRCT) and a grant funded by The Royal Golden Jubilee Ph.D. (RGJ) (N41A650124).

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121656>.

References

- [1] M. Haras, T. Skotnicki, Thermoelectricity for IoT – A review, *Nano Energy* 54 (2018) 461–476, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.09.013>.
- [2] N.V. Toan, T.T.K. Tuoi, T. Ono, High-performance flexible thermoelectric generator for self-powered wireless BLE sensing systems, *J. Power Sources* 536 (2022), 231504, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231504>.
- [3] Y. Sargolzaeiaval, V.P. Ramesh, T.V. Neumann, V. Misra, D. Vashae, M.D. Dickey, M.C. Ozturk, Flexible thermoelectric generators for body heat harvesting – Enhanced device performance using high thermal conductivity elastomer encapsulation on liquid metal interconnects, *Appl. Energy* 262 (2020), 114370, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114370>.
- [4] H. Yuan, S. Qing, S. Ren, A. Rezaia, L. Rosendahl, X. Wen, J. Zhong, X. Gou, S. Tang, P. E. Modelling and optimization analysis of a novel hollow flexible-filler-based bulk thermoelectric generator for human body sensor, *Energy* 281 (2023), 128290, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128290>.
- [5] L.G. Tran, H.K. Cha, W.T. Park, A compact wireless power transfer system at 915 MHz with supercapacitor for optogenetics application, *Sens. Actuator A Phys.* 285 (2019) 386–394, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.029>.
- [6] T. Cao, X.L. Shi, Z.G. Chen, Advances in the design and assembly of flexible thermoelectric devices, *Prog. Mater. Sci.* 131 (2023), 101003, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101003>.
- [7] N.V. Toan, T.T.K. Tuoi, H. Sui, N.H. Trung, K.F. Samat, T. Ono, Ultra-flexible thermoelectric generator sheet and electro-deposited thermoelectric material for waste heat harvesting, *Energy Rep.* 8 (2022) 5026–5037, <https://doi.org/10.1016/j.eegy.2022.03.121>.
- [8] V.P. Ramesh, Y. Sargolzaeiaval, T. Neumann, V. Misra, D. Vashae, M.D. Dickey, M.C. Ozturk, Flexible thermoelectric generator with liquid metal interconnects and low thermal conductivity silicone filler, *NPJ Flex Electron* 5 (2021) 5, <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00101-3>.
- [9] N.H. Trung, N.V. Toan, T. Ono, Electrochemical deposition based flexible thermal electric power generator with Y-type structure, *Appl. Energy* 210 (2018) 467–476, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.005>.
- [10] Y. Shi, Y. Wang, D. Mei, B. Feng, Z. Chen, Design and fabrication of wearable thermoelectric generator device for heat harvesting, *RA-L* 3 (2018) 373–378, <https://doi.org/10.1109/LRA.>
- [11] D.L. Wen, H.T. Deng, X. Liu, G.K. Li, X.R. Zhang, X.S. Zhang, Wearable multi-sensing double-chain thermoelectric generator, *Microsyst. Nanoeng.* 6 (2020) 68, <https://doi.org/10.1038/s41378-020-0179-6>.
- [12] B. Lee, H. Cho, K.T. Park, J.S. Kim, M. Park, H. Kim, Y. Hong, S. Chung, High-performance compliant thermoelectric generators with magnetically self-assembled soft heat conductors for self-powered wearable electronics, *Nat. Commun.* 11 (2020) 5948, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19756-z>.
- [13] M. Maksymuk, T. Parashchuk, B. Dzundza, L. Nykyruy, L. Chernyak, Z. Dashevsky, Highly efficient bismuth telluride-based thermoelectric micro converter, *Mater. Today Energy* 21 (2021), 100753, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100753>.
- [14] X. Mao, Z. Li, Y. Liu, X. Nie, B. Li, Q. Jiang, C. Gao, Y. Gao, L. Wang, Tuning the structure of borane-nitrogen derivatives towards high-performance carbon nanotubes-based n-type thermoelectric materials, *Chem. Eng. J.* 405 (2021), 126616, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126616>.
- [15] C.S. Kim, H.M. Yang, J. Lee, G.S. Lee, H. Choi, Y.J. Kim, S.H. Lim, S.H. Cho, B. J. Cho, Self-powered wearable electrocardiography using a wearable thermoelectric power generator, *ACS Energy Lett.* 3 (3) (2018) 501–507, <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b01237>.
- [16] L. Liu, Y. Sun, W. Li, J. Zhang, X. Huang, Z. Chen, Y. Sun, C. Di, W. Xu, D. Zhu, Flexible unipolar thermoelectric devices based on patterned poly [Kx (Ni-ethylenetetrathiolate)] thin films, *Mater. Chem. Front.* 1 (2017) 2111–2116, <https://doi.org/10.1039/C7QM00223H>.
- [17] T.N. Huu, T.N. Van, O. Takahito, Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process, *Appl. Energy* 210 (2018) 467–476, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.005>.
- [18] S.J. Kim, J.H. Wea, B.J. Cho, A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric, *Eng. Environ. Sci.* 7 (2014) 1959–1965, <https://doi.org/10.1039/C4EE00242C>.
- [19] V. Karthikeyan, J.U. Surjadi, J.C.K. Wong, V. Kannan, K.H. Lam, X. Chen, Y. Lu, V. A.L. Roy, Wearable and flexible thin film thermoelectric module for multi-scale energy harvesting, *J. Power Sources* 455 (2020), 227983, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227983>.
- [20] S. Xu, M. Hong, M. Li, Q. Sun, Y. Yin, W. Liu, Two-dimensional flexible thermoelectric devices: Using modeling to deliver optimal capability, *Appl. Phys. Rev.* 8 (2021), 041404, <https://doi.org/10.1063/5.0067930>.
- [21] E.M.F. Vieira, J. Figueira, A.L. Pires, J. Grilo, M.F. Silva, A.M. Pereira, Enhanced thermoelectric properties of Sb₂Te₃ and Bi₂Te₃ films for flexible thermal sensors, *J. Alloy. Compd.* 774 (2019) 1102–1116, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.324>.
- [22] J. Choi, Y. Jung, C. Dun, K.T. Park, M.P. Gordon, K. Haas, High-performance, wearable thermoelectric generator based on a highly aligned carbon nanotube sheet, *ACS Appl. Energy Mater.* 3 (2020) 1199–1206, <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b02255>.
- [23] N. Kim, S. Lienemann, I. Petsakourakis, D. Alemu Mengistie, S. Kee, T. Ederth, Elastic conducting polymer composites in thermoelectric modules, *Nat. Commun.* 11 (2020) 1424, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15135-w>.
- [24] L. Ruan, Y. Zhao, Z. Chen, W. Zeng, S. Wang, D. Liang, A self-powered flexible thermoelectric sensor and its application on the basis of the hollow PEDOT: PSS fiber, *Polymers* 12 (2020) 553, <https://doi.org/10.3390/polym12030553>.
- [25] P. Divija, K.S. Amit, K.B. Mahay, G. Ritesh, Optimizing thermoelectric generators based on Mg₂(Si, Sn) alloys through numerical simulations, *Energy Convers. Manage.* X 11 (2021), 100097, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100097>.
- [26] J.U. Hao, S.C. Hsu, J.L. Wen, L.L. Wen, Influence of different substrate materials on thermoelectric module with bulk legs, *J. Power Sources* 438 (2019), 227055, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227055>.
- [27] P. Hwanjoo, K. Dongyu, E. Yoomin, W. Dimuthu, H. Junphil, K. Hoon, K. Woochul, Mat-like flexible thermoelectric system based on rigid inorganic bulk materials, *J. Phys. D Appl. Phys.* 50 (49) (2017), 494006, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aa947f>.
- [28] L. Dongkeon, P. Hwanjoo, P. Gimin, K. Jiyong, K. Hoon, C. Hanki, H. Seungwoo, K. Woochul, Liquid-metal-electrode-based compact, flexible, and high-power thermoelectric device, *Energy* 189 (2019), 116019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116019>.
- [29] J. Yuan, Z. Zhixing, W. Cheng, S. Hao, Z. Wenwei, Design and parameter study of a thermoelectric generator for waste heat recycling in flexible micro-light-emitting diodes, *Appl. Thermal Eng.* 200 (2022), 117568, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117568>.



Flexible heatsink based on a phase-change material for a wearable thermoelectric generator

Gyusoup Lee, Choong Sun Kim, Seongho Kim, Yong Jun Kim, Hyeongdo Choi, Byung Jin Cho*

School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, 34141, Republic of Korea



ARTICLE INFO

Article history:
Received 19 November 2018
Received in revised form
3 April 2019
Accepted 3 May 2019
Available online 4 May 2019

Keywords:
Flexible thermoelectric devices
Phase change material
Heatsinks
Power generation
Body heat
Wearable applications

ABSTRACT

Thermoelectric generators (TEGs) represent a promising technology for self-powered wearable systems. Since the conventional TEGs have limitation to be used on the human body due to its structural rigidity, flexible TEGs have been studied and developed so that TEGs can be attached to an arbitrarily shaped surface on the human body. However, flexible TEGs require a good heatsink with good flexibility to allow them to produce enough power for wearable devices. In this study, a high-performance flexible heatsink based on a phase-change material (PCM) was proposed. PCM blocks were arranged in an array and good flexibility was realized with an elastomer that filled the space between the PCM blocks. Given that PCM can absorb a large amount of heat at the phase-change temperature, the heatsink can hold the temperature difference across the TEG constant for a relatively long period of time. Thus, the generated power from the flexible TEG was maintained at around $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ for 33 min. The flexible heatsink can be reused because the PCM solidifies at room temperature. Furthermore, the PCM-based flexible heatsink is smaller and lighter than the conventional metal heatsink. The proposed heatsink is expected to contribute to the commercialization of self-powered wearable devices.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

With the rapid growth of the IoT and wearable device market [1], power supplies for wireless devices have become a major issue [2]. Most wireless devices are powered by batteries, which require replacement or recharging [3]. A self-powered system with an energy harvester can be a good alternative to batteries, and thermoelectric power generation is one of the most promising technologies for self-powered systems. Especially for wearable devices, human body heat can be used as a permanent energy source for wearable devices, as the human body maintains a nearly constant core temperature. Therefore, research on thermoelectric power generation using body heat is actively underway [4].

Thermoelectric power generation using body heat can be used to drive low-power electronic devices such as an ECG sensor [5,6] and a pulse oximeter [7], but the power generation efficiency must be improved in order for this concept to be applied to more

sophisticated wearable devices. To increase the amount of power that is generated, the temperature difference across the thermoelectric generator (TEG) should be maximized. However, heat losses of the TEG system reduce the temperature difference across the TEG, and they occur at the interface between the TEG and air and between the TEG and heat source [8]. The heat loss to the air can be greatly reduced by using a heatsink [9]. Conventional metal heatsinks are generally used for commercial TEGs. According to the study by Lee et al. [10], a commercial bulk TEG can generate a power density of $6.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ with the portable-size metal heatsink in natural convection condition. In wearable applications, however, due to the rigid substrates of the commercial TEGs, heat loss is still large at the interface between the TEG and the arbitrarily shaped heat source [11]. This problem becomes severe if the area of the TEG increases.

A flexible TEG (f-TEG) is a good solution to overcome this problem. Recently, Kim et al. [12] and subsequent studies [6,13–15] have developed flexible TEGs capable of high performance. The conventional metal heatsinks, however, cannot be used with the flexible TEGs because of their rigidity and bulky size. It is difficult to find a suitable heatsink with high cooling performance and high flexibility. Thus, various types of flexible TEGs reported in recent

* Corresponding author. School of Electrical Engineering, KAIST, 291 Daehak-Ro, Yuseong, Daejeon, Republic of Korea
E-mail address: bjcho@kaist.edu (B.J. Cho).

studies [11–13,16–21] have shown experimental result from the flexible TEG system without a heatsink. The power generated by the flexible TEG systems in those studies are relatively small compared to that of conventional TEG systems. To increase the temperature difference across the flexible TEG, Hyland et al. [22] attached heat spreaders to both sides of the TEG and Shi et al. [23] suggested the new structure of the flexible TEG that uses copper foam as the heat sink. The generated power was increased compared to that of flexible TEGs without heatsinks. In natural convection condition, however, power generated by the flexible TEGs are not sufficient to replace the TEGs with conventional metal heatsinks. Therefore, a flexible TEG still requires a proper heatsink which is also flexible; otherwise, the flexible TEG cannot generate the required amounts of power.

In this study, a novel flexible heatsink structure based on a phase-change material (PCM) is proposed and demonstrated. The PCM absorbs or releases a large amount of heat, known as latent heat, when its phase changes [24]. Because the temperature of the PCM does not change until all of the latent heat is consumed, the temperature on the cold side of a TEG can remain constant for a period of time if a PCM with a proper melting point is chosen depending on the application. To make a heatsink consisting of a PCM flexible in this study, a two-dimensional array of small PCM blocks was assembled and linked to an elastomer. The characteristics and structural parameters of the flexible PCM heatsink were analyzed and the structural parameters of TEG were studied for the optimal design of the heatsink. When the performance of the newly designed PCM heatsink was evaluated, the f-TEG was attached to the PCM heatsink to assess the applicability of the heatsink to wearable electronics.

2. Experimental procedure

A flexible PCM heatsink was designed and fabricated to improve the power-generation performance of flexible TEGs. The heat-absorption performance of the flexible PCM heatsink was evaluated by measuring the open-circuit voltage (V_{oc}) of an attached f-TEG.

2.1. The concept of the PCM-based flexible heatsink

The easiest way to form a large temperature difference across a TEG is to use a metal heatsink on it. Fig. 1(a) shows a schematic diagram of a TEG system with a conventional metal heatsink and the heat flow in the system. When the heat from the human body (Q_{body}) passes through the TEG, only a fraction of the energy is converted into electrical energy (P_{TEG}). The rest of the heat is dissipated to the ambient ($Q_{dissipate}$) environment by the metal heatsink. Heat fluxes in the system satisfy the following equation:

$$Q_{body} = Q_{dissipate} + P_{TEG} \quad (1)$$

In terms of energy conversion efficiency, the power generation from the TEG can be expressed by the equation below [25,26].

$$P_{TEG} = \eta Q_{body} = \eta_c \eta_{reg} Q_{body} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z_{dev} T} - 1}{\sqrt{1 + Z_{dev} T} + \frac{T_c}{T_h}} \cdot Q_{body} \quad (2)$$

Here, η_c is the Carnot efficiency and η_{reg} is the energy conversion efficiency coefficient of the TEG. η_{reg} is a constant value because Z_{dev} of the TEG is fixed and $\frac{T_c}{T_h} \approx 1$ in a room temperature condition. Furthermore, in a room temperature, the temperature difference across the TEG (ΔT) follows the equation below, where $R_{t,TEG}$ is the thermal resistance of the TEG.

$$\Delta T \approx R_{t,TEG} \cdot Q_{body} \quad (3)$$

Therefore, the power generated by the TEG satisfies the relationship of $P_{TEG} \propto Q_{body}^2$ and Q_{body} must be high for high power generation. From Eq. (1), because P_{TEG} is negligible compared to $Q_{dissipate}$ in a wearable system, $Q_{dissipate}$ should be increased for a high Q_{body} . The same conclusion can be derived from the thermal resistance model of this system [27]. Therefore, conventional methods with which to cool TEGs have focused on increasing $Q_{dissipate}$, which means reducing the thermal contact resistance with air [8,28]. In general, the surface area of a metal heatsink should be increased or air should be forced through the heatsink to improve the heat-dissipation performance. However, this approach is not suitable for wearable applications that require the heatsink to be compact and flexible. Given these constraints, it is difficult to realize sufficient performance with conventional heat-dissipation methods [29].

Recently, flexible heatsinks based on SAP (Super Absorbent Polymer) [6] and a solid-state silica gel mixed with hydrogel [30,31] have been proposed to overcome these problems. They used the evaporation heat and the sensible heat of water and showed enough cooling performance, good portability and long operation time. However, those flexible heatsinks cannot be solely worked and the water must be replenished in order to use them semi-permanently. Furthermore, the temperature difference across the TEG keep decrease over time because they absorb heat with consuming their sensible heat, not the latent heat.

When a PCM is used as a heatsink, however, another thermal model can be obtained during the phase change of the PCM, as depicted in Fig. 1(b). Here, the cooling performance can be improved by heat absorption (Q_{absorb}) instead of by increasing $Q_{dissipate}$. Q_{body} increases without effort to reduce the thermal contact resistance with air and P_{TEG} increases via Eq. (2). While conventional metal heatsinks are applied to cool down TEGs in a

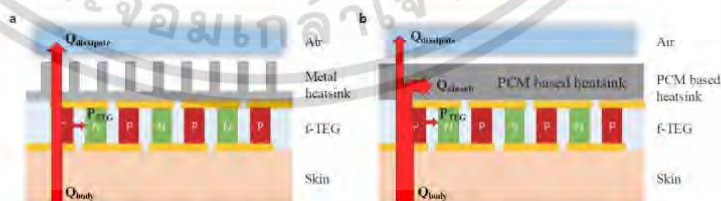


Fig. 1. Schematic diagram of the power generation system of the f-TEG. Heat flux from the body (Q_{body}) is determined according to the condition of the system. While Q_{body} passes through the TEG, a small portion of this heat flux (P_{TEG}) is used for power generation. When a conventional metal heatsink is used, (a) the thermal equilibrium model is used to interpret the entire system. Here, The rest of the heat is dissipated to the ambient ($Q_{dissipate}$) environment. However, if a PCM-based heatsink is used, (b) the latent heat can be used during the phase change of the PCM. The temperature of the PCM remains constant before the PCM melts completely. A large amount of heat is absorbed by the PCM (Q_{absorb}) such that the total heat flux from the body can be increased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

steady-state condition, PCM based heatsinks can achieve high cooling performance by using its sufficient long transient-state. This enables us to fabricate a high-performance heatsink with a compact size.

When the solid-state PCM at room temperature is adheres to the skin together with the TEG, the heat passing through the TEG is absorbed by the PCM. The temperature of the PCM is held at the melting point until the absorbed heat becomes equal to the total latent heat. The PCM heatsink can maintain a large temperature difference across the TEG for this retention time. If the heatsink is detached after using the wearable device and it cools to room temperature, the PCM solidifies again and can be used repeatedly.

2.2. Design and fabrication of the PCM-based flexible heatsink

Hence, a PCM-based flexible heatsink was designed and fabricated. Fig. 2 shows a schematic drawing of the cross-section of the flexible PCM heatsink. The flexible heatsink consists of PCM, a copper foam, elastomer, and metal foil. In this work, n-octadecane ($C_{18}H_{38}$) was selected as the PCM because it has an appropriate melting point between skin temperature and a typical ambient temperature. This organic PCM has a melting point of 28°C , and latent heat of 240J/g . The design of the flexible PCM heatsink is based on the assumption that the temperature inside the PCM is uniformly distributed while it is melting. However, because the thermal conductivity of the PCM is very low ($\sim 0.2\text{W/m}\cdot\text{K}$), the temperature of the melted fraction of the PCM rises before the PCM block melts completely, resulting in a noticeable temperature gradient within the PCM layer. To overcome this problem, the PCM was embedded in copper foam to spread heat uniformly in the PCM block.

Because the PCM is not flexible in a solid state, a structure for flexibility must be devised. The PCM was divided into small-sized blocks and a flexible polymer was used to fill the spaces between the blocks to link them to each other. Polyurethane elastomer was used in this work. When bending force is applied to the heatsink, the elastomer flexes instead of the PCM block.

All PCM blocks should be sealed on all sides so that the melted PCM does not flow out of the heatsink structure. The side of the PCM block was sealed by the elastomer that filled the spaces between the PCM blocks. Because heat flows in the vertical direction of the system, however, the upper and lower side of the PCM block should not be covered with the elastomer, which has low thermal conductivity. Thus, metal foil was used as the upper and lower sides of the system in consideration of flexibility and thermal conductivity. Because the metal foil has high roughness on its one side, it is well attached to the polyurethane after the polyurethane solution is cured. Grooves were formed on the upper side of the elastomer frame in order to improve the flexibility by decreasing the tensile stress, and the upper metal foil was patterned so that it exists only on the PCM blocks, as shown in Fig. 2.

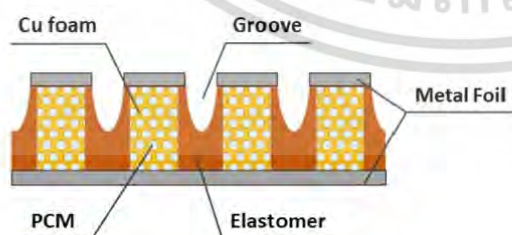


Fig. 2. Schematic design of the PCM-based flexible heatsink.

The fabrication process of the flexible PCM heatsink is shown in Fig. 3. First, a copper foam block was filled with the PCM (Fig. 3(a)). The size of the copper foam block was $1 \times 1 \times 0.5\text{cm}^3$ ($W \times L \times H$). The upper (Fig. 3(b)) and lower (Fig. 3(c)) side molds for curing the polyurethane elastomer consisted of PDMS, and the metal foils were placed on the molds. PCM blocks were arrayed in a 5×5 matrix between the upper and lower molds, after which the elastomer was poured into the mold to fill the empty spaces (Fig. 3(d)). After the elastomer was completely cured, the molds at both sides were removed and the flexible heatsink made of PCM was then completed (Fig. 3(e)).

The specifications of the finished heatsink are shown in Table 1. The flexible PCM heatsink contained 14g of PCM, making total latent heat of the heatsink approximately 3374J .

2.3. V_{oc} measurement for a performance test of the flexible heatsink

To generate power from human body heat, the TEG is placed on the skin and the flexible heatsink is attached to it, as shown in Fig. 4. Given that V_{oc} of the TEG is proportional to the temperature difference across the TEG, V_{oc} measurements can be used to evaluate the performance of the flexible PCM heatsink.

For the experiment, a substrate-free flexible TEG (f-TEG) as reported by Kim et al. was used [14]. An f-TEG, made of Bi_2Te_3 -based bulk materials and a polymer-based filler, was used in this experiment. The thermoelectric properties of the bulk materials are

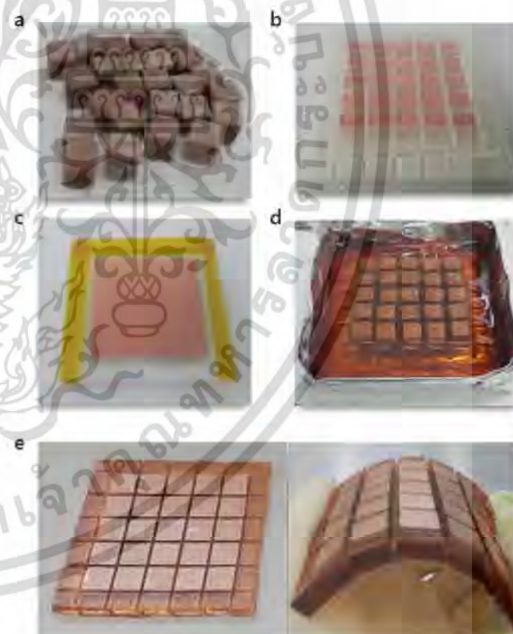


Fig. 3. Fabrication process of the flexible heat sink. (a) Copper foam block filled with the PCM, and (b) PDMS mold for the upper side of the heatsink. Metal foil was placed over it. (c) PDMS mold for the lower side and metal foil on it. (d) PCM blocks were placed on the upper side of the mold and polyurethane elastomer was poured on it. The lower side of the mold was then placed on it. After the elastomer was cured, the upper and lower side molds were removed. (e) PCM-based flexible heatsink after all fabrication processes were complete, showing good flexibility because the elastomer bends easily.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1
Detailed specifications of the fabricated flexible PCM heatsink.

	Specifications
Total area of the heatsink	70 mm ² × 70 mm
Height	5 mm
Weight	37.8 g
Amount of PCM	14 g
Porosity of Copper foam	≥98% (110 ppt)
Thickness of metal foil	35 μm
Active area of PCM	51.0%

Table 3
Detailed specifications of the fabricated f-TEG.

	Specifications
TE leg height	2.5 mm
TE leg width	2.0 mm
Device area	65 mm ² × 65 mm
Number of couples	50
Fill factor (FF)	9.5%
Resistance	0.70 Ω
Device ZT	0.64



Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setting for the V_{oc} measurements.

shown in Table 2. The detailed specifications of the f-TEG are presented in Table 3.

The experiment was conducted in an artificial thermal environment of which the conditions are similar to those of the human body. A manikin arm was prepared and the thermal resistance of the manikin arm was adjusted with polymer film to ensure a condition similar to human skin [14]. A flexible heater inside the manikin kept its core temperature at 37 °C, while room temperature remains 25 °C. The f-TEG and the flexible heatsink were attached to this model and the V_{oc} value of the f-TEG was measured.

3. Results and discussion

3.1. Effects of the PCM and the copper foam

In addition to the PCM-based flexible heatsink (HO) described in Fig. 3, flexible heatsinks with PCM only (H1) or with copper foam only (H2) were fabricated for comparison. Fig. 5 shows the result of the V_{oc} measurements for each type of heatsink. When the complete heatsink (HO) was used, V_{oc} was maintained at 48.2 mV for a certain period of time, termed here the retention time. The retention time was defined as the time during which the variation of V_{oc} is within ±10% of a constant value of V_{oc} . The retention time of the flexible PCM heatsink (HO) was about 33 min. In Fig. 5, there is a sharp peak at the initial time within 5 min. Because the initial temperature of the PCM was the same with ambient temperature (25 °C), after the heatsink and TEG were attached to the body, the heatsink started to be heated by body temperature until it reached the saturation temperature. With this reason, this sharp peak was

Table 2
Room-temperature material properties of the bulk thermoelectric materials used in the f-TEG (Kim et al., 2018) [14].

Material type	σ (S cm ⁻¹)	α (μV K ⁻¹)	κ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
p-type	2028	176	1.73
n-type	1651	-161	1.88

not included in retention time.

On the other hand, when only the PCM is used without the copper foam (H1), V_{oc} did not remain constant but instead decreased gradually. This indicates that there is a temperature gradient within the PCM during the measurement. As described earlier, the heat transfer inside the PCM is very slow when the copper foam is removed. Therefore, it can be inferred that the temperature of the melted fraction of the PCM rises before the PCM completely melts. In the test with copper foam only (H2), a period in which V_{oc} maintains a constant value did not appear. The temperature difference across the TEG decreased rapidly because the heatsink did not have latent heat to absorb the large amount of heat from the TEG. Thus, V_{oc} also decreased dramatically.

3.2. Comparison with a conventional metal heatsink

In order to evaluate the performance of the flexible PCM heatsink, a conventional metal heatsink (Fig. 6(b)) was prepared and compared with the flexible PCM heatsink (Fig. 6(a)). The metal heatsink was made of aluminum, and the surface was electrically insulated by anodizing. In order to make the metal heatsink flexible, the metal heatsink was fabricated with a basement thickness of 500 μm. The height of the metal pin used was 6 cm to ensure high performance; this is approximately twelve times longer than that of the flexible PCM heatsink (HO). The weight of the metal heatsink was 340.2 g, which is nearly nine times heavier than that of the flexible PCM heatsink.

As shown in Fig. 6(c), the flexible PCM heatsink showed

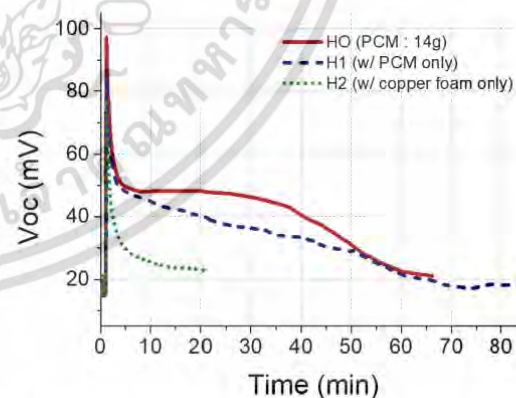


Fig. 5. V_{oc} measurements for three different flexible heatsinks. The PCM-based flexible heatsink in this work (HO) maintained a constant V_{oc} level for a period of time while the V_{oc} value of the flexible heatsink with PCM only (H1) decreased gradually. The performance of the flexible heatsink with copper foam only (H2) was drastically reduced because it has no latent heat to absorb the large amount of heat.

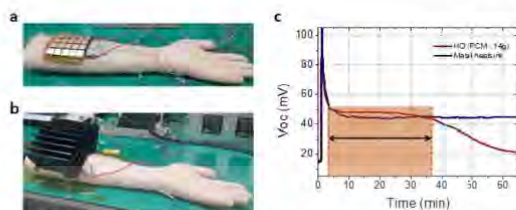


Fig. 6. Performance comparison between the metal heatsink and the flexible heatsink: experimental setting for (a) the PCM-based flexible heatsink test, and (b) the metal heatsink test. (c) the V_{oc} measurements of the metal heatsink and the flexible heatsink.

performance capabilities similar to that of the conventional metal heatsink during the retention time. With the metal heatsink, the V_{oc} value of the f-TEG was 41.7 mV in the saturation region. For the flexible PCM heatsink, the V_{oc} value was close to 48.2 mV for a retention time of 33 min. For most sensors in wearable devices, because the measurement itself can be done in a few seconds [32], meaningful data can be obtained in a few tens of minutes. With regard to ECG sensors, 5-min ECG signals are used for a standard heart rate variability (HRV) parameter analysis [6,34]. Therefore, it can be considered that the retention time of the flexible PCM heatsink is acceptable for wearable applications.

3.3. Performance variation for different fill factors (FFs) of TEGs

The total latent heat of the PCM limits the heat-absorption capability of the flexible PCM heatsink. Thus, the retention time of the heatsink will vary according to the heat flux passing through the TEG, which is affected by the thermal environment. In wearable applications, the heat flux passing through the TEG changes according to the structural parameters of the TEG [3,5,8,27,33]. Fill

factor (FF) defined as (total TE leg area)/(total TEG area) is a main structural parameter that affects the performance of TEGs. Therefore, by changing the fill factor of the TEG, the retention time and performance of the TEG can be controlled. In this study, another f-TEG with a higher fill factor was fabricated. The dimension of the TE legs was not changed. The number of TE couples in this new TEG was increased to 200 to increase the fill factor by four times (38%). The electrical resistance of the new f-TEG was 2.74 Ω . Other specifications of the new TEG were the same as those described in Tables 2 and 3. As shown in Fig. 7(a), the area of the electrodes was changed for the electrode pattern design. In general, however, the influence of electrodes for the performance of TEG is negligible because the resistance of the electrodes is very low compared to that of the TE legs.

The results of the V_{oc} measurements of this device are shown in Fig. 7(b). The 200-couple TEG produced higher V_{oc} than the 50-couple TEG during the retention time. For thermal equilibrium model, an optimum fill factor of a TEG is typically less than 10% in low power generation condition [3,6,8]. Thus, TEG with a lower fill factor tends to generate higher power. Given that the number of TE legs is different for each TEG, a direct comparison of the performances by measuring V_{oc} is difficult. For a fair comparison, the temperature difference across the TEG and generated power density were calculated. Because most of the power available for applications were generated during the retention time, this paper focused on performance during the retention time. During the retention time, the temperature of every node in the system is fixed. Therefore, the thermal equilibrium model can be applied to analyze the experiment result.

The temperature difference across the TEG is shown in Fig. 7(c). The temperature difference across the TEG can be calculated easily because the V_{oc} follows the equation $V_{oc} = N\alpha\Delta T$, where N is the number of TE couples, α is the Seebeck coefficient of TE material, and ΔT is the temperature difference. The temperature difference

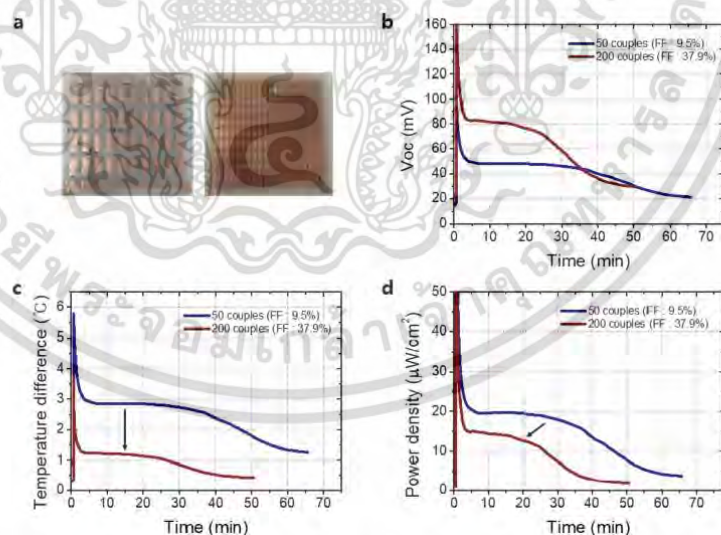


Fig. 7. Performance of the heatsink according to fill factor (FF) of the f-TEG (a) Photos of the f-TEG with 9.5% FF (left) and 38% FF (right). Graph of (b) V_{oc} , (c) the temperature difference and (d) the power density. The temperature difference across the TEG was calculated by dividing V_{oc} by the number of TE couples and the Seebeck coefficient of the TE legs. The power density was calculated by the simple equation of $P = V_{oc}^2 / 4R_{TEG}$, where R_{TEG} is the electrical resistance of the f-TEG. The calculated power P is divided by the area of the f-TEG, as described in Table 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

which arises across the 50-couple TEG was nearly 3 °C while temperature difference across the 200-couple TEG was nearly 1 °C.

In Fig. 7(d), the power densities of the f-TEGs were roughly calculated by the simple equation of $P = V_{oc}^2 / 4R_{TEG}$, where R_{TEG} is the electrical resistance of the f-TEG. In Fig. 7(d), the flexible heatsink with a 50-couple TEG shows better performance in terms of both cooling and the retention time. The 50-couple TEG generated more power than the 200-couple TEG despite its lower V_{oc} , as shown in Fig. 7(b). In general, a TEG with a higher fill factor can generate more power when the temperature difference is fixed. Owing to its low thermal resistance, however, the f-TEG with a higher fill factor formed a small temperature difference across the TEG, leading to a decrease in the amount of power generated. As shown in Fig. 7(c), the temperature difference of the 200-couple TEG is much lower than that of the 50-couple TEG. The low thermal resistance of the TEG with a high fill factor also reduced the retention time of the heatsink, as shown in Fig. 7(d).

In the same manner, the performance of the flexible heatsink can be controlled by changing other structural parameters of the f-TEG. Therefore, structural optimization of the f-TEG should be studied to maximize the retention time and the power generation of the system.

3.4. Performance variation with different amounts of PCM

Because the total latent heat determines the retention time of the flexible PCM heatsink, the amount of PCM should be increased to extend the retention time. To assess this, three heatsinks with different amounts of PCM were fabricated. These flexible PCM heatsinks contained 7 g, 14 g, and 21 g of PCM. The heights of the heatsinks were 3 mm, 5 mm, and 10 mm, respectively. The results are shown in Fig. 8. The repeatability of the experiments was checked as shown in Fig. 9. As the amount of the PCM is increased, the retention time became longer, as expected. We can assume that the temperature difference which arises across the TEG is nearly identical because V_{oc} is identical in all three cases. This indicates that the heat absorption of the heatsinks per unit time did not depend on the amount of PCM and only depended on the melting point of the PCM.

However, the retention time did not increase proportionally as the amount of the PCM was increased. The corresponding retention times of the heatsinks were 12 min, 33 min, and 44 min. In the ideal case, the temperature of PCM maintains at its melting points and

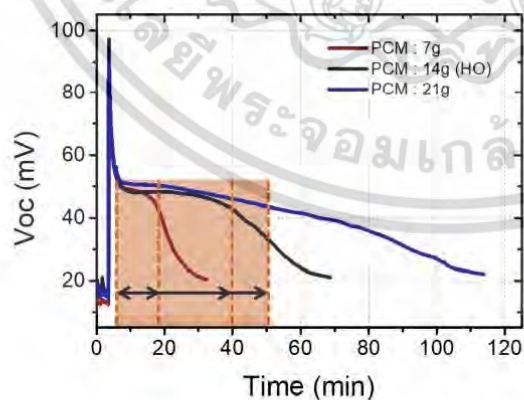


Fig. 8. Results of V_{oc} measurements of heatsinks with different amounts of PCM.

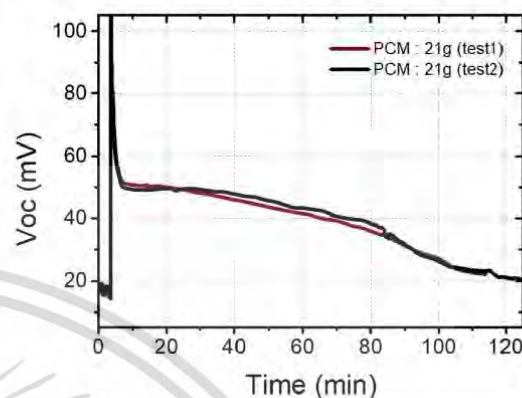


Fig. 9. Results of V_{oc} measurements of heatsinks with 21 g PCM to check the repeatability of the experiments.

starts to increase after the PCM block entirely melts. In general, while the temperature of a material is changed, the material can absorb or release a certain amount of heat, known as the sensible heat. Thus, in the ideal case, the temperature difference across the TEG should decrease very fast after the retention time because the sensible heat of the heatsink is much small compared to the latent heat. As shown in Fig. 8, however, V_{oc} decreased slowly at the end of the retention time. It is inferred that sensible heat absorption occurred together with latent heat absorption during the phase change. It is because the PCM in the flexible heatsink had a very low thermal conductivity. The effect of the copper foam was weakened, and the temperature inside the PCM block was not perfectly uniform. This phenomenon becomes severe if the height of the PCM block is increased. It is necessary to improve the heat-spreading performance of the copper foam when the height of the PCM block exceeds 1 cm. Because of this non-ideal melting behavior of the PCM block, the retention time of the PCM based flexible heatsink was not exactly proportional to its PCM amount.

Furthermore, the definition of the retention time in this study was determined in consideration of practical use of the TEG. Because the unexpected effect of the sensible heat absorption arose at the beginning and the end of the phase change, the ideal retention time only affected by the latent heat absorption is not easy to determine. Therefore, the retention time measured according to this definition is not proportional to the total latent heat of the PCM.

4. Conclusion

In this study, a high-performance flexible heatsink based on a PCM was proposed for flexible TEGs to be used in wearable applications. The PCM can absorb a large amount of heat at the phase-change temperature and the copper foam used in this work spreads the heat uniformly in the PCM block. Thus, the flexible PCM heatsink maintained a sufficient temperature difference across the f-TEG until the PCM was completely melted. The flexible PCM heatsink has compact size with sufficient performance. A conventional metal heatsink was twelve times higher and nine times heavier than the flexible PCM heatsink to achieve identical performance. In order to maximize the performance of the flexible PCM heatsink, the structural parameters of the f-TEG should be optimized by controlling the thermal resistance of the f-TEG. Here,

the retention time and the generated power varied with the fill factor of the F-TEG. The retention time can also be controlled by changing the amount of the PCM. However, when the height of the PCM reaches 1 cm, the temperature difference does not remain constant during the phase change of the PCM because the thermal spreading effect of the copper foam becomes inefficient.

By increasing the amount of the PCM to 21 g, the retention time of the flexible PCM heatsink was extended to 44 min, which is a sufficient time to operate wearable sensors such as an ECG or a pulse oximeter. The flexible PCM heatsink can be reused semi-permanently through repeating attachments and detachments. Above all, this compact heatsink shows not only high flexibility but also superior performance compared to a conventional metal heatsink of the same size. For further research, the retention time can be greatly extended by improving the heat-spreading effect of the copper foam and optimizing the structure of the attached F-TEG. The flexible PCM heatsink in this work presents a feasible solution to utilize flexible TEGs in wearable applications.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean Government (MSIP) (NRF-2015R1A5A1036133).

References

- [1] Yang H, Yu J, Zo H, Choi M. User acceptance of wearable devices: an extended perspective of perceived value. *Telemat Inform* 2016;33(2):256–69. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2015.08.007>.
- [2] Wang ZL, Wu W. Nanotechnology-enabled energy harvesting for self-powered micro-/nanosystems. *Angew Chem Int Ed* 2012;51(47):11700–21. <https://doi.org/10.1002/anie.201201656>.
- [3] Bahk JH, Fang H, Yazawa K, Shakouri A. Flexible thermoelectric materials and device optimization for wearable energy harvesting. *J Mater Chem C* 2015;3(40):10362–74. <https://doi.org/10.1039/C5TC01644D>.
- [4] Leonov V, Vullers RJ. Wearable electronics self-powered by using human body heat: the state of the art and the perspective. *J Renew Sustain Energy* 2009;1(6):062701. <https://doi.org/10.1063/1.3255465>.
- [5] Leonov V, Torfs T, Van Hooft C, Vullers RJ. Smart wireless sensors integrated in clothing: an electrocardiography system in a shirt powered using human body heat. *Sens Transducers J* 2009;107(8):165.
- [6] Kim CS, Yang HM, Lee J, Lee GS, Choi H, Kim YJ, Lim SH, Cho SH, Cho BJ. Self-powered wearable electrocardiography using a wearable thermoelectric power generator. *ACS Energy Lett* 2018;3(3):501–7. <https://doi.org/10.1021/acseny.lett.7b01237>.
- [7] Torfs T, Leonov V, Van Hooft C, Gyselinckx B. Body-heat powered autonomous pulse oximeter. *IEEE Conf Sens* 2006;5th:427–30. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2006.355497>.
- [8] Suarez F, Nozarshabmarz A, Vashae D, Öztürk MC. Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics. *Energy Environ Sci* 2016;9(6):2099–113. <https://doi.org/10.1039/C6EE00435C>.
- [9] Elghooli A, Bastarwi F, Ibrahim TK, Habib K, Ibrahim H, Idris DMND. A review on heat sink for thermo-electric power generation: Classifications and parameters affecting performance. *Energy Convers Manag* 2017;134:260–77. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.046>.
- [10] Lee YG, Kim J, Kang MS, Baek SH, Kim SK, Lee SM, Lee J, Hyun DB, Ju BK, Moon SE, Kim JS. Design and experimental investigation of thermoelectric generators for wearable applications. *Adv Mater Technol* 2017;2(7):1600292. <https://doi.org/10.1002/admt.201600292>.
- [11] Kim MK, Kim MS, Lee S, Kim C, Kim YJ. Wearable thermoelectric generator for harvesting human body heat energy. *Smart Mater Struct* 2014;23(10):105002. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/10/105002>.
- [12] Kim SJ, We JH, Cho BJ. A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric. *Energy Environ Sci* 2014;7(6):1959–65. <https://doi.org/10.1039/C4EE00242C>.
- [13] Suarez F, Parekh DP, Vashae D, Dickey MD, Öztürk MC. Flexible thermoelectric generator using bulk legs and liquid metal interconnects for wearable electronics. *Appl Energy* 2017;202:736–45. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.181>.
- [14] Kim CS, Lee GS, Choi H, Kim YJ, Yang HM, Lim SH, Lee SG, Cho BJ. Structural design of a flexible thermoelectric power generator for wearable applications. *Appl Energy* 2018;214:131–8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.074>.
- [15] Choi H, Kim YJ, Kim CS, Yang HM, Oh MW, Cho BJ. Enhancement of reproducibility and reliability in a high-performance flexible thermoelectric generator using screen-printed materials. *Nano energy* 2018;46:39–44. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.01.031>.
- [16] Xu X, Zuo Y, Cai S, Tao X, Zhang Z, Zhou X, He S, Fang X, Peng H. Three-dimensional helical inorganic thermoelectric generators and photodetectors for stretchable and wearable electronic devices. *J Mater Chem C* 2018;6(18):4866–72. <https://doi.org/10.1039/C8TC01183D>.
- [17] Wang Y, Shi Y, Mei D, Chen Z. Wearable thermoelectric generator to harvest body heat for powering a miniaturized accelerometer. *Appl Energy* 2018;215:690–8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.062>.
- [18] Shi Y, Wang Y, Mei D, Feng B, Chen Z. Design and fabrication of wearable thermoelectric generator device for heat harvesting. *IEEE Robot Autom Lett* 2018;3(1):373–8. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2734241>.
- [19] Wu Q, Hu J. A novel design for a wearable thermoelectric generator based on 3D fabric structure. *Smart Mater Struct* 2017;26(4):045037. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa5694>.
- [20] Myers A, Hodges R, Jur JS. Human and environment influences on thermoelectric energy harvesting toward self-powered textile-integrated wearable devices. *MRS Adv* 2016;1(38):2665–70. <https://doi.org/10.1557/adv.2016.316>.
- [21] Francioso L, De Pascali C, Sglavo V, Grazioli A, Masieri M, Siciliano P. Modeling, fabrication and experimental testing of an heat sink free wearable thermoelectric generator. *Energy Convers Manag* 2017;145:204–13. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.096>.
- [22] Hyland M, Hunter H, Liu J, Veety E, Vashae D. Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting. *Appl Energy* 2016;182:518–24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.150>.
- [23] Shi Y, Wang Y, Mei D, Chen Z. Wearable thermoelectric generator with copper foam as the heat sink for body heat harvesting. *IEEE Access* 2018;6:43602–11. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863018>.
- [24] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(2):318–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [25] Snyder CJ, Toberer ES. Complex thermoelectric materials. Materials for sustainable energy: a collection of peer-reviewed research and review articles from Nature Publishing Group; 2011. p. 101–10. https://doi.org/10.1142/9789814317665_0016.
- [26] Rowe DM. General principle and basic considerations. In: Rowe DM, editor. *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. Boca Raton, U.S.: CRC Press, Taylor & Francis; 2006. Section 1, 1–1–1–14, 9780849322648.
- [27] Yazawa K, Shakouri A. Optimization of power and efficiency of thermoelectric devices with asymmetric thermal contacts. *J Appl Phys* 2012;111(2):024509. <https://doi.org/10.1063/1.3679544>.
- [28] Lossec M, Multon B, Ahmed HB. Sizing optimization of a thermoelectric generator set with heatsink for harvesting human body heat. *Energy Convers Manag* 2013;68:260–5. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.021>.
- [29] Siddique ARM, Mahmud S, Van Heyst B. A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;73:730–44. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.177>.
- [30] Park H, Kim D, Eom Y, Wijethunge D, Hwang J, Kim H, Kim W. Mat-like flexible thermoelectric system based on rigid inorganic bulk materials. *J Phys D: Appl Phys* 2017;50(49):494006. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa9417>.
- [31] Park H, Lee D, Kim D, Cho H, Eom Y, Hwang J, Kim H, Kim J, Han S, Kim W. High power output from body heat harvesting based on flexible thermoelectric system with low thermal contact resistance. *J Phys D: Appl Phys* 2018;51(36):365501. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaad270>.
- [32] Khan Y, Ostfeld AE, Lochner CM, Pierre A, Arias AC. Monitoring of vital signs with flexible and wearable medical devices. *Adv Mater* 2016;28(22):4373–95. <https://doi.org/10.1002/adma.201504366>.
- [33] Mayer PM, Ram RI. Optimization of heat sink-limited thermoelectric generators. *Nanoscale Microscale Thermophys Eng* 2006;10(2):143–55. <https://doi.org/10.1080/10893950600643063>.
- [34] Hwang B, You J, Vaessen T, Myin-Germesys I, Park C, Zhang BT. Deep ECGNet: an optimal deep learning framework for monitoring mental stress using ultra short-term ECG signals. *Telem E Health* 2018. <https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0250>.

Operation of Wearable Thermoelectric Generators Using Dual Sources of Heat and Light

Myeong Hoon Jeong, Kwang-Chon Kim, Jin-Sang Kim, and Kyoung Jin Choi*

A wearable thermoelectric generator (WTEG) that utilizes human body heat can be a promising candidate for the wearable power generators. The temperature difference (ΔT) between the body and the environment is a stable source driving the WTEG, but this driving force is limited by the ambient temperature itself at the same time. Here, a novel WTEG that can be operated using the dual source of body heat and light with exceptionally high driving force is fabricated. The printable solar absorbing layer attached to the bottom of the WTEG absorbs $\approx 95\%$ of the light from ultraviolet to far infrared and converts it into heat. To optimize the power density of WTEGs, the fill factor of the thermoelectric (TE) leg/electrode is considered through finite-difference time-domain (FDTD) simulation. When operated by the dual sources, the WTEG exhibits a power density of $15.33 \mu\text{W cm}^{-2}$, which is the highest under "actual operating conditions" among all kinds of WTEGs. In addition, unlike conventional WTEGs, the WTEG retains 83.1% of its output power at an ambient temperature of 35°C compared to its output power at room temperature. This study will accelerate the commercialization of WTEGs by introducing a novel method to overcome their limitations.

1. Introduction

Recently, wearable electronics have made remarkable progress, and products such as smartwatches and wireless earphones have already been commercialized. Since most wearable electronics are not self-powered systems, they need to be periodically charged, and the weight or size of the products comes mainly

from the battery. Due to these problems, the importance of self-powered wearable systems is emerging. Wearable thermoelectric generators (WTEGs) can be good energy harvesting systems for wearable electronics since they are driven by the temperature difference (ΔT) between the human body and the ambient temperature.^[1]

WTEG can be divided into lateral and vertical structures depending on the shape of the thermoelectric (TE) leg. Lateral type WTEGs with the TE legs arranged laterally along the substrate are fabricated by printing,^[2-5] coating,^[6-10] or depositing^[11,12] flexible organic TE materials such as Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS),^[6,13-16] carbon nanotube (CNT) composites,^[17-21] fullerene derivatives,^[22-24] or TE inks made of rigid inorganic TE nanoparticles on flexible substrates.^[11,12] Lateral type WTEGs with long and thin TE legs have high ΔT .

However, the low dimensionality of TE legs also causes high electrical resistance, resulting in low power densities on the order of nW cm^{-2} . For example, Cao et al. fabricated flexible TEG by screen printing eight pairs of BiTe/SbTe TE legs and reported an output power of 444 nW at a ΔT of 20°C and internal electrical resistance of $1.7 \text{ k}\Omega$.^[4]

On the other hand, vertical type WTEGs have a structure in which rigid inorganic TE pellets are vertically aligned between two substrates to allow vertical heat flow through the legs. They also have a soft polymer infiltrated between TE legs to give flexibility to the devices.^[25] Inorganic bulk TE pellets such as Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, and GeTe have higher ZT performance and low electrical resistance,^[26-30] so vertical type WTEGs tend to have tens to hundreds of times higher output power density than lateral type WTEG.^[31-38] However, the low ΔT still acts as a major obstacle in vertical devices, which is partly due to the dimension of the TE legs or inefficient WTEG structure.^[27,31,39,40] For example, a long TE leg is advantageous in achieving high ΔT , but on the other hand, it increases the internal resistance, which offsets the advantage of high ΔT .^[41] Additionally, the flexibility of the device can be compromised by the long TE legs, so the appropriate leg length is 1–2 mm in vertical devices taking all these factors into account.^[42] In addition, limited body heat also causes the low ΔT of body heat-driven WTEGs.^[43] Human skin is thermally insulating and insensitive to the environment. Although the amount of heat generated varies slightly depending on the body part, the human body generates a constant temperature of 36°C . This

M. H. Jeong, K. J. Choi
Department of Materials Science and Engineering
Ulsan National Institute of Science and Technology
Ulsan 44919, Republic of Korea
E-mail: choi@unist.ac.kr

K.-C. Kim
Center for Electronic Materials
Korea Institute of Science and Technology
Seoul 02792, Republic of Korea

J.-S. Kim
KIST Jeonbuk Institute of Advanced Composite Materials
Wanju-gun 55324, Republic of Korea

The ORCID identification number(s) for the author(s) of this article can be found under <https://doi.org/10.1002/advs.202104915>

© 2022 The Authors. Advanced Science published by Wiley-VCH GmbH. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

DOI: 10.1002/advs.202104915

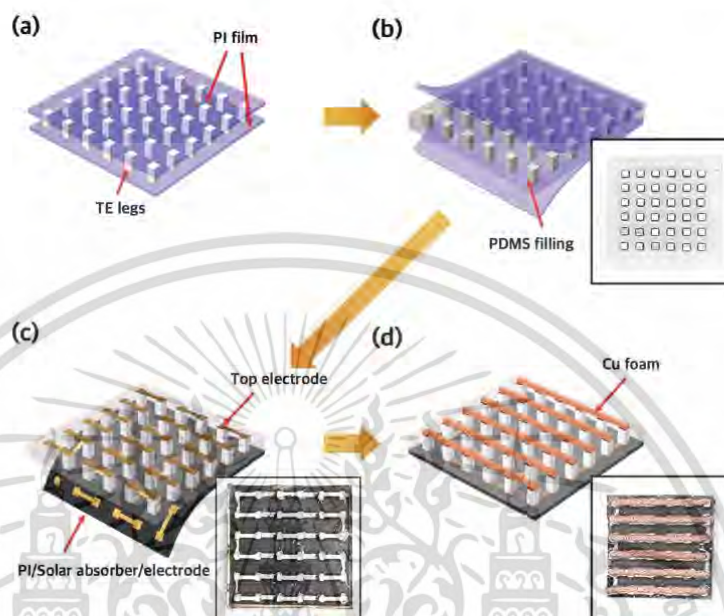


Figure 1. Schematic illustration and photographs of the fabrication process for sunlight-assisted WTEGs. a) p-n TE leg pairs are alternately aligned between PI films. b) PDMS is inserted into the gap between the two PI films. After curing PDMS, the PI films are peeled off. c) Solar absorbers are printed on the PI film, dumbbell-shaped electrodes are deposited on the top of PDMS and the PI/solar absorber film and successively attached to the bottom of PDMS. The p-n TE leg pairs are connected in series. d) Cu foam is attached for cooling. It has the same width as the thinnest part of the dumbbell-shaped electrode to prevent the copper foam from blocking the solar absorber.

characteristic of the human body can be an advantage of stably providing a heat source but a disadvantage of having limited maximum power. Since all types of WTEGs are driven by the ΔT between the body temperature and ambient temperature, a sustainable ΔT of up to $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be obtained at room temperature. However, only a small fraction of the ΔT contributes to the output power of the WTEG due to the low thermal resistance, and even the ΔT disappears as the ambient temperature approaches the body temperature.^[44]

In this study, we propose, for the first time a vertical WTEG operated by the dual-source of heat and light to provide a solution to the low- ΔT issue of the WTEG. The polysiloxane-based light absorbing layer printed on the bottom side of the WTEG harvests light in a wide range of wavelengths from ultraviolet to far infrared with an absorbance of $>95\%$. The WTEG can be operated in three modes, namely, body-heat, sunlight, and dual-source-operation modes, depending on the surrounding environment. The WTEG generates ΔT values of 5.5 , 9.2 , and $10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ in body-heat, sunlight, and dual-source-operation modes, respectively. As a result, power densities of 2.19 , 8.28 , and $15.33\text{ }\mu\text{W cm}^{-2}$ are obtained depending on the modes, respectively. In other words, the power density obtained in the dual-source-operation mode is sevenfold higher than that in the body-heat-operation mode and corresponds to a record-high value among WTEGs based on all types of TE materials and device structures. Furthermore, unlike most body-heat-driven WTEGs, our device pro-

duces a high-power density even at an ambient temperature of $37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Results and Discussions

2.1. WTEG Fabrication

Figure 1 illustrates the fabrication process of the WTEGs. The structure of the device is similar to vertical WTEGs, except that a solar absorbing layer is integrated into the bottom of the device. First, p-n TE legs with a height of 1.5 mm and various cross-sectional areas were alternately aligned at calculated intervals between two polyimide (PI) films (Figure 1a). A polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer was inserted between two PI films and cured, forming a flexible TE leg polymer array structure (Figure 1b). The insertion of a soft medium, e.g., PDMS, provides an acceptable mechanical tolerance to rigid TEGs. After the PI films were peeled off, $4\text{-}\mu\text{m}$ -thick Ag top electrodes were deposited through a shadow mask on the top of PDMS using e-beam evaporation. Ni (50 nm) was pre-deposited on the PDMS to improve the adhesion between the Ag and PDMS. The solar absorbing layer was prepared by painting silicone-based solar absorbing paint with a solar absorption of 95% on the PI film.^[45] After the Ag bottom electrodes were deposited on the solar absorbing film/PI substrate using e-beam evaporation, the composite structure of the Ag electrode/solar absorber/PI substrate was attached to the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bottom of the PDMS while aligning the electrode and TE leg and electrically connecting them together with highly conductive silver paste (Figure 1c). The electrode was designed in a dumbbell shape by reducing the width of the electrode between two adjacent TE legs. Compared to rectangular shapes, dumbbell-shaped electrodes can decrease the fill factor, allowing the solar absorber to have increased exposure to sunlight and generate more heat without significant electrical resistance loss. As shown in Figure S1b (Supporting Information), in the case of rectangular shapes, fill factors were 19–42% depending on the leg size, but they decreased to 11–28% when dumbbell-shaped electrodes were introduced. Accordingly, the hot side temperature increased in all leg sizes, and the ΔT increased by 1.1–2.6 °C (Figure S1c–d, Supporting Information). Finally, a copper foam heat sink with high thermal conductivity and a large surface area was integrated to accelerate heat dissipation on the cold side. Since vertical-type WTEGs have difficulty dissipating heat that is quickly conducted through the TE leg, the use of a heat sink can be effective in improving the ΔT and power. The heat sink is designed to maximize its surface area to maximize its convective heat transfer to the surroundings.¹⁴⁶ However, it is challenging to introduce a heat sink wider than the device or to attach fins to the WTEG. Copper foam is an optimal material as a heat sink for WTEGs due to its large surface area and flexibility.¹⁴⁹ They have the same width as the thinnest part of the dumbbell-shaped electrode to prevent the copper foam from blocking the solar absorber.

2.2. Systematic Optimization of the WTEG Design

Since the output voltage and internal electrical resistance are changed depending on the device structure, an optimized WTEG structure is required. In general, the amount of TEG power is given by the following equation:^{143,147}

$$P_{\text{max}} = (N \times (\alpha_n + \alpha_p) \Delta T)^2 / R_i (1 + R_l / R_i)^2 \quad (1)$$

where N is the number of p-n TE leg pairs, α_n and α_p are the Seebeck coefficients of the n-type and p-type legs, respectively, R_i is the internal electrical resistance, and R_l is the loaded electrical resistance. As given in Equation (1), since the numerator and denominator represent the output voltage and electrical resistance factor, respectively, the output power is proportional to the square of the voltage and is inversely proportional to the electrical resistance. The voltage and electrical resistance of the WTEG are mainly determined by the dimension of the TE leg and the number of TE legs. For example, ΔT applied to the legs is affected by the thermal resistance of the TE leg, which changes with the fill factor (the number of TE legs \times the cross-sectional area of a single TE leg + area of the electrode) of the TE leg/electrode and further results in a change in voltage.¹⁴⁷ On the other hand, increasing the number of TE legs can improve the output voltage in series connection mode; However, the internal electrical resistance of the TEG increases as well, which results in poor output power. Due to these complex relationships, it is challenging to finalize the WTEG structure with the maximum output power only experimentally. Therefore, it is necessary to systematically calculate the required number and cross-sectional area of the legs to obtain the maximum power. The ΔT and output power according

to the WTEG structure were analyzed, and an optimal structure was predicted using COMSOL simulation.

Figure 2 shows a mapping of the calculated ΔT depending on the fill factor of the leg and electrode while keeping the leg height constant at 1.5 mm. To observe the effect of the solar absorber, we compared ΔT and output power changes according to three different conditions. The body-heat-operation mode represents the condition driven by body temperature, similar to the conventional WTEG. In body-heat-operation mode, the lowest ΔT (≈ 2.2 °C) is obtained when the fill factor is the highest (the width of the leg is 1.4 mm, and the number of legs is 48), and the highest ΔT (≈ 6.3 °C) is obtained when the fill factor is the lowest (width of the leg is 0.6 mm, and the number of legs is 6). These results have the same trend as that of conventional WTEGs driven by body heat. Thermodynamically, the human body is a low-temperature heat reservoir ($T_{\text{body}} \approx 36$ °C) that emits thermal energy at a rate of ≈ 25 mW cm^{-2} into the ambient atmosphere,¹⁷⁷ making practical application difficult because the conversion efficiency of WTEG is lower than 1%. The sunlight operation mode represents the condition in which the WTEG is attached to clothes and driven by sunlight only. Since the average sunlight intensity is 100 mW cm^{-2} , the WTEG can absorb much more energy than when the WTEG is in the body-heat-operation mode. In sunlight-operation mode, the relationship between the total area of the WTEG and ΔT becomes more complex. Under 1 sun illumination, the total solar power provided by the solar absorber is as follows:

$$Q_{\text{SA}} = 100 \text{ mW/cm}^2 \times A \times (1-f) \times AR \quad (2)$$

where 100 mW cm^{-2} is the sunlight intensity under 1 sun illumination, A is the area of the solar absorber, f is the total fill factor of the TE leg and electrode, $(1-f)$ is the ratio of the solar absorber exposed to sunlight, and AR is the average absorption ratio of the solar absorber. The total fill factors according to the number and cross-sectional area of the legs are summarized in Figure S2 (Supporting Information). Since printable solar absorbers can absorb an average of 95% of the available sunlight, if there are no TE legs and electrodes, the solar absorber theoretically obtains 380 mW of sunlight for a WTEG with an area (A) of 4 cm^2 . This solar energy is converted into heat, increasing ΔT . As the total fill factor increases, the amount of absorbed solar energy decreases. In short, the fill factor affects not only the thermal resistance but also solar energy absorption, thereby affecting ΔT . In sunlight-operation mode, as shown in Figure 2, when six TE legs with a leg width of 0.6 mm are integrated into the device, the highest ΔT of ≈ 19.5 °C is observed, which is hard to obtain in conventional WTEGs, and when the fill factor is the highest (48 TE legs, 1.4 mm leg width), a ΔT of ≈ 4.9 °C can be obtained. However, in sunlight operation mode, the heat generated at the solar absorber is transferred not only to the TE leg but also to the fabric at a low temperature, which causes significant heat loss. In dual-source-operation mode, when WTEG is attached to the skin with sunlight irradiation, the body heat assists in heat generation due to intrinsic high temperature, allowing the WTEG to achieve a higher ΔT . In addition, due to the low thermal conductivity of human skin ($\kappa \approx 0.3$ W m^{-1} K^{-1}), the heat generated from the solar absorber can be kept from escaping to the skin. As a result, compared with the sunlight-operation mode, the ΔT in-

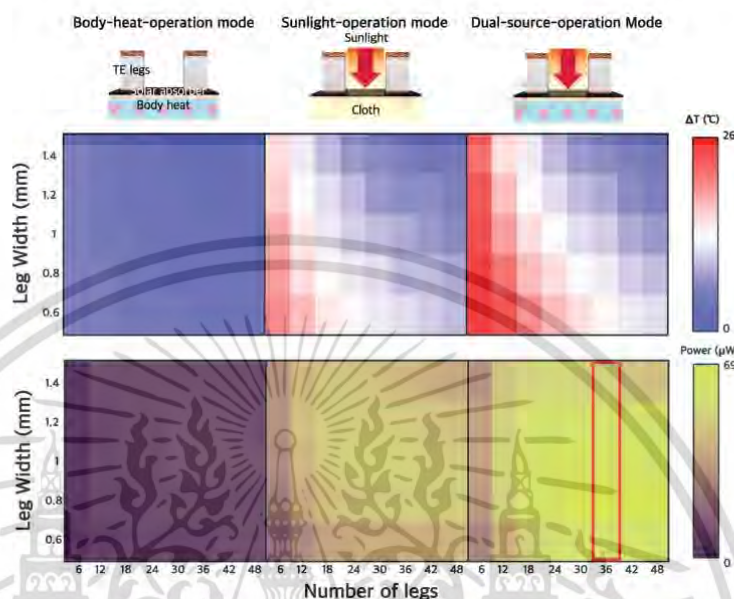


Figure 2. Simulated ΔT and power mapping of a WTEG in body-heat-operation mode, sunlight-operation mode, and dual-source-operation mode depending on the leg area and number of legs. Body-heat-operation mode: Only body heat is harvested. Sunlight-operation mode: The solar absorbing layer harvests additional heat from solar radiation, increasing ΔT . However, a significant amount of heat dissipates from the bottom. Dual-source-operation mode: The WTEG attached to the skin generates a considerable amount of heat when exposed to sunlight and can maintain a high temperature due to the low thermal conductivity of skin.

increased by 0.5–4 °C. Figure S4 (Supporting Information) shows the open-circuit voltage (V_{OC}) according to the number of legs. Due to the high ΔT , the highest voltage was obtained in the dual-source-operation mode. Additionally, since the TE legs were connected in series, in all modes, the V_{OC} increased as the number of TE legs increased. However, a high V_{OC} does not always lead to high power because increasing the number of legs will increase the internal electrical resistance, as mentioned above. Figure S6 (Supporting Information) shows the internal electrical resistance of the WTEG depending on the cross-sectional area and number of legs. The internal electrical resistance is inversely proportional to the cross-sectional area of the leg (Figure S6a, Supporting Information). Additionally, the internal electrical resistance increases linearly as the number of legs increases since not only the electrical resistance of the TE leg itself but also the electrical resistance of the junction and electrode increase in proportion to the number of legs (Figure S6b, Supporting Information). Considering all the results, the optimal calculated device power in dual-source-operation mode is 68.25 μW , and the power density is 17.06 $\mu\text{W cm}^{-2}$ when 36 TE legs with a width of 0.8 mm are integrated.

2.3. Measuring WTEG Performance

Through simulation results, we narrowed down candidates for TE leg conditions for optimal output power. We measured the

power by fabricating a WTEG (leg width = 0.8 mm, number of legs = 36) to obtain the highest power based on the dual-source-operation mode. Additionally, WTEGs with widths of 0.6, 1.2, and 1.4 mm were fabricated to prove the ΔT or power change according to the leg width. Figure 3a shows photos of WTEGs with various cross-sectional areas of the legs. Figure 3b shows ΔT and V_{OC} of the WTEGs with various leg widths or three different modes. For stable measurement conditions, instead of attaching to the skin, the device measurement was performed on the thermally insulating film with a thermal conductivity of 0.3 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ [44] and a temperature of 35 °C at an ambient temperature of 25 °C. In body-heat-operation mode, a ΔT of 4–6 °C was obtained depending on the leg width; a small V_{OC} of 17.5–25.5 mV was generated. As the simulation predicted, ΔT and V_{OC} slightly decreased as the leg width increased due to decreased thermal resistance. In sunlight-operation mode, the WTEG was measured after placing on the fabric under 1 sun irradiation. The ΔT and V_{OC} were much higher because the solar absorber harvested sunlight and generated more heat. When the leg width was 0.6 mm, a ΔT of 10.4 °C was obtained, which is a remarkably high result. This result proves that WTEGs can be operated even when attached to clothes instead of in situations where the WTEG is attached to the skin, which other reported WTEGs could not. However, in sunlight-operation mode, the fiber hardly transfers body temperature to the WTEG, so the WTEG is driven almost by solar energy only. On the other hand, WTEGs can harvest more energy in the dual-source-operation mode because the WTEG is attached

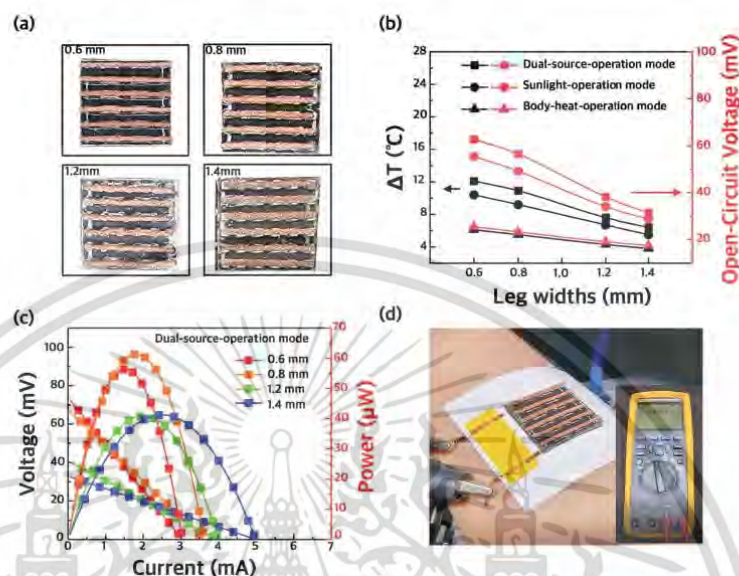


Figure 3. a) Photograph showing 18 n-p TE leg pairs embedded into TEGs. TE legs with widths of 0.6, 0.8, 1.2, and 1.4 mm are used. b) Measured ΔT and open-circuit voltage of the TEGs as a function of the fill factor. c) Measured TEG performance including voltage and power as a function of current. d) Photograph of measuring the voltage by placing the TEGs on human skin.

to the body directly during sunlight irradiation. The WTEG obtained the highest ΔT and V_{OC} of 12.1 °C and 62.73 mV, respectively, when the leg width was 0.6 mm. The ΔT and V_{OC} were the highest when the leg width was 0.6 mm regardless of the mode, which matches the simulation results. As the width of the TE legs increased from 0.6 to 1.4 mm, the fill factor increased from 11% to 28%, screening the solar absorber layer more. However, as mentioned above, when the cross-sectional area of the legs decreases, the temperature increases; however, the internal electrical resistance increases as well, resulting in low power. Figure 3c shows a comparison of the current–voltage output characteristics of the WTEGs with various leg widths in dual-source-operation mode. The output power was measured by changing the load resistances, and the maximum output power of the WTEG was obtained when the load resistance matched the internal resistance. As a result, we obtained the highest output power of 61.31 μW and power density of 15.33 $\mu\text{W cm}^{-2}$ from the WTEG with a TE leg width of 0.8 mm in dual-source-operation mode. This result is remarkably higher compared to the output power (8.76 μW) of the WTEG in the body-heat-operation mode and that (33.12 μW) of the WTEG in the sunlight-operation mode (Figure S5, Supporting Information). It is because that the ΔT of the WTEG in the body-heat-operation mode and the sunlight-operation mode is 5.5 and 9.2 °C, respectively, which is lower than ΔT (10.9 °C) of the WTEG in dual-source-operation mode. As the TE leg width of the WTEG is increased to 0.6, 0.8, 1.2, and 1.4 mm, the V_{OC} gradually decreases to 59.09, 53.87, 31.44, and 27.66 mV. In contrast, as the width of the TE leg is increased, the I_{SC} increases to 3.02, 3.56, 3.96, and 4.95 mA, respectively, resulting from the decrease in internal electrical resistance. This result indicates that the sim-

ulated and experimental results are accurate and reliable. When the performance of the WTEG (0.8 mm TE leg width) was measured by attaching it to an arm, an output voltage of 55–62 mV was measured, which proves that the WTEG can be operated under practical conditions (Figure 3d).

Figure S7 (Supporting Information) shows the V_{OC} of the WTEG as a function of time when the WTEG is attached to the arm. As soon as the WTEG is attached to the skin, the voltage rapidly increases for a few seconds and then decreases gradually to ≈ 30 mV (body-heat-operation mode). When exposed to sunlight, the WTEG shifts to dual-source-operation mode, the V_{OC} quickly increases to 130–140 mV in a few seconds, gradually decreases, and then eventually converges to ≈ 60 mV. After removing the sunlight, the voltage decreased rapidly and converged to ≈ 30 mV, the same voltage before sunlight irradiation. Interestingly, we found that the voltage of the WTEG with the solar absorber increases by 5–10 mV even when sunlight is not directly illuminated on the WTEG (Figure 4a). As the V_{OC} of the WTEG without the solar absorber also decreases, it seems that the solar absorber harvests sorts of indirect sunlight from the outside or artificial lights such as fluorescent lamps; thus, the ΔT slightly increases. It is known that there is some scattered sunlight ($\approx 227 \text{ W m}^{-2}$) or artificial light ($\approx 73 \text{ W m}^{-2}$, fluorescent lamp) in an indoor environment (Figure 4b). Since the solar absorber has a high absorbance of over 95% in all wavelength ranges, it can collect even small amounts of light energy. As a result, it is confirmed that the WTEG with the solar absorber layer always shows higher performance even in the absence of direct sunlight. We expect this result to be extended to indoor applications in the future.

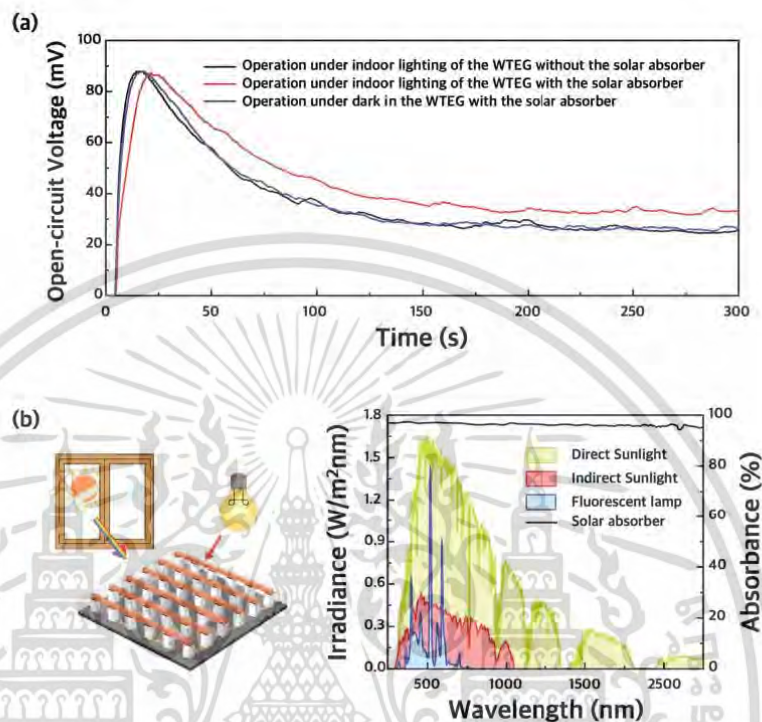


Figure 4. a) Measurement of V_{oc} of WTEG over time. When measured indoors during the day, the solar absorber harvests a small amount of scattered sunlight and generates a higher voltage. b) Schematic illustration of the heating processes of WTEG with a solar absorber under indirect sunlight and artificial light (left). Measured absorbance of the solar absorber and spectral irradiance of direct sunlight (yellow), indirect sunlight (red), and fluorescent lamp (blue) (right).

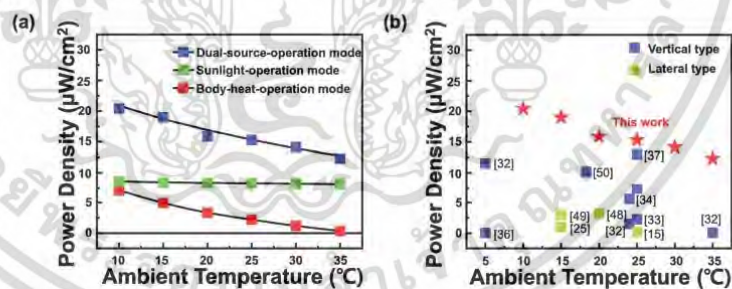


Figure 5. a) Power density of WTEGs in three different modes at various ambient temperatures. b) Comparison of the performance of the TEG prepared in this work with several reported TEGs.

2.4. Ambient Temperature-Insensitive Power of the WTEG

The output power of the WTEG was found to be insensitive to changes in the ambient temperature. Since human skin demonstrates homeostasis, maintaining a steady state while adjusting to conditions, the body temperature remains at $\approx 36^{\circ}\text{C}$ even when

the ambient temperature changes. As a result, when the ambient temperature approaches the body temperature, it is theoretically challenging to create a ΔT . Figure 5a shows the power density of the WTEG in three different modes as a function of the ambient temperature. In body-heat-operation mode, the power density of the WTEG is almost disappeared at the ambient temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

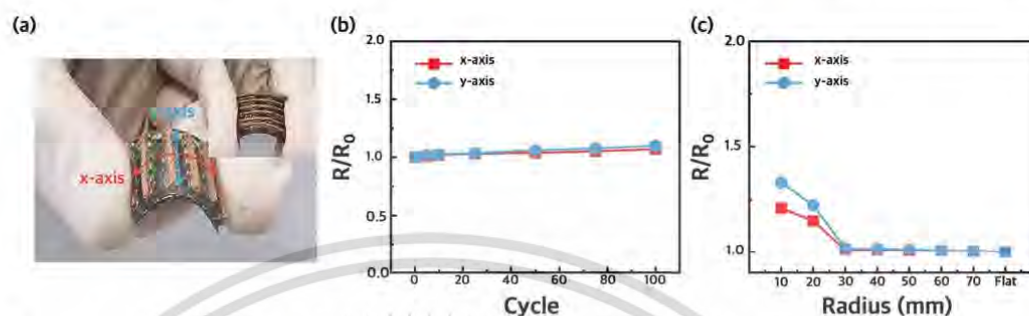


Figure 6. a) Photographs of the TEGs showing excellent flexibility. b) Bending test of the TEGs showing stable electrical resistance during the bending test along two different directions (radius = 50 mm). c) Electrical resistance stability under bending stress with various bending radius. The resistance of the WTEG was measured by reducing the bending radius without release.

of 35 °C. Our WTEG can overcome this issue to some extent after absorbing additional heat from solar energy. In dual-source-operation mode, as the ambient temperature increases from 10 to 35 °C, the power density of the WTEG decreases slightly from 20.41 to 12.32 $\mu\text{W cm}^{-2}$. This is because, as observed from the power density of the WTEG in sunlight-operation mode, a constant amount of power can be obtained by absorbing sunlight regardless of the ambient temperature. The WTEG in sunlight-operation mode maintains the power density of 8–8.5 $\mu\text{W cm}^{-2}$ at all ambient temperatures. Compared with other reported lateral or vertical types of flexible WTEGs under actual operating conditions, our WTEG obtains high power at all ambient temperatures due to the additional heat stemming from sunlight absorption (Figure 5b).^[15,25,32–34,36,37,48–50] The decrease in power as the ambient temperature approaches 35 °C is mainly caused by the low ΔT between the body and ambient temperatures. The ΔT from body heat almost disappears, but the ΔT from sunlight absorption remains constant when the ambient temperature is 35 °C. Therefore, in the body-heat-operation mode, the trend of decreasing power is identical to the trend of the power in the dual-source-operation mode, and the power converges to zero when the ambient temperature approaches 35 °C.

2.5. Mechanical Properties of the WTEG

For wearable devices, obtaining good mechanical properties is as essential as the TE performance of devices. Since most of the human body is curved, a WTEG attached to the body will inevitably be bent. Regarding flexible WTEGs, the introduction of PDMS prevents each leg from being ruptured by extreme deformation. PDMS firmly adheres to the TE legs, preventing the TE legs from deviating from their positions when bent and dispersing the stress applied to the electrodes. In addition, we introduced an Ag electrode deposited with e-beam evaporation that perfectly adheres to the PDMS surface. Cu sheets, often used as electrodes in TEGs, show poor adhesion to PDMS, thereby resulting in delamination when bent. Compared to the Cu sheet electrode, the deposited Ag electrode maintains constant electrical resistance after being bent 100 times (Figure S8, Supporting Information). To

demonstrate the mechanical robustness of the WTEG, repeated bending tests and stress tests under various bending curvatures were conducted. As shown in Figure 6b, the generator was repeatedly bent up to 100 cycles with a bending radius of 50 mm. Despite the repeated bending cycles, the device exhibits stable internal electrical resistance regardless of the bending direction. When bent 100 times in the x-axis and y-axis directions, the electrical resistance increases by 7% and 9.7%, respectively. Furthermore, there is no significant change in the internal electrical resistance when bending in any direction with an allowable bending radius down to 30 mm (<2%) (Figure 6c). The endurance of the WTEG is slightly poor when bending in the y-axis direction because the Cu foam detaches from the Ag electrode and inflicts damage on the surface during repeated bending due to insufficient adhesion between the Cu foam and Ag electrode. The robustness of the device means that the WTEG remains effective when attached to curved human skin.

3. Conclusions

In this study, we proposed a novel structure of sunlight-assisted vertical-type WTEG with a high ΔT and power density by introducing a solar absorbing layer that brings benefits in various conditions. Without sunlight (body-heat-operation mode), WTEG is driven not only by body heat but also by indirect sunlight or artificial light absorbed through a solar absorber, generating $\approx 35\%$ more power than WTEG without a solar absorber. When the WTEG is exposed to sunlight (dual-source-operation mode), the solar absorber attached to the bottom of the WTEG harvests >95% of the available sunlight, increasing the temperature of the hot side. In addition, due to the low thermal conductivity and hot temperature ($\approx 36^\circ\text{C}$) of the skin, heat loss from the hot side is reduced, and additional heat is supplied. As a result, the WTEG obtained the highest power density of 15.33 $\mu\text{W cm}^{-2}$ at room temperature. Compared to the power density of only 2.19 $\mu\text{W cm}^{-2}$ in body-heat-operation mode, the power density of the dual-source-operation mode was seven times higher and is the highest power density among all types of flexible WTEGs reported under actual operating conditions. In addition, the power density of the WTEG was less sensitive to ambient temperature,

maintaining a high power density. Generally, when the air temperature approaches body temperature ($\approx 36^\circ\text{C}$), the ΔT between the body temperature and ambient temperature disappears, resulting in a low power density. However, at an ambient temperature of 35°C , our WTEG can be operated because the power from sunlight remains constant, even though the power from body heat disappears. Our WTEG can be expected to expand its applications by proposing a new design for high-performance, adaptable, and durable energy harvesting devices.

4. Experimental Section

Materials: The BiTe based TE legs were purchased from Tesbi (Korea). The composition and thermoelectric properties of the legs are displayed in Table 1. Solar absorber (Pyromark 1200, Tempil), PDMS (Dow Corning), the 99.99%-pure copper foam (TMAX Inc.), and 9–10 $\mu\Omega$ cm-resistivity silver paste (Sigma-Aldrich) were used.

Fabrication Process of the WTEG: The fabrication process of the WTEG is schematically illustrated in Figure 1. First, the p-n TE legs with a height of 1.5 mm and various cross-sectional areas were aligned with systematically calculated spacing between adjacent TE legs. Before filling the PDMS, PI films were attached to the bottom and top sides of the aligned TE legs as protecting layers. The PDMS was filled between the TE legs and cured at 110°C for 1 h. After peeling off the PI films, a 50 nm/4000 nm thick Ni/Ag electrode was deposited on the top of the PDMS using electron beam evaporation to form a top electrode. Before fabricating the bottom electrode, the solar absorber was painted on the 50 μm -thick PI film ($2\text{cm} \times 2\text{cm}$) using a brush. Ni/Ag electrodes with the same thickness as the bottom electrode were deposited using an e-beam evaporator on the PI/Solar absorber film. The bottom electrode/solar absorber/PI film was attached to the bottom of the PDMS while aligning the electrode and TE leg and electrically connecting them together with highly conductive silver paste. Finally, the copper foam was attached along the aligned TE legs using thermally conductive epoxy.

Characterization of the WTEG: The Seebeck coefficients and electrical conductivity of the p- and n-type TE legs were measured using a seebeck coefficient analysis (SBA458, NETSCH). The thermal conductivity ($\kappa = \alpha C_p \rho$) was calculated from the measurements of the thermal diffusivity (α), specific heat (C_p), and density (ρ) of the bulk TE legs. The density was measured by density test of plastics by displacement (ASTM D792). The specific heat was measured by a differential scanning calorimetry (Q200, TA). The thermal diffusivity was measured by a thermal diffusivity measuring system (LFA 447 NanoFlash, NETZSCH). The thermoelectric characteristics of the TE leg are summarized in Table S1 (Supporting Information). The performance of the WTEG was measured using a home-made TE measuring system. The WTEG was placed on a copper block with a constant temperature and a polymer with thermal conductivity similar to the body skin to create conditions similar to the actual wearing environment. The ΔT between the hot side and cold side was monitored via a thermocouple and IR camera (FLIR Co. Ltd.). The WTEG was also measured under 1-sun sunlight (AM1.5 spectrum, 100 mW cm^{-2}) exposure conditions using solar simulation (Class AAA, Oriol Sol3A, Newport). The incident flux was confirmed by a National Renewable Energy Laboratory (NREL)-verified solar cell (PV Measurements). The electrode of the WTEG was connected to a source meter (Keithley 2400) and the I - V characteristics were measured using the LabVIEW program after the WTEG reached a thermal equilibrium state. The bending and durability test was performed using the folding tester (JIFT-500). The resistance change of the WTEG during the bending test was measured with a bending radius of 50 mm at a rate of 150 mm min^{-1} .

Simulation of the WTEG: The temperature distribution and electrical properties of the WTEG were predicted using heat transfer and thermoelectric effect simulation models in COMSOL Multiphysics. In order to increase the accuracy of the simulation, the ZT value and efficiency of the TE leg at 300–400 K were measured (Figure S9, Supporting Information).

ZT, a dimensionless figure-of-merit showing the performance of the TE leg, is defined by Equation (3):

$$ZT = \frac{\sigma S^2}{\kappa} T \quad (3)$$

where, σ , S , κ are electrical conductivity, Seebeck coefficient, and thermal conductivity, respectively. These are summarized in Table S1 (Supporting Information). Theoretical conversion efficiency of the TE leg can be obtained from ZT by the Equation (4):

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\Delta T}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT_{\text{avg}}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{\text{avg}}} + T_c/T_h} \quad (4)$$

where T_c is the temperature of the cold side, T_h is the temperature of the hot side, and ZT_{avg} is the average ZT value of the TE leg. The electrical resistance of the WTEG was also estimated after connecting the TE legs in series (Figure S6, Supporting Information). The properties of the copper foam and solar absorber were extracted from datasheets provided by TMAX and Tempil, respectively, and the properties of the other materials were taken from the values provided by COMSOL. The output power was derived by $P_{\text{output}} = \frac{V_{\text{oc}}^2}{R_l(1 + R_l/R_s)}$, modified from Equation (1). Theoretically, the maximum power is obtained when $R_l = R_s$, but considering the Peltier effect, we calculated to have the maximum power when $R_l = R_s \sqrt{1 + ZT}$.^[21]

Supporting Information

Supporting Information is available from the Wiley Online Library or from the author.

Acknowledgements

This research was supported by the Mid-career Researcher Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (NRF-2018R1A2B2003720) and by the Nano-Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2021M3H4A1A02051234).

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Keywords

BiTe, high temperature difference, printing, solar absorber, thermoelectric, wearable

Received: November 1, 2021
Revised: February 2, 2022
Published online: February 24, 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1] M. Dargusch, W. D. Liu, Z. G. Chen, *Adv. Sci.* **2020**, *7*, 2001362.
- [2] Y. S. Jung, D. H. Jeong, S. B. Kang, F. Kim, M. H. Jeong, K.-S. Lee, J. S. Son, J. M. Baik, J.-S. Kim, K. J. Choi, *Nano Energy* **2017**, *40*, 663.
- [3] H. Choi, S. J. Kim, Y. Kim, J. H. We, M.-W. Oh, B. J. Cho, *J. Mater. Chem. C* **2017**, *5*, 8559.
- [4] Z. Cao, E. Koukharenko, M. J. Tudor, R. N. Torah, S. P. Beeby, *Sens. Actuators, A* **2016**, *238*, 196.
- [5] C. Dun, W. Kuang, N. Kempf, M. Saeidi-Javash, D. J. Singh, Y. Zhang, *Adv. Sci.* **2019**, *6*, 1901788.
- [6] N. Kim, S. Lienemann, I. Petsagkourakis, D. Alemu Mengistie, S. Kee, T. Ederth, V. Gueskine, P. Leclère, R. Lazzaroni, X. Crispin, K. Tybrandt, *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 1424.
- [7] J. F. Serrano-Claumarchirant, I. Brotons-Alcázar, M. Culebras, M. J. Sanchez, A. Cantarero, R. Muñoz-Espí, C. M. Gómez, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 46348.
- [8] D. Qu, X. Li, H. Wang, G. Chen, *Adv. Sci.* **2019**, *6*, 1900584.
- [9] S. D. Xu, M. Hong, M. Li, Q. Sun, Y. Yin, W. D. Liu, X. L. Shi, M. Dargusch, J. Zou, Z. G. Chen, *Appl. Phys. Rev.* **2021**, *8*, 041404.
- [10] Y. Wang, M. Hong, W. D. Liu, X.-L. Shi, S.-D. Xu, Q. Sun, H. Gao, S. Lu, J. Zou, Z.-G. Chen, *Chem. Eng. J.* **2020**, *397*, 125360.
- [11] K. Nan, S. D. Kang, K. Li, K. J. Yu, F. Zhu, J. Wang, A. C. Dunn, C. Zhou, Z. Xie, M. T. Agne, H. Wang, H. Luan, Y. Zhang, Y. Huang, G. J. Snyder, J. A. Rogers, *Sci. Adv.* **2018**, *4*, eaau5849.
- [12] V. Karthikeyan, J. U. Surjadi, J. C. K. Wong, V. Kannan, K.-H. Lam, X. Chen, Y. Lu, V. A. L. Roy, *J. Power Sources* **2020**, *455*, 227983.
- [13] M. H. Jeong, A. Sanger, S. B. Kang, Y. S. Jung, I. S. Oh, J. W. Yoo, G. H. Kim, K. J. Choi, *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6*, 15621.
- [14] G. H. Kim, L. Shao, K. Zhang, K. P. Pipe, *Nat. Mater.* **2013**, *12*, 719.
- [15] Q. Zhou, K. Zhu, J. Li, Q. Li, B. Deng, P. Zhang, Q. Wang, C. Guo, W. Wang, W. Liu, *Adv. Sci.* **2021**, *8*, 2004947.
- [16] S. D. Xu, X. L. Shi, M. Dargusch, C. A. Di, J. Zou, Z. G. Chen, *Prog. Mater. Sci.* **2021**, *121*, 100840.
- [17] J.-Y. Kim, W. Lee, Y. H. Kang, S. Y. Cho, K.-S. Jang, *Carbon* **2018**, *133*, 293.
- [18] Y. Ryu, L. Yin, C. Yu, *J. Mater. Chem.* **2012**, *22*, 6959.
- [19] G. Wu, Z.-G. Zhang, Y. Li, C. Gao, X. Wang, G. Chen, *ACS Nano* **2017**, *11*, 5746.
- [20] Q. Hu, Z. Lu, Y. Wang, J. Wang, H. Wang, Z. Wu, G. Lu, H.-L. Zhang, C. Yu, *J. Mater. Chem. A* **2020**, *8*, 13095.
- [21] Y. Wang, Z. Lu, Q. Hu, X. Qi, Q. Li, Z. Wu, H.-L. Zhang, C. Yu, H. Wang, *J. Mater. Chem. A* **2021**, *9*, 3341.
- [22] J. Liu, B. Van Der Zee, R. Alessandri, S. Sami, J. Dong, M. I. Nugraha, A. J. Barker, S. Rousseva, L. Qiu, X. Qiu, N. Klasen, R. C. Chiechi, D. Baran, M. Caironi, T. D. Anthopoulos, G. Portale, R. W. A. Havenith, S. J. Marrink, J. C. Hummelen, L. J. A. Koster, *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 5694.
- [23] J. Liu, L. Qiu, G. Portale, M. Koopmans, G. Ten Brink, J. C. Hummelen, L. J. A. Koster, *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1701641.
- [24] J. Liu, L. Qiu, G. Portale, S. Torabi, M. C. A. Stuart, X. Qiu, M. Koopmans, R. C. Chiechi, J. C. Hummelen, L. J. Anton Koster, *Nano Energy* **2018**, *52*, 183.
- [25] S. J. Kim, J. H. We, B. J. Cho, *Energ. Environ. Sci.* **2014**, *7*, 1959.
- [26] B. Zhu, X. Liu, Q. Wang, Y. Qiu, Z. Shu, Z. Guo, Y. Tong, J. Cui, M. Gu, J. He, *Energ. Environ. Sci.* **2020**, *13*, 2106.
- [27] G. Yang, R. Niu, L. Sang, X. Liao, D. R. G. Mitchell, N. Ye, J. Pei, J. F. Li, X. Wang, *Adv. Energy Mater.* **2020**, *10*, 2000757.
- [28] H. L. Zhuang, J. Pei, B. Cai, J. Dong, H. Hu, F. H. Sun, Y. Pan, G. J. Snyder, J. F. Li, *Adv. Funct. Mater.* **2021**, *31*, 2009681.
- [29] S. I. Kim, K. H. Lee, H. A. Mun, H. S. Kim, S. W. Hwang, J. W. Roh, D. J. Yang, W. H. Shin, X. S. Li, Y. H. Lee, G. J. Snyder, S. W. Kim, *Science* **2015**, *348*, 109.
- [30] W. D. Liu, D. Z. Wang, Q. F. Liu, W. Zhou, Z. P. Shao, Z. G. Chen, *Adv. Energy Mater.* **2020**, *10*, 2000367.
- [31] B. Lee, H. Cho, K. T. Park, J.-S. Kim, M. Park, H. Kim, Y. Hong, S. Chung, *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 5948.
- [32] F. Suarez, D. P. Parekh, C. Ladd, D. Vashae, M. D. Dickey, M. C. Öztürk, *Appl. Energy* **2017**, *202*, 736.
- [33] C. S. Kim, G. S. Lee, H. Choi, Y. J. Kim, H. M. Yang, S. H. Lim, S.-G. Lee, B. J. Cho, *Appl. Energy* **2018**, *214*, 131.
- [34] H. Park, D. Lee, D. Kim, H. Cho, Y. Eom, J. Hwang, H. Kim, J. Kim, S. Han, W. Kim, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2018**, *51*, 365501.
- [35] S. J. Kim, H. E. Lee, H. Choi, Y. Kim, J. H. We, J. S. Shin, K. J. Lee, B. J. Cho, *ACS Nano* **2016**, *10*, 10851.
- [36] P. Yang, K. Liu, Q. Chen, X. Mo, Y. Zhou, S. Li, G. Feng, J. Zhou, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2016**, *55*, 12050.
- [37] C. S. Kim, H. M. Yang, J. Lee, G. S. Lee, H. Choi, Y. J. Kim, S. H. Lim, S. H. Cho, B. J. Cho, *ACS Energy Lett.* **2018**, *3*, 501.
- [38] H. Liu, Y. Wang, D. Mei, Y. Shi, Z. Chen, Springer, Singapore, **2017**.
- [39] S. Hong, Y. Gu, J. K. Seo, J. Wang, P. Liu, Y. S. Meng, S. Xu, R. K. Chen, *Sci. Adv.* **2019**, *5*, eaaw0536.
- [40] Y. Shi, Y. Wang, D. Mei, Z. Chen, *IEEE Access* **2018**, *6*, 43602.
- [41] Y. G. Lee, J. Kim, M.-S. Kang, S.-H. Baek, S. K. Kim, S.-M. Lee, J. Lee, D.-B. Hyun, B.-K. Ju, S. E. Moon, J.-S. Kim, B. Kwon, *Adv. Mater. Technol.* **2017**, *2*, 1600292.
- [42] S. Fan, Y. Gao, A. Rezaei, *Renewable Energy* **2021**, *173*, 581.
- [43] F. Suarez, A. Nozarías-Barz, D. Vashae, M. C. Öztürk, *Energ. Environ. Sci.* **2016**, *9*, 2099.
- [44] R. Riemer, A. Shapiro, *J. NeuroEng. Rehabil.* **2011**, *8*, 22.
- [45] C. K. Ho, A. R. Mahoney, A. Ambrosini, M. Bencomo, A. Hall, T. N. Lambert, *J. Sol. Energy Eng.* **2014**, *136*, 014502.
- [46] M. Lossec, B. Multon, H. Ben Ahmed, C. Goupil, *EPJ Appl. Phys.* **2010**, *52*, 11103.
- [47] J. Yuan, R. Zhu, *Appl. Energy* **2020**, *271*, 115250.
- [48] Y. Eom, D. Wijethunge, H. Park, S. H. Park, W. Kim, *Appl. Energy* **2017**, *206*, 649.
- [49] T. Nguyen Huu, T. Nguyen Van, O. Takahito, *Appl. Energy* **2018**, *210*, 467.
- [50] M. Hyland, H. Hunter, J. Liu, E. Veety, D. Vashae, *Appl. Energy* **2016**, *182*, 518.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Structural design of a flexible thermoelectric power generator for wearable applications



Choong Sun Kim^a, Gyu Soup Lee^a, Hyeongdo Choi^a, Yong Jun Kim^a, Hyeong Man Yang^b,
Se Hwan Lim^c, Sang-Gug Lee^a, Byung Jin Cho^{a,b,c,*}

^a School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea

^b Engineering Research Center (ERC) for Flexible Thermoelectric Device Technology, Daejeon 34141, Republic of Korea

^c Tegway Co. Ltd., #711 National Nano Fab., 291 Daehak-ro, Yuseong, Daejeon 34141, Republic of Korea

HIGHLIGHTS

- A high performance flexible thermoelectric generator (f-TEG) is developed.
- Structural design guideline of the f-TEG for human body application is proposed.
- The highest power ($2.28 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) using the f-TEG with no heatsink is achieved.
- The efficiency of power management IC must be included for the f-TEG optimization.

ARTICLE INFO

Keywords:

Flexible thermoelectric devices
Power generation
Body heat
Artificial arm
Power management IC

ABSTRACT

Self-powered wearable electronic devices are expected to be one of the mainstream technologies for future portable electronic systems. As an energy harvester to power wearable electronic devices, a flexible thermoelectric generator (f-TEG) can utilize human body heat as the energy source, creating an ideal solution. The f-TEG can make conformal contact to the human skin and fully utilize body heat with minimal energy loss, while also being comfortable to wear. However, to maximize the power generated by an f-TEG attached to the human body, a careful thermal and structural design analysis of the f-TEG must be carried out. Here, we fabricated flexible thermoelectric generators (f-TEGs) with different device parameters and evaluated their power generating performance using an artificial arm, which was carefully designed to mimic a real human arm. We demonstrated the impact of the f-TEG device parameters on the power generation performance under various circumstances. The experimental results were compared with the theoretical model, and guidelines for an optimum device design in terms of maximizing the generated power density are also presented. Finally, we show that the optimum device structure varies when the efficiency of the power management IC (PMIC) is included in the analysis of the power generation system, which is practically important.

1. Introduction

With the emergence of the Internet of Things (IOT) era, and the widespread use of electronic devices that can communicate anytime and anywhere, interest in wearable electronic systems is also growing. But before wearable electronic systems can be widely introduced, the problem with needing to frequently recharge their batteries must be overcome. The most effective way to solve this issue is to integrate an energy harvester with the wearable electronic device, so that it becomes a self-powered system. With this goal in mind, energy harvesting modules such as solar cells [1,2], vibration-based energy harvesters

[3,4], and thermoelectric generators (TEG) [5–10] have all been considered as semi-permanent energy suppliers. Among them, the TEG, which can convert the heat generated by the human body into electricity, is considered a particularly attractive way to realize a self-powered wearable system.

When a TEG is used in a self-powered wearable system, the TEG needs to be flexible in order to provide conformal thermal contact between the human body and the TEG, and this is especially true for a larger sized TEG. In order to realize a flexible TEG (f-TEG) structure, many researchers have focused on flexible TE materials including conducting polymer [11,12], CNT [13], and transition metal

* Corresponding author at: Department of Electrical Engineering, KAIST, 291 Daehak-Ro, Yuseong, Daejeon, Republic of Korea.

E-mail address: bjcho@kaist.edu (B.J. Cho).

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.074>

Received 1 August 2017; Received in revised form 20 January 2018; Accepted 24 January 2018
0306-2619/© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

dichalcogenide (TMDC) [14–16] materials. These materials have shown outstanding performance in flexibility but poor performance in output power density due to a poor power factor and a high contact resistance with metal electrodes. In terms of power output performance, field-proven BiTe-based inorganic materials are preferred, but the problem of material rigidity should still be overcome. Recently, innovative structures to fabricate f-TEGs using inorganic materials have been reported [17–19]. Among the various structures, a f-TEG that eliminates the rigid substrate and fills the empty space with a flexible polymer is advantageous for obtaining a high output as it retains the basic structure of the commercialized TEG [20–22].

Although there have been many reports on f-TEGs, most studies dealing with f-TEGs to date are at the stage of demonstration of the material or a single device. When a f-TEG is used for a wearable application using body heat, only a small temperature gradient is applied across the f-TEG because the surroundings have much larger thermal resistance than the f-TEG between the body and ambient [23]. As such, the f-TEG must be carefully designed and optimized in order to maximize the power generated from body heat.

In this work, we fabricated an f-TEG with commercially available bulk thermoelectric legs and experimentally demonstrated the effect of the f-TEG structure on the output power generated from body heat. The power generation performance of f-TEGs with different leg heights and device fill factors are evaluated and tendencies according to various structural changes are found based on experimental results. With structural optimization, we can obtain a power density of $2.28 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, to the best of our knowledge, which is the highest value among reported flexible TEGs on the human body with no use of heatsink under natural convection. An artificial arm, which was carefully designed to mimic a real human arm, was also devised and made for repeatable and reliable experiments. The thermal model of a conventional TEG was modified and extended to the f-TEG, and the validity of the model was evaluated through a comparison with experimental results. In addition, we provide guidelines for the optimized structure of the f-TEG with consideration of the voltage-dependent efficiency of the power management IC (PMIC), which is practically important for wearable applications.

2. Experimental procedure

2.1. Flexible thermoelectric device

The fabricated f-TEG was simply based on a conventional TEG module structure but without a ceramic substrate. The integration process begins with arranging and bonding the TE legs on patterned copper thin film. After the $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.0}\text{Cu}_{0.5}$ solder paste was printed onto the copper patterns, N and P types of thermoelectric legs were directly transferred onto the printed solder material, followed by a bonding process in nitrogen ambient via a eutectic wafer bonder system. During the bonding process, the temperature of the top and bottom side of the device was ramped up to 260°C and quickly cooled down after the temperature reached 260°C . After the bonding process, in order to ensure the mechanical integrity of the structure without a rigid substrate, the empty space in the module was filled with a proprietary polymer material that has a very low thermal conductivity ($0.03 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$) [24]. A schematic drawing and an actual photo of the fabricated f-TEG are shown in Fig. 1. Since the copper electrodes in the f-TEG structure are exposed, the electrodes will have contact with the human skin. However, this does not cause an electrical short between the electrodes because the electrical resistance of the human skin is much higher than that of the copper electrodes. For the thermoelectric legs, a commercially available material (Kryotherm) with an area of 1.0 mm^2 and two different heights of 0.8 mm and 2.5 mm was used. Sample f-TEGs with 72 couples of thermoelectric legs having different fill factors of 15.1%, 19.8%, and 27.2%, were prepared. Here, the fill factor is defined as the ratio of the overall area of the

thermoelectric legs to the total area of the device. The device figure of merit (ZT) of the f-TEG modules was in a range of 0.63–0.64 for the 2.5 mm high device and 0.60–0.62 for the 0.8 mm high device, and the electrical resistance of the module was about 2.14Ω for the f-TEG leg heights of 2.5 mm and 0.81Ω for the leg heights of 0.8 mm, respectively (Table S1). The ZT values and electrical resistances were measured using a Z-meter from RMT Ltd.

2.2. Thermoelectric properties

The electrical conductivity and the Seebeck coefficient of the bulk material were measured using a thermoelectric property measurement system (ZEM-3, ULVAC). The thermal conductivity κ of the thermoelectric material was determined based on the relation $\kappa = \lambda C_p D$, where the thermal diffusivity λ , the heat capacity C_p , and the density D were measured using the laser flash method (LFA 457, Netzsch), differential scanning calorimetry (DSC 204F1, Netzsch) and the Archimedes' method, respectively. All of the thermoelectric properties are presented in Table 1.

2.3. Artificial arm

To determine the optimum f-TEG module design through experiments and the heat transfer model, we prepared an artificial arm whose thermal resistance was adjusted to be similar to that of a real human arm. Using the artificial arm made it easy to repeatedly obtain measurements using the same experimental environments. Fig. 3a shows a photo of the outside and inside of the artificial arm. A flexible heater is attached to the inner surface of the artificial arm with a polyimide (PI) film interfacial layer. The artificial skin is made of about 3 mm thick rubber. As illustrated in Fig. 3b, a PI film interfacial layer was used so that the heat resistance between the flexible heater (which mimics the blood vessel in an actual human arm) and the artificial skin could be adjusted, by carefully adjusting the thickness of the PI film, so that it would be similar to the conditions of a human arm.

In a real human arm, the temperature of the blood vessels is considered a heat source with a constant temperature of 37°C . When the ambient temperature is 25°C , the skin temperature of the human arm is measured to be 33.9°C (Fig. 3c). If two thermal resistors are connected in series and the temperatures of both ends are fixed, the thermal resistances of each component can be obtained by measuring the temperature at the interface of the two thermal resistors. Considering this, an artificial arm with a thermal resistance similar to that of a human arm can be prepared by adjusting the temperature of the artificial skin to be 33.9°C for the same ambient and core temperatures. As shown in Fig. 3d, the temperature of the artificial skin decreases with increasing thickness of the PI interfacial film, due to the increase in total thermal resistance. In our experiment, a $500 \mu\text{m}$ thick PI film created a thermal resistance that was closest to the case of a real human arm.

2.4. Measuring the power output

To measure the power generated by the f-TEG on the artificial arm, $30 \mu\text{m}$ flexible graphite sheets with high lateral thermal conductivity ($1300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) were attached to both sides of the f-TEG using a thermal paste with a thermal conductivity of $8.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. The output power and the voltage output of the f-TEG were obtained using a Keithley 2425 sourcemeter. Instead of using an external load resistance, we matched the auxiliary external load resistance using the Keithley 2425 sourcemeter, which can extract the output current vs. input voltage. An additional explanation of the f-TEG power measurement is described in the Supporting Information. The core and the ambient temperature were monitored using a Keithley 2700 multimeter.

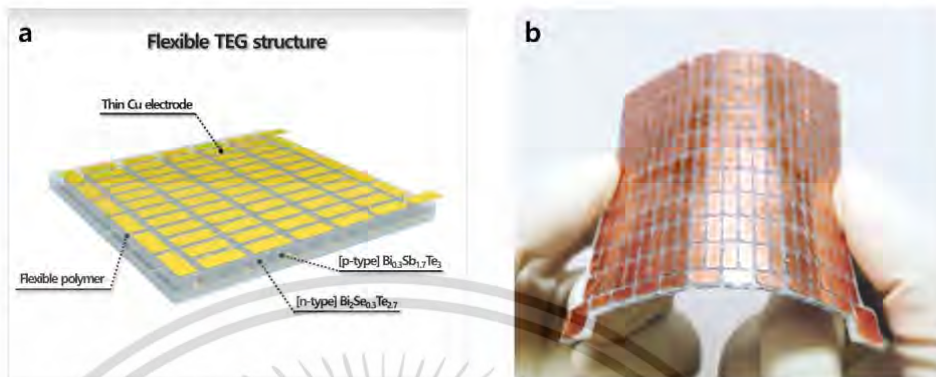


Fig. 1. (a) Schematic drawing of the flexible TEG structure. (b) Photo of actual fabricated f-TEG device.

Table 1
Room temperature material properties of the bulk thermoelectric materials.

Material type	σ (S cm ⁻¹)	α (μ V K ⁻¹)	κ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
p-type	2028	176	1.73
n-type	1651	-161	1.88

3. Results and discussion

3.1. 1-dimensional heat transfer model on the human body

In the human body, heat is produced by metabolic chemical reactions, and is then transmitted by blood flow and distributed through the skin via convection, radiation, and sweat evaporation [25,26]. Under normal circumstances the core temperature of the human body (T_{core}) can be considered a constant heat source of around 37 °C. Once the heat conduction through the system reaches a steady state, the whole system can be represented as a thermal circuit (Fig. 2) [27]. The open circuit voltage (V_{oc}) generated from the f-TEG can be determined by the

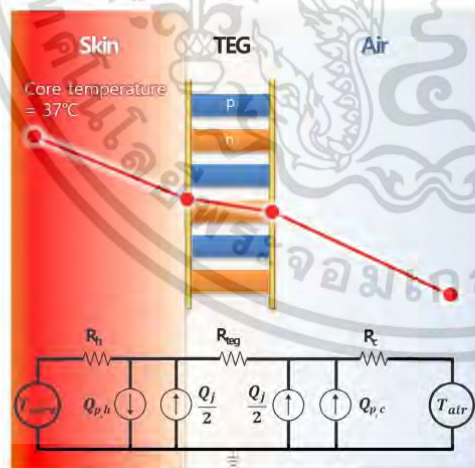


Fig. 2. Schematic diagram of the thermoelectric energy harvesting environment using body heat. The thermal equivalent circuit of the thermal analysis is also illustrated. In the thermal circuit, $Q_{p,h}$ and $Q_{p,c}$ represent the Peltier heating on hot side and cold side, respectively.

equation $V_{oc} = N\alpha(T_h - T_c)$, where N is the number of thermoelectric legs, α is the Seebeck coefficient of the legs, T_h and T_c are the hot and cold side temperatures of the TEG, respectively. The temperature difference across the f-TEG of the open circuit (i.e., no load resistance) can be expressed as

$$T_h - T_c = \frac{R_{leg}}{R_h + R_{leg} + R_c} (T_{core} - T_{atr}) \tag{1}$$

where R_h is the hot side thermal resistance, R_c is the cold side thermal resistance, and R_{leg} is the thermal resistance of the f-TEG itself. In our f-TEG modules, a flexible polymer material fills the empty space between legs. Therefore, when calculating the thermal resistance of the f-TEG, the thermal resistance of the thermoelectric legs as well as the thermal resistance of the polymer filler material must be considered together, as a parallel parasitic resistance. Then the thermal resistance of the f-TEG can be expressed as:

$$R_{leg} = \left(\frac{1}{R_{legs}} + \frac{1}{R_{filler}} \right)^{-1} = \frac{L}{\kappa_{dev} A} = \frac{L}{(\kappa_{leg} F + \kappa_{filler} (1-F)) A} \tag{2}$$

where A is the entire area of the f-TEG module, L is the length of the thermoelectric legs, κ_{dev} is the effective thermal conductivity of the f-TEG, κ_{leg} is the thermal conductivity of the thermoelectric legs, κ_{filler} is the thermal conductivity of the filler material, and F is the fill factor of the TEG.

If a load resistance is connected to the TEG, as it would be in an actual usage situation, current flow through the f-TEG generates Peltier (Q_p) and Joule (Q_J) heating, which changes the temperature difference across the f-TEG. To obtain the temperature difference and power output of the TEG with the load resistance, several researches have proposed various formulas [28–31]. Above all, Yazawa et al. suggested a method for obtaining the value of an optimum load resistance using a Lagrange multiplier and found the temperature difference with the optimum load resistance using iterative calculation with or without considering the device fill factor [30,31]. We modified the equations to take into account the thermal conductivity of the filler, an essential factor for f-TEGs. The modified ratio of the load resistance to the f-TEG resistance (m) for optimum power density can be calculated as:

$$m_{opt} = \sqrt{1 + Z_f F \frac{(T'_h + T'_c)}{2}} \tag{3}$$

where T'_h and T'_c are the hot side and cold side temperature with consideration of Peltier and Joule heating, and Z_f is the wearable figure-of-merit, which can be expressed as $\alpha^2 \sigma_{eff} \kappa_{dev}^{-1}$ with effective electrical conductivity σ_{eff} considering the effect of the contact and electrode resistance. With the optimum load resistance, the power density can be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

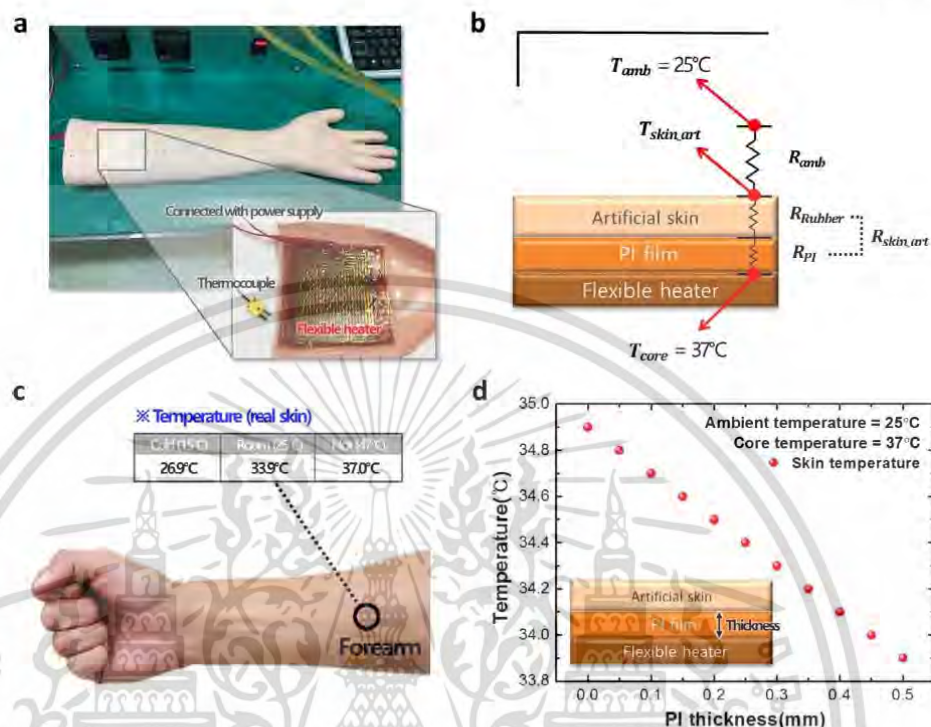


Fig. 3. (a) The outside and inside of the fabricated artificial arm. (b) Schematic diagram of the artificial skin for thermal modeling. (c) The temperature of the forearm when the ambient temperature is 15 °C, 25 °C, and 47 °C. The skin temperature value at a room temperature of 25 °C was measured in our laboratory, and the other values at 15 °C and 47 °C were taken from Ref. [34]. (d) The temperature on the artificial skin vs. PI thickness.

calculated by the following formula:

$$P_{\text{gen}} = \frac{m}{(1+m)^2} \frac{\alpha^2 \sigma_{\text{eff}} F}{d} (T_h - T_c)^2 \quad (4)$$

where d is the height of the thermoelectric leg. The details of the development of the formulas for obtaining m_{opt} , T_h , and T_c are described in the Supporting Information.

3.2. Power generation from the f-TEG using body heat

To accurately calculate the power generated using the 1-d heat transfer model, it is important to reasonably define R_h and R_{air} in Eq. (1). Since the thermal resistance of the f-TEG can be calculated using Eq. (2), the heat flow across the system can be obtained by measuring the temperature difference between the top and bottom surfaces of the f-TEG, and then dividing it by the thermal resistance of the f-TEG. From the calculated heat flow Q , the thermal resistance of the hot side can be calculated from $R_h = (T_{\text{core}} - T_h)/Q$. The hot side thermal resistance can be expressed in terms of the heat transfer coefficient h_{skin} as $R_h = 1/h_{\text{skin}}A$, where A is the contact area. From this, h_{skin} can be obtained, and in our experimental situation, it is determined to be $39.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. In the same manner, the thermal resistance between the f-TEG and air can also be calculated. The heat transfer coefficient (h_{air}) is determined to be $10.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. The calculation curves in Fig. 4 were plotted using the values obtained above.

Fig. 4 shows the calculated and experimental results of the dependence of the fill factor on the performance of the f-TEG using body heat under natural convection. As shown in Fig. 4a, the open circuit voltage

V_{oc} generated by the f-TEG becomes higher when the fill factor of the module decreases. This is attributed to the larger thermal resistance of the f-TEG module with a smaller fill factor, which causes a larger temperature difference across the device. Likewise, higher thermoelectric legs cause a larger thermal resistance in the device, resulting in a larger temperature difference across the device, and thereby a higher voltage output. As shown in Fig. 4b, the temperature differences across the f-TEG with 2.5 mm leg heights are 0.55 °C, 0.68 °C, and 0.89 °C under natural convection when the fill factors are 27.2%, 19.8%, and 15.1%, respectively. It can be seen that the f-TEG with legs of 2.5 mm height has about a three times greater temperature difference than the f-TEG having a leg height of 0.8 mm. Fig. 4c shows the power density against the leg height and the fill factor of the f-TEG. The generated power density of the f-TEG with 2.5 mm height legs increased from $1.52 \mu\text{W cm}^{-2}$ to $2.28 \mu\text{W cm}^{-2}$ when the fill factor decreased from 27.2% to 15.1%. To the best of our knowledge, the power density of $2.28 \mu\text{W cm}^{-2}$ with a fill factor of 15.1% is the highest value of power output from flexible TEGs on a human body with no use of heatsink under natural convection reported to date (Table 2). In future, if a flexible heatsink is developed, the performance of the flexible TEG will be further improved.

According to the heat transfer model, the power density begins to drop sharply from a certain fill factor value, where the total area of the TE legs becomes a dominant factor in the total power output. The optimum fill factor against leg height under natural convection is represented in Fig. 4d. The results show that the optimum fill factor of the f-TEG to generate power using body heat with natural convection is below 8%, up to a leg height of 20 mm. This implies that the most

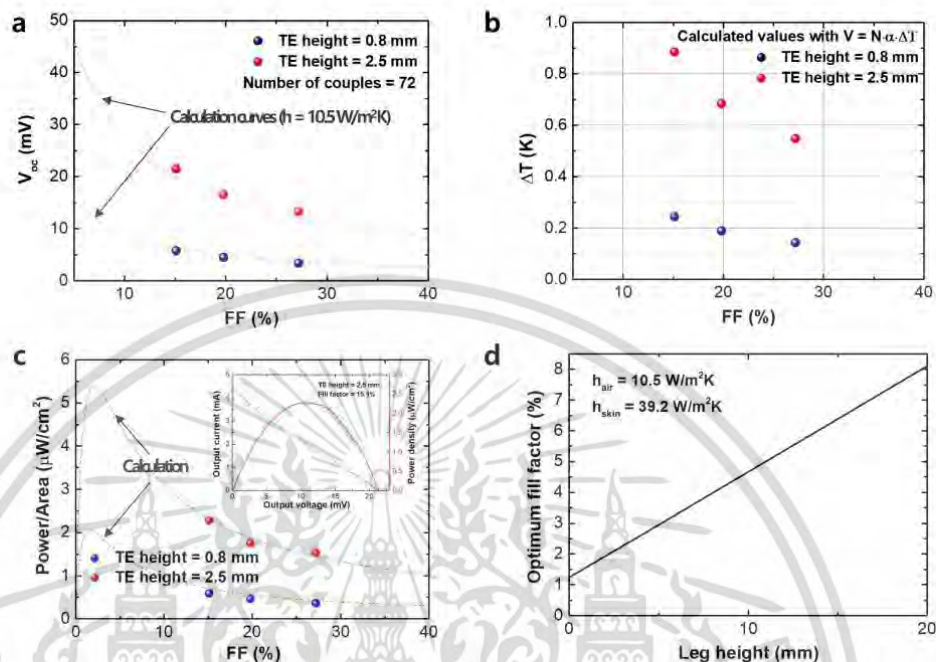


Fig. 4. Output performance of the f-TEG under natural convection. The lines are the calculated results while the dots are the measurement results. (a) Open circuit voltage output vs. the fill factor of the f-TEG. (b) Temperature difference across the f-TEG vs. the fill factor. (c) Power density vs. the fill factor. The inset shows the I-V curve obtained from the load matching method. (d) Optimum fill factor as a function of leg height.

critical factor in power generation using body heat is to secure a high enough temperature difference across the f-TEG module.

Wearable devices are often operated while moving, since the person wearing the device can walk around, and therefore an analysis to consider forced convection is also important. When a person is walking at a normal pace the air velocity is approximately 1.4 m s^{-1} [34]. Considering this, the output performance of the f-TEGs was measured under moving air with speeds of 1, 2, and 3 m s^{-1} using an electric fan. The heat transfer coefficient for the forced convection was obtained in the same way as the natural convection calculation. The calculated heat transfer coefficients are 20, 23, and $27 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ for air velocities of 1, 2, and 3 m s^{-1} , respectively. Air velocity was measured using a thermal anemometer from Testo (Testo 405i). Fig. 5 shows the output performance of the f-TEGs with 2.5 mm height legs under forced convection. Under forced convection, the large reduction in thermal resistance between the device and the air increases the temperature difference across the device. For the f-TEG with a fill factor of 15.1%, the temperature differences are 1.32 °C, 1.46 °C, and 1.58 °C for air

velocities of 1, 2, and 3 m s^{-1} , respectively, which is 1.48–1.78 times higher than the temperature difference under natural convection. The increase in the temperature differences eventually leads to an increase in voltage and power density (Fig. 5b and c). With a fill factor of 15.1%, the output voltage is 32.14 mV–38.24 mV and the power density is $4.88 \mu\text{W cm}^{-2}$ – $7.31 \mu\text{W cm}^{-2}$ when the air velocity is 1 m/s–3 m/s. Under these conditions, if the size of the flexible TEG is 10 cm × 20 cm, which is the typical size of a wristband, the electricity generated from the body heat will be 0.98 mW–1.46 mW, which is high enough to operate medical sensors attached on the body, such as temperature, ECG, and pulse sensors.

Fig. 5d represents the change in the optimum fill factor with changes in air velocity. When the fill factor increases beyond the optimum fill factor, the total output power of the device decreases because the temperature difference across the device decreases, due to the smaller thermal resistance, as we have already seen in Fig. 4b. If the portion of the thermal resistance of the f-TEG in the total thermal resistance of the system increases, the change in the temperature

Table 2

A summary of experimental performance results of flexible TEGs on human body in natural convection.

Materials			Ambient temperature (°C)	P_{den} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Ref.
	p-type	n-type			
CNT composites	CNT/PEG	Doped CNT/PEG	24	0.125×10^{-3}	Ito et al. [13]
Chemical exfoliating	NbSe ₂ nanosheets	WS ₂ nanosheets	25	0.73×10^{-3}	Oh et al. [14]
Dispenser printing	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃	Bi ₂ Te _{2.7} Se _{0.3}	25	5.4×10^{-3}	Kim et al. [17]
Bulk	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃	Bi ₂ Te _{2.7} Se _{0.3}	24	0.37	Suarez et al. [21]
Bulk	Bi ₂ Te ₃ -based	Bi ₂ Te ₃ -based	25	10.4×10^{-3}	Liu et al. [32]
Bulk	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃	Bi ₂ Te _{2.7} Se _{0.3}	20	1.6	Eom et al. [33]
Bulk	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃	Bi ₂ Te _{2.7} Se _{0.3}	25	2.28	Ours

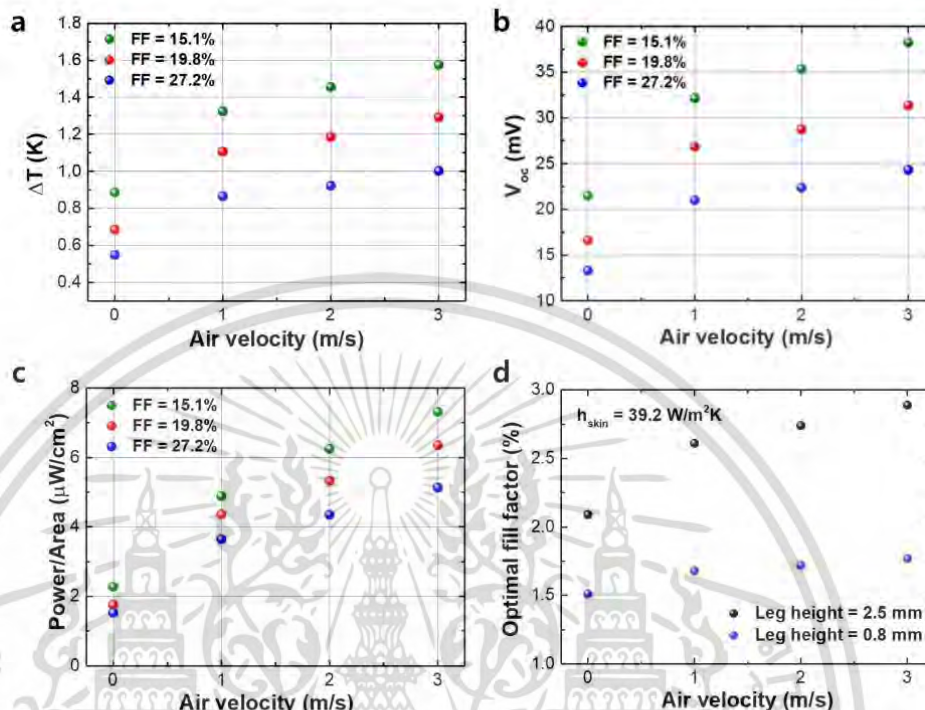


Fig. 5. Output performance of the f-TEG under forced convection. (a) Temperature difference across the f-TEG vs. the air velocity. (b) Open circuit voltage vs. the air velocity. (c) Power density vs. the air velocity. (d) Optimum fill factors for the different air velocities.

difference across the f-TEG becomes less sensitive to the fill factor. This condition can be achieved by increasing the air velocity. Then, the optimum fill factor for the maximum power density shifts to a larger value, as illustrated in Fig. 5d, because the higher fill factor means more TE legs in a given device area. It should be noted that when the fill factor is too low, the number of TE legs becomes the limiting factor to the power density, but when the fill factor is above the optimum value, the temperature difference becomes the limiting factor. This is because a higher fill factor leads to a smaller temperature difference.

3.3. F-TEG design considering PMIC efficiency

As described above, the optimum fill factor for the maximum power density of the f-TEG in a wearable application is less than 3%. However, if we consider the effect of power management IC (PMIC), it becomes a different story [35,36]. It should be noted that, like all other energy harvesters, the thermoelectric device also needs a PMIC to utilize the generated power to operate an electronic device. Fig. 6a is the typical power transfer efficiency curve of a PMIC against the input voltage of the PMIC. The data are taken from the data sheet of the PMIC BQ25504 from Texas Instruments, which is widely used for small scale energy harvesters [37]. The minimum input voltage that can turn on this PMIC is 80 mV, and the power transfer efficiency increases with input voltage. The data show that if the output voltage of the TEG (which is the input voltage of the PMIC) is 100 mV, only around 30% of the generated power can be utilized. This means the magnitude of the output voltage is as important as the output power generation for a TEG operating with a small temperature difference, such as in the case of an wearable application. Because of the strong relationship between the output voltage and PMIC efficiency, the optimum fill factor of the f-TEG

also varies. An f-TEG with a small fill factor has a smaller number of TE legs in a given device area, resulting in a smaller output voltage. In this case, a large portion of the generated power is wasted by the PMIC.

Fig. 6b shows the calculated curve for the output voltage vs. fill factor, when the area of the f-TEG is fixed at 100 cm^2 , the thermoelectric leg height is 2.5 mm, and the ambient is forced convection. Unlike power density, the output voltage increases sharply with the fill factor when the fill factor is below 10%, and then becomes somewhat saturated. Using the two curves in Fig. 6a and b, we can determine the PMIC efficiency as a function of the fill factor, and that results are shown in Fig. 6c. As can be seen from the results, the PMIC does not operate when the fill factor is less than 4.4%, and its conversion efficiency reaches 47.2% when the fill factor of the f-TEG is 50%. Considering both the PMIC efficiency and the power density generated by the f-TEG, the final output power of the energy harvesting system can be calculated, as shown in Fig. 6d. In this case, the optimum fill factor is about 6.0%, which is more than double that of the f-TEG without a PMIC.

Since both the output voltage and the power of the f-TEG increase proportionally with the device area, the efficiency of the entire system, including the PMIC, strongly depends on the device area as well. Considering that the practical size of an f-TEG for a wearable application is in the range of $50\text{--}200 \text{ cm}^2$, the efficiency of the PMIC in this range of area under forced convection was calculated as a function of the fill factor, and is shown in Fig. 6e. The results also confirm that PMIC efficiency increases with the device area as well as the fill factor. At a device area of 200 cm^2 , the maximum PMIC efficiency is about 71.2% when the fill factor is 50%. Using the results in Fig. 6e, we can recalculate the output power, which is shown in Fig. 6f. It is interesting to observe that the optimum fill factor varies from 3.8% to 39.0%

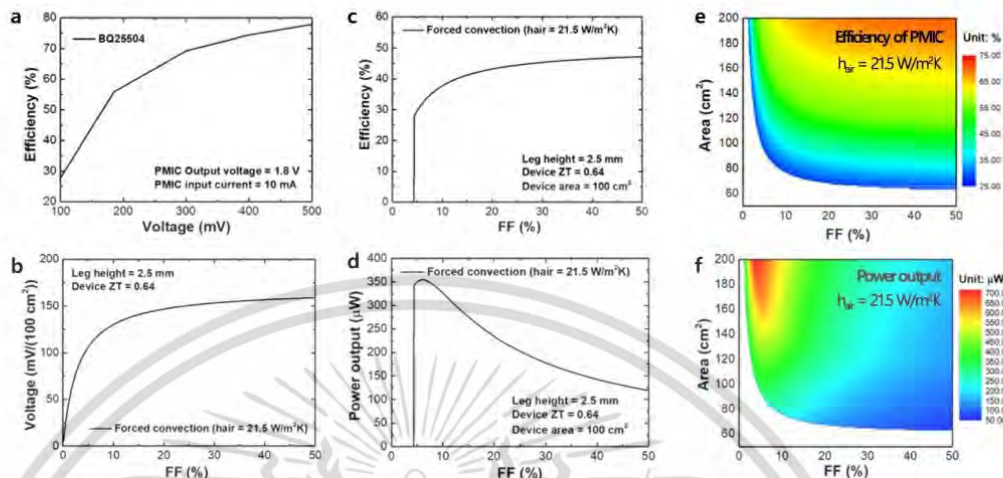


Fig. 6. (a) Power transfer efficiency curve of a typical commercially available PMIC (BQ25504 from Texas Instruments). (b) Voltage output vs. fill factor. Here, the device area is 100 cm^2 . (c, d) PMIC efficiency and final output power of the energy harvesting system as a function of fill factor. (e, f) The contour plot of PMIC efficiency and the output power of the entire system as a function of fill factor and device area.

depending on the device area, whereas the optimum fill factor without the PMIC is only between 2% and 5%.

4. Conclusion

In this work, we proposed design guidelines for an f-TEG for wearable applications, based on both theoretical and experimental points of view. Power generation performance was evaluated by attaching the f-TEG to an artificial arm that was carefully designed to mimic a real human arm. The thermal analysis model for a conventional TEG was modified and extended to an f-TEG and the thermal resistance of the flexible polymer filling materials was taken into consideration. The results showed that the most critical factor affecting power generation using body heat was the size of the temperature difference across the f-TEG module, and that the TE leg height and the fill factor are two critical parameters with respect to the TEG device design. When the leg height was increased from 0.8 mm to 2.5 mm, the power density increased by about four times. It was also found that there is an optimum fill factor to achieve maximum power generation under a given environmental situation. The optimum fill factor varies with the thermal resistance of the surroundings, such as air velocity. It was also found that the efficiency of the PMIC is a critical factor for optimizing the f-TEG device, especially for a case like wearable applications, where the temperature difference across the f-TEG device is very small, and as a result the output voltage is not large enough to fully operate the PMIC. The results in this work demonstrate that the optimum fill factor shifts to a larger value when the PMIC efficiency is taken into account, and it also strongly depends on the area of the TEG device.

The fabricated high-efficiency f-TEG with the structural optimization can be utilized for a wide range of applications including medical applications such as self-powered wearable electrocardiography and industry applications such as a self-powered wireless sensor network in factories to monitor heat pipe temperatures, gas leaks, etc. In addition, because no rigid heatsink is used, it has advantage of being more flexible and aesthetic. Since the optimal structure of the f-TEG varies depending on the environmental situation, the proposed design guideline of the f-TEG could be applicable to extract the highest possible power.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean Government (MSIP) (NRF-2015R1A5A1036133).

Appendix A. Supplementary material

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.074>.

References

- [1] Kim BJ, Kim DH, Lee YY, Shin HW, Han GS, Hong JS, et al. Highly efficient and bending durable perovskite solar cells: toward a wearable power source. *Energy Environ Sci* 2015;8:916–21.
- [2] Yoon J, Baek AJ, Park SI, Elvikis P, Geddes JB, Li LF, et al. Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs. *Nat Mater* 2008;7:907–15.
- [3] Seol ML, Woo JH, Jeon SB, Kim D, Park SJ, Hur J, et al. Vertically stacked thin triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting. *Nano Energy* 2015;14:201–8.
- [4] Wang ZL, Chen J, Lin L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy Environ Sci* 2015;8:2250–82.
- [5] Park SH, Jo S, Kwon B, Kim F, Ban HW, Lee JE, et al. High-performance shape-engineerable thermoelectric painting. *Nat Commun* 2016;7:13403.
- [6] Leonov V, Valters RJM. Wearable electronics self-powered by using human body heat: the state of the art and the perspective. *J Renew Sustain Energy* 2009;1:062701.
- [7] Suterori K, Hoshino S, Kamata T. Carbon nanotube bundles/polystyrene composites as high-performance flexible thermoelectric materials. *Appl Phys Lett* 2013;10:153902.
- [8] Kim SJ, We JH, Cho BJ. A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric. *Energy Environ Sci* 2014;7:1959–65.
- [9] Lu Z, Layani M, Zhao X, Tan LP, Sun T, Fan S, et al. Fabrication of flexible thermoelectric thin film devices by inkjet printing. *Small* 2014;10:3551–4.
- [10] Kim SJ, Choi H, Kim Y, We JH, Shin JS, Lee HE, et al. Post ionized defect engineering of the screen-printed Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3} thick film for high performance flexible thermoelectric generator. *Nano Energy* 2017;31:258–63.
- [11] Bubnova O, Khan ZU, Malti A, Braun S, Fahlman M, Berggren M, et al. Optimization of the thermoelectric figure of merit in the conducting polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Nat Mater* 2011;10:429–33.
- [12] Wei Q, Mukaida M, Kirihara K, Naitoh Y, Ishida T. Polymer thermoelectric modules screen-printed on paper. *RSC Adv* 2014;4:28802–6.
- [13] Ito M, Koizumi T, Kojima H, Saito T, Nakamura M. From materials to device design of a thermoelectric fabric for wearable energy harvesters. *J Mater Chem A* 2017;5:12068–72.
- [14] Oh JY, Lee JH, Han SW, Chae SS, Bae J, Kang YH, et al. Chemically exfoliated

- transition metal dichalcogenide nanosheet-based wearable thermoelectric generators. *Energy Environ Sci* 2016;9:1696–705.
- [15] Wan C, Tian R, Azizi AB, Huang Y, Wei Q, Sasai R, et al. Flexible thermoelectric foil for wearable energy harvesting. *Nano Energy* 2017;30:840–5.
- [16] Tian R, Wan C, Wang Y, Wei Q, Ishida T, Yamamoto A, et al. A solution-processed TiS_2 /organic hybrid superlattice film towards flexible thermoelectric devices. *J Mater Chem A* 2017;5:564–70.
- [17] Kim MK, Kim MS, Lee S, Kim C, Kim YJ. Wearable thermoelectric generator for harvesting human body heat energy. *Smart Mater Struct* 2014;23:105002.
- [18] Lu Z, Zhang H, Mao C, Li CM. Silk fabric-based wearable thermoelectric generator for energy harvesting from the human body. *Appl Energy* 2015;164:57–63.
- [19] Trung NH, Toan NV, Ono T. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process. *Appl Energy* 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.005>.
- [20] Hyland M, Hunter H, Liu J, Veety E, Vashaee D. Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting. *Appl Energy* 2016;182:518–24.
- [21] Suarez F, Parekh DP, Vashaee D, Dickey MD, Ozturk MC. Flexible thermoelectric generator using bulk legs and liquid metal interconnects for wearable electronics. *Appl Energy* 2017;202:736–45.
- [22] Kim SJ, Lee HE, Choi H, Kim Y, We JH, Shin JS, et al. High-performance flexible thermoelectric power generator using laser multiscanning lift-off process. *ACS Nano* 2016;10:10851–7.
- [23] Leonov V, Fiorini P. Thermal matching of a thermoelectric energy scavenger with the ambience. In: *Proc of the 5th European conf. on thermoelectrics*; 2007. p. 129–33.
- [24] Cho BJ et al. A flexible thermoelectric device. PCT patent PCT/KR2016/012059; October 26, 2016.
- [25] Harris JA, Benedict EG. A biometric study of human basal metabolism. *Proc Natl Acad Sci USA* 1918;4:370–3.
- [26] Burton AC. The range and variability of blood flow in the human fingers and the vasomotor regulation of body temperature. *J Physiol* 1939;127:437–53.
- [27] Suarez F, Nozariasbmarz A, Vashaee D, Ozturk MC. Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics. *Energy Environ Sci* 2016;9:2099–113.
- [28] Leonov V. Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors. *IEEE Sensors J* 2013;13:2284–91.
- [29] Bahk JH, Fang H, Yazawa K, Shakouri A. Flexible thermoelectric materials and device optimization for wearable energy harvesting. *J Mater Chem C* 2015;3:10362–74.
- [30] Yazawa K, Shakouri A. Cost-efficiency trade-off and the design of thermoelectric power generators. *Environ Sci Technol* 2011;45:7548–53.
- [31] Yazawa K, Shakouri A. Optimization of power and efficiency of thermoelectric devices with asymmetric thermal contacts. *J Appl Phys* 2012;111:024509.
- [32] Liu H, Wang Y, Mei D, Shi Y, Chen Z. Design of a wearable thermoelectric generator for harvesting human body energy. Yang C, Virk G, Yang H, editors. *Wearable sensors and robots. Lecture notes in electrical engineering*, vol 399. Singapore: Springer; 2017.
- [33] Fom Y, Wijethunge D, Park H, Park SH, Kim W. Flexible thermoelectric power generation system based on rigid inorganic bulk materials. *Appl Energy* 2017;206:649–56.
- [34] Webb B. Temperatures of skin, subcutaneous tissue, muscle and core in resting men in cold, comfortable and hot conditions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1992;64:471–6.
- [35] Pietrzyk K, Soares J, Ohara B, Lee H. Power generation modeling for a wearable thermoelectric energy harvester with practical limitations. *Appl Energy* 2016;183:218–28.
- [36] Thielen M, Sigrist L, Magno M, Hierold C, Benini L. Human body heat for powering wearable devices: from thermal energy to application. *Energy Convers Manage* 2017;131:44–54.
- [37] BQ. Ultra low-power boost converter with battery management for energy harvester applications. Texas Instruments; June 2015. Web 28 May 2016. <<http://www.ti.com/lit/ds/sym/blink/bq25504.pdf>>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thin Thermoelectric Generator System for Body Energy Harvesting

KRISHNA T. SETTALURI,¹ HSINYI LO,^{1,2} and RAJEEV J. RAM¹

1.—Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA. 2.—e-mail: katey@mit.edu

Wearable thermoelectric generators (TEGs) harvest thermal energy generated by the body to generate useful electricity. The performance of these systems is limited by (1) the small working temperature differential between the body and ambient, (2) the desire to use natural air convection cooling on the cold side of the generator, and (3) the requirement for thin, lightweight systems that are comfortable for long-term use. Our work has focused on the design of the heat transfer system as part of the overall thermoelectric (TE) system. In particular, the small heat transfer coefficient for natural air convection results in a module thermal impedance that is smaller than that of the heat sink. In this heat-sink-limited regime, the thermal resistance of the generator should be optimized to match that of the heat sink to achieve the best performance. In addition, we have designed flat (1 mm thickness) copper heat spreaders to realize performance surpassing splayed pin heat sinks. Two-dimensional (2-D) heat spreading exploits the large surface area available in a wristband and allows patterned copper to efficiently cool the TE. A direct current (DC)/DC converter is integrated on the wristband. The system generates up to 28.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ before the converter and 8.6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ after the converter, with 30% efficiency. It generates output of 4.15 V with overall thickness under 5 mm.

Key words: Thermoelectric, energy harvesting, body power, wearable, impedance matching

INTRODUCTION

Thermoelectric modules contain *n*-doped and *p*-doped semiconductor thermocouples placed electrically in series and thermally in parallel. When a temperature gradient is applied across the module, charge carriers in the doped material diffuse away from the hot side towards the cold side. This results in a potential difference across the material characterized by the Seebeck effect. The theoretical maximum power that can be generated from skin by a wearable TEG is 180 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,¹ assuming heat flow of 20 mW/cm², Z of $3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, skin temperature of 34°C, and air temperature of 22°C. Factors such as the thermal contact resistance and low natural convection coefficient in cooling the cold side yield a much smaller temperature gradient across the module.

(Received June 2, 2011; accepted November 23, 2011; published online December 10, 2011)

A low-power watch powered by body heat produced 22.5 μW of electrical power with only a 1.5 K temperature drop across the TEG.² To further increase the heat flow in TEGs, a radiator was applied to body-powered wireless devices^{3–5} and body-powered pulse oximeters.^{6–8} It generated up to 100 μW of electrical power with a size of 3 cm \times 3 cm \times 1.5 cm.

The 2-D heat-spreading wristbands presented here produce up to 285 μW from a Bi₂Te₃ TEG module (256 thermocouples, each having 2 mm thickness and 1 mm² area) while maintaining total thickness <5 mm (Fig. 1a). It is thin, lightweight, and comfortable for long-term use. The infrared image in Fig. 1b shows effective cooling using the large surface area available in a wristband. Due to the high thermal conductivity of copper, heat is able to spread out and dissipate throughout the entire area, which enhances the effective heat transfer coefficient.

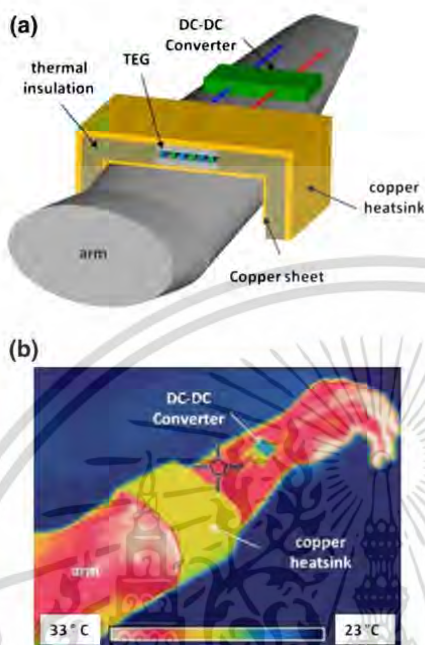


Fig. 1. (a) Schematic diagram of a low-profile wearable TEG. (b) An infrared image of copper with a high-emissivity coating showing effective cooling using the large surface area available in a wristband.

In the following, we present a design for this low-profile wearable wristband heat sink as well as an experimental prototype. The design includes thermal impedance matching and 2-D heat spreading concepts to maximize the electrical power output. We examine three types of heat sink and present experimental data compared with simulation results.

DESIGN

To estimate the temperature gradient across the TEGs, we model the system as a thermal circuit that includes a heat sink, thermal interface material (TIM), Bi_2Te_3 TE elements, ceramic plates, and copper sheet in series. The low-profile wearable heat sink is a 1-mm-thick copper plate with area of $29.2 \text{ cm} \times 6.4 \text{ cm}$. A ceramic-filled silicone TIM reduces the thermal contact resistance. A Marlow TEG module includes 256 Bi_2Te_3 thermocouples for power generation (2 mm thick, 1 mm^2 area) and two ceramic plates (0.7 mm thick, 10 cm^2 area) for electrical insulation. A flexible 0.1-mm-thick copper sheet with area of $14.6 \text{ cm} \times 6.4 \text{ cm}$ is used to directly contact the skin and increase heat flow. These thermal resistances are shown in Fig. 2, as calculated using the material properties in Table I. The thermal resistances of the ceramic-filled

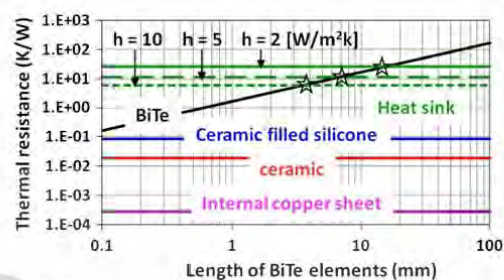


Fig. 2. Thermal resistances of heat sinks for three different convection coefficients, TIM, ceramic plates, copper sheets, and Bi_2Te_3 TE elements as a function of length.

Table I. Material properties used in the thermal resistance calculations and the simulations

	Thermal Conductivity (W/mK)	Specific Heat Capacity (J/kg K)	Density (kg/cm^3)
Copper	350	385	8920
TIM	2.3	1714	2530
Ceramic	35	880	3698
Bi_2Te_3	1.6	154.4	7740

silicone, copper sheet, and ceramic plates are negligible compared with those of the heat sink and TEG. The power output (P) from the TEG can then be estimated as

$$P = \left(\frac{\Delta T \times R_{\text{th,TEG}} \times S}{R_{\text{th,TEG}} + R_{\text{th,heat sink}}} \right)^2 \frac{R_{\text{el,load}}}{(R_{\text{el,heat sink}} + R_{\text{el,load}})^2},$$

where ΔT is the temperature difference between the body and ambient, S is the Seebeck coefficient, R_{el} is the electrical resistance, and R_{th} is the thermal resistance. Thermal contact resistance will be addressed later in this section.

Depending on the heat transfer coefficients, the power output can be maximized by varying the thickness of the Bi_2Te_3 elements. The model assumes thermal conductivity of 1.6 W/mK , Seebeck coefficient of $200 \mu\text{V/K}$, and electrical conductivity of $110,000 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$. The maximum (marked with a star) is achieved when the thermal resistance of the TEGs matches that of the heat sinks, as shown in Fig. 3; that is, the temperature drop across the generator should be approximately half the total temperature drop for the entire system. This may seem counterintuitive, since one normally tries to minimize the temperature gradient across the heat sink. After choosing the best heat sink with the best heat transfer coefficient h , one needs to scale the thickness of the TEG accordingly to maximize the generated power. The optimal thickness then

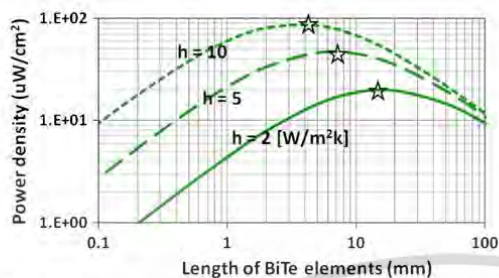


Fig. 3. Power density output assuming 10°C difference between the body and ambient as a function of the length of the Bi₂Te₃ TE elements for three convection coefficients of the heat sink.

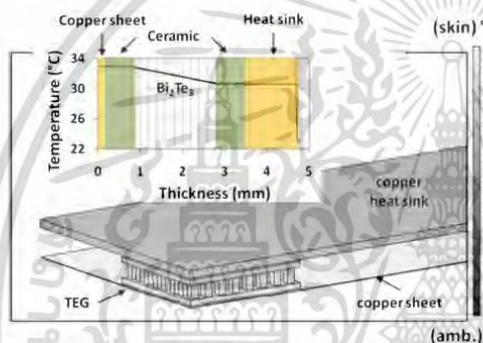


Fig. 4. Temperature distribution of the TEG system.

depends not only on the TE material parameters but also on the quality of the heat sink. A similar idea has been illustrated in Ref. 9. The number of thermocouples is chosen to match the thermal resistance of the heat sink and therefore achieve the maximum power output from the TEG. Further increases in the number of thermocouples do not increase the voltage due to the continued decrease in the TEG thermal resistance and resulting decrease in the temperature gradient across it. Optimal thermal impedance matching in the heat-sink-limited regime is also demonstrated in Refs. 10 and 11.

Aside from thermal resistance matching to maximize power output, we utilize 2-D heat spreading and create groove patterns to increase the surface area to improve the quality of the heat sink without increasing the thickness. Finite-element simulations were used to study the temperature distributions across three types of wristband heat sink, with flat, grooved, and checkerboard patterns. A constant skin temperature of 33°C was applied to the bottom of the copper sheet while the ambient temperature stayed at 23°C. Natural air convection ($h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$) was applied on the top of the copper heat sink.

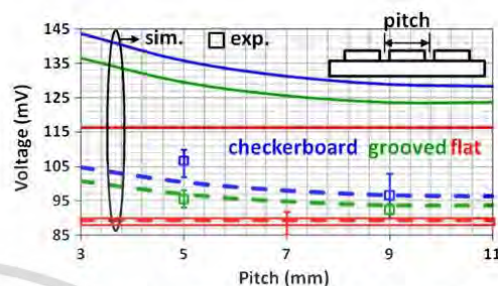


Fig. 5. Open-circuit voltage (solid: without thermal contact resistance; dashed: with thermal contact resistance of 2 K/W) as a function of groove pitch for three types of heat sink.

The TEG has the maximal temperature gradient and therefore maximal voltage immediately after contacting the skin. The body gradually heats up the TEG as well as the heat sink until the system reaches a steady state. As shown in Fig. 4, less than half of the temperature drop is within the TEG, indicating the limitation of the heat sink performance due to the low convection coefficient.

To further improve the performance of the heat sink, we created patterns on the copper plate. The output voltage as a function of groove pitch is shown in Fig. 5 (solid line). It is the product of the temperature difference across the TEG from the simulations and the Seebeck coefficient. Smaller pitches and the checkerboard pattern have larger surface areas and better heat dissipation, thereby producing higher voltage. The calculation here assumes negligible thermal contact resistance (ideal case), since precise estimation of thermal contact resistance is difficult. A reduction of the open-circuit voltage (dashed line) is expected with the present thermal contact resistance, which yields a small temperature gradient across the module. The metal-ceramic thermal contact resistance was experimentally determined to be approximately $20 \text{ cm}^2 \text{ K/W}$. Comparison between the model with thermal contact resistance and experimental data is discussed in a later section.

FABRICATION

The prototypes in Fig. 1 were fabricated using a 1-mm copper plate with standardized dimensions of $29.2 \text{ cm} \times 6.4 \text{ cm}$. Grooves were created using a 0.5-mm-end mill bit to produce grooves with depth of 0.5 mm. Here we consider pitches of 5 mm and 9 mm. Structural instability led to a maximum groove thickness of 5 mm. Upon passing this thickness, the copper plates would frequently break when shaped using a roller. Thermal insulation (felt) was placed in the concave area of the wristband after rolling. The TEG was placed into a slot in the insulation, where the TEG has complete contact with the cold-side copper plate. It generates 50 mV for every degree of temperature across the module

itself. Lastly, an intermediate copper sheet is attached to the hot side of the TEG using the TIM, which produces greater contact between the arm and the TEG.

EXPERIMENTS AND RESULTS

Tests comparing the flat, grooved, and checkerboard wearable heat sinks were performed in an environment with constant ambient temperature and minimal air flow for natural convection. The estimated heat transfer coefficient was $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. In all tests, the heat sinks were placed on the upper forearm and the open-circuit voltage was recorded using a voltage logger (T and D VR-71) with resolution of 1 mV. Figure 6a shows plots characterizing the TEG open-circuit voltages across the hot and cold sources as a function of time for the various groove patterned heat sinks. Each heat sink was worn for 8 min under identical conditions until it reached a steady-state voltage.

For the first 10 s, the open-circuit voltage went up quickly and then started to decrease because the arm heats up the TEG and then the heat sink. Therefore, the voltage across the TEG drops until reaching a steady state. The checkerboard heat sink had the smallest heat capacity as well as the lowest thermal impedance. This results in a low thermal time constant and therefore a fast response time; that is, the voltage output for this case is more sensitive to the heat source. It goes up quickly to a

maximum and then drops quickly to its steady state. The checkerboard heat sink, with the highest surface area, produced a 108 mV voltage for a 2.16 K temperature difference. The grooved and flat heat sinks produced 94 mV voltage for a 1.88 K difference and 85 mV voltage for a $\sim 1.7 \text{ K}$ difference, respectively.

The optimum power output from the TEG for the three types of heat sinks is plotted in Fig. 6b. Load matching occurs for a 10Ω resistance connected to the output of the TEG; the voltage across the resistor was recorded and used to calculate the power output. The results show that the checkerboard heat sink provided $28.5 \mu\text{W/cm}^2$ ($285 \mu\text{W}$) power output while the grooved and flat heat sinks provided 21.6 ($216 \mu\text{W}$) and $17.6 \mu\text{W/cm}^2$ ($176 \mu\text{W}$), respectively.

A 75-min field test of the checkerboard heat sink was also performed. The TEG and checkerboard heat sink system were connected to the low-power input of a DC/DC converter (Enocean ECT100).¹² The DC/DC converter converts a source of DC energy from one voltage level to another, wasting as little as possible in the process. It contains a switch, diode, inductor, and capacitor. The entire system was worn under varying environmental conditions for 75 min. Figure 7a plots the input voltage of the DC/DC converter from the TEG and the temperature difference across the generator. The DC/DC converter open-circuit output voltage is shown in

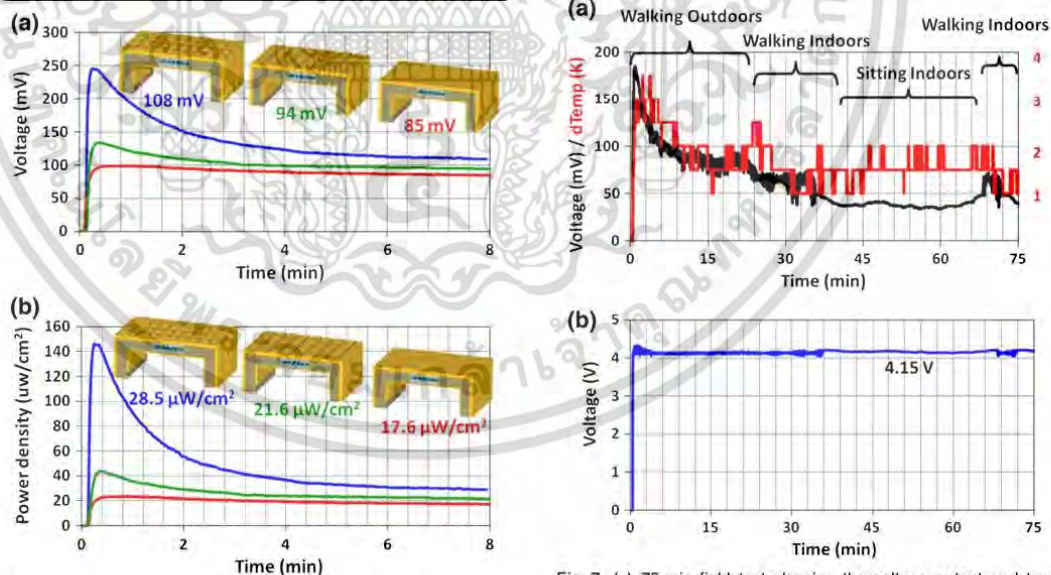


Fig. 6. (a) Measured open-circuit voltage and (b) power density as a function of time for three types of heat sink: checkerboard, grooved, and flat.

Fig. 7. (a) 75-min field test showing the voltage output and temperature difference across the TEG, which fluctuates with voltage as expected, and (b) the voltage output of the DC/DC converter during the field test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 7b. During the 75-min test, with varying input voltages ranging from 40 mV to 180 mV, the DC/DC converter produced a consistent output voltage of 4.15 V, at 30% power efficiency.

DISCUSSION

Comparison between the experimental data and model is shown in Fig. 5. The checkerboard heat sink exhibited the best heat sink performance and generated the highest voltage and power. The denser the pitch, the higher the output voltage obtained. However, the voltage was lower than expected due to the thermal interface between copper and ceramic. The generator performance is known to depend strongly on the thermal resistance of interfaces, which is sensitive to the wristband bending to conform to the arm, deteriorating the contact between the heat sink and cold side of the module. A small air gap has been observed due to the stress created by bending. Precise estimation of thermal contact resistance is difficult, and the metal-ceramic interface was considered in the simulations (dashed lines) and validated experimentally to be about $20 \text{ cm}^2 \text{ K/W}$. Thermal interface resistance can potentially be reduced by applying thermally conductive epoxy to secure the contact. Preliminary results with silver epoxy showed a 10% power enhancement. The checkerboard heat sink with silver epoxy provided $33.0 \mu\text{W/cm}^2$ ($330 \mu\text{W}$) power output while that with ceramic-filled silicone provided $28.5 \mu\text{W/cm}^2$ ($285 \mu\text{W}$) power output. However, this is an irreversible bond. Besides, realization of thermal impedance matching can be accomplished by increasing the thickness of the Bi_2Te_3 TE elements by a factor of four or reducing the thermal resistance of the heat sink by introducing forced convection.

As shown in Fig. 7a, walking increases the heat transfer coefficient by increasing convective effects. This reduces the thermal resistance of the heat sink and therefore increases the temperature gradient across the TEG. Compared with the idle condition (sitting indoors), there is less temperature variation but the voltage output is relatively lower. This further demonstrates that the quality of the heat sink is determined by the heat transfer coefficient and can be improved by human motion.

CONCLUSIONS

We introduce a low-profile wearable wristband heat sink which utilizes 2-D heat spreading rather than extending out above the hot source (skin). The heat sink is comfortable to wear and utilizes natural convection in cooling the cold side while maintaining a maximum thickness of 5 mm. The large available surface area enabled the design of flat, grooved, and checkerboard patterns on the copper plate, which showed steady-state open-circuit voltage of 85 mV, 94 mV, and 108 mV and power output of $17.6 \mu\text{W/cm}^2$, $21.6 \mu\text{W/cm}^2$, and $28.5 \mu\text{W/cm}^2$, respectively.

ACKNOWLEDGEMENTS

Support for this work is provided by MIT Undergraduate Research Opportunity Program (UROP) and the Office of Naval Research.

REFERENCES

1. V. Leonov and R. Vullers, *J. Electron. Mater.* 38, 7 (2009).
2. M. Kishi, H. Nemoto, T. Hamao, M. Yamamoto, S. Sudou, M. Mandai, and S. Yamamoto, *Proceedings of International Conference on Thermoelectrics* (Baltimore, USA, 1999), pp. 301–307.
3. V. Leonov, P. Fiorini, S. Sedky, T. Torfs, and C. Van Hoof, *Proceedings of 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Vol. 1 (Seoul, Korea, 2005), pp. 291–294.
4. B. Gyselinckx, C. Van Hoof, J. Ryckaert, R. Yazicioglu, P. Fiorini, and V. Leonov, *Proceedings of the Custom Integrated Circuit Conference* (San Jose, CA, 2005), pp. 13–19.
5. V. Leonov, T. Torfs, N. Kukhar, C. Van Hoof, and R. Vullers, *Proceedings of 5th European Conference on Thermoelectrics* (Odessa, Ukraine, 2007), pp. 76–79.
6. T. Torfs, V. Leonov, C. Van Hoof, and B. Gyselinckx, *Proceedings of IEEE International Conference on Sensors* (Daegu, Korea, 2006), p. 122.
7. T. Torfs, V. Leonov, and R. Vullers, *Sensors Transducers J.* 80, 1230 (2007).
8. V. Leonov and R. Vullers, *J. Renew. Sustain. Energy* 1, 062701 (2009).
9. P. Mayer and R. Ram, *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* 10, 143 (2006).
10. J. Bierschenk, *Appl. Ferroelectr.* 17, 1 (2008).
11. V. Leonov, and P. Fiorini, *Proceedings of 5th European Conference on Thermoelectrics* (Odessa, Ukraine, 2007), pp. 129–133.
12. L. Mateu, M. Pollak, and P. Spies, *Proceedings of 1st Annual nanoPower Forum* (San José, CA, 2007).

Article

Optimizing Waste Heat Conversion: Integrating Phase-Change Material Heatsinks and Wind Speed Dynamics to Enhance Flexible Thermoelectric Generator Efficiency

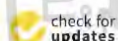
Phanathagorn Egypt¹, Rachsak Sakdanuphab^{2,3}, Aparporn Sakulalavek^{1,3}, Bhanupol Klongratog^{1,3,*} and Nuttakrit Somdock¹

¹ Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; 64605082@kmitl.ac.th (P.E.); aparporn.sa@kmitl.ac.th (A.S.); nuttakrit.so@kmitl.ac.th (N.S.)

² College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; rachsak.sa@kmitl.ac.th

³ Electronic and Optoelectronic Device Research Unit, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

* Correspondence: bhanupol.kl@kmitl.ac.th



Citation: Egypt, P.; Sakdanuphab, R.; Sakulalavek, A.; Klongratog, B.; Somdock, N. Optimizing Waste Heat Conversion: Integrating Phase-Change Material Heatsinks and Wind Speed Dynamics to Enhance Flexible Thermoelectric Generator Efficiency. *Materials* **2024**, *17*, 420. <https://doi.org/10.3390/ma17020420>

Academic Editor: Chun-I Wu

Received: 20 December 2023

Revised: 6 January 2024

Accepted: 8 January 2024

Published: 14 January 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Flexible thermoelectric generators (FTEGs) have garnered significant attention for their potential in harnessing waste heat energy from various sources. To optimize their efficiency, FTEGs require efficient and adaptable heatsinks. In this study, we propose a cost-effective solution by integrating phase-change materials into FTEG heatsinks. We developed and tested three flexible phase-change material thicknesses (4 mm, 7 mm, and 10 mm), focusing on preventing leaks during operation. Additionally, we investigated the impact of wind speed on the output performance of FTEGs with a flexible phase-change material heatsink. The results indicate that the appropriate flexible phase-change material thickness, when integrated with considerations for wind speed, demonstrates remarkable heat-absorbing capabilities at phase-change temperatures. This integration enables substantial temperature differentials across the FTEG modules. Specifically, the FTEG equipped with a 10 mm thick flexible phase-change material heatsink achieved a power density more than four times higher when the wind speed was at 1 m/s compared to no wind speed. This outcome suggests that integrating phase-change material heatsinks with relatively low wind speeds can significantly enhance flexible thermoelectric generator efficiency. Finally, we present a practical application wherein the FTEG, integrated with the flexible phase-change material heatsink, efficiently converts waste heat from a circular hot pipe into electricity, serving as a viable power source for smartphone devices. This work opens exciting possibilities for the future integration of flexible thermoelectric modules with flexible phase-change material heatsinks, offering a promising avenue for converting thermal waste heat into usable electricity.

Keywords: flexible thermoelectric generators; phase-change materials; waste heat conversion; power density; energy harvesting

1. Introduction

Low-level heat, typically below 100 °C, represents a plentiful yet frequently squandered energy resource [1–3]. A significant portion of the energy used in worldwide industrial production, approximately 72%, is wasted in the form of low-grade heat [1,4]. Notably, the natural sources of low-grade heat, such as geothermal activity and solar radiation, surpass even the total annual energy consumption [5–7]. Therefore, capturing and utilizing this immense amount of energy offers great potential for creating a more sustainable society [8]. Thermoelectric generators (TEGs) have demonstrated the ability to directly convert heat into electricity via temperature differences [9,10]. In recent years, multiple methods

have been explored to develop flexible thermoelectric generators (FTEGs) [2,5–8,11,12]. These FTEGs exhibit great potential due to their impressive thermoelectric capabilities and flexibility, making them ideal for harnessing wasted heat from various sources, even those with curved or uneven surfaces [12–14]. In recent studies conducted by Kim et al. [15] and subsequent research [16–18], FTEGs with exceptional performance have been developed. However, the power output relies not solely on the efficiency of FTEGs, but also on an effective heatsink system. Conventional metal heatsinks are unsuitable for use with FTEGs due to their inflexibility and bulky nature. Finding a suitable heatsink that offers both high cooling performance and flexibility is a challenging task.

In recent developments, innovative flexible heatsinks have emerged as solutions to address these issues. These heatsinks utilize materials such as Super Absorbent Polymer (SAP) [19] and a combination of solid-state silica gel with hydrogel [20,21]. They harness heat from water evaporation and its sensible heat, delivering impressive cooling performance, excellent portability, and extended operational durations. However, it is important to note that these flexible heatsinks require periodic water replenishment to achieve semi-permanent functionality and cannot operate autonomously [22].

Hence, a flexible heatsink structure based on a phase-change material (PCM) has been discussed in recent studies. PCM can absorb or release a substantial amount of heat, known as latent heat, during its phase transition [22,23]. Nevertheless, the primary concern when employing PCM lies in the possibility of melting and leakage when exposed to certain low-level heat sources with temperatures ranging from 60 to 100 °C. Additionally, natural wind convection is a suitable option to combine with a flexible phase-change material heatsink because wind energy arises in real-world situations due to differences in the atmospheric pressure, and it can operate autonomously.

This study introduces a flexible heatsink design, incorporating a phase-change material (RT42), aimed at preventing leaks during operation. Three thicknesses (4 mm, 7 mm, and 10 mm) of flexible phase-change material were developed and employed to regulate the heat dissipation of the FTEG. In this work, flexible phase-change material heatsinks with a maximum thickness of 10 mm were fabricated. Thicknesses exceeding 10 mm were not produced due to their inability to bend. In addition, the effect of wind speed on the output performance of the FTEG with a flexible phase-change material heatsink was investigated. Finally, a practical application employing the fabricated FTEG has been successfully conducted, converting the heat from a hot pipe into electricity and demonstrating its potential as an electrical power source for a smartphone device.

2. Experimental Section

2.1. Flexible Thermoelectric Design and Fabrication

A flexible thermoelectric generator (FTEG) module measuring $3.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$ was created. This module was constructed using p-type and n-type thermoelectric legs made of bismuth telluride materials provided by a commercial supplier (Wuhan Xinrong New Materials Co., Ltd., Wuhan, China). The legs were small, measuring $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$, and had Ni ($4 \mu\text{m}$) (Siam Jin Charoen Enterprise Co., Ltd., Samut Prakan, Thailand) contacts as transition layers on both sides. They were arranged in an 8×8 array with a 2 mm gap between them, resulting in 64 pairs of p-type and n-type elements. To enhance insulation and flexibility, the legs were enclosed in silicone rubber (Fantastic Triumph Co., Ltd., Bangkok, Thailand). An automated dispensing machine placed a dot of $\text{Sn}_{0.955}\text{Ag}_{0.038}\text{Cu}_{0.007}$ solder paste (Chip Quik, NY, USA), with a diameter of 0.3 mm, onto the patterned electrodes. A copper electrode with a thickness of 0.1 mm was used to connect the p-type and n-type thermoelectric elements. The fabrication process is illustrated in Figure 1.

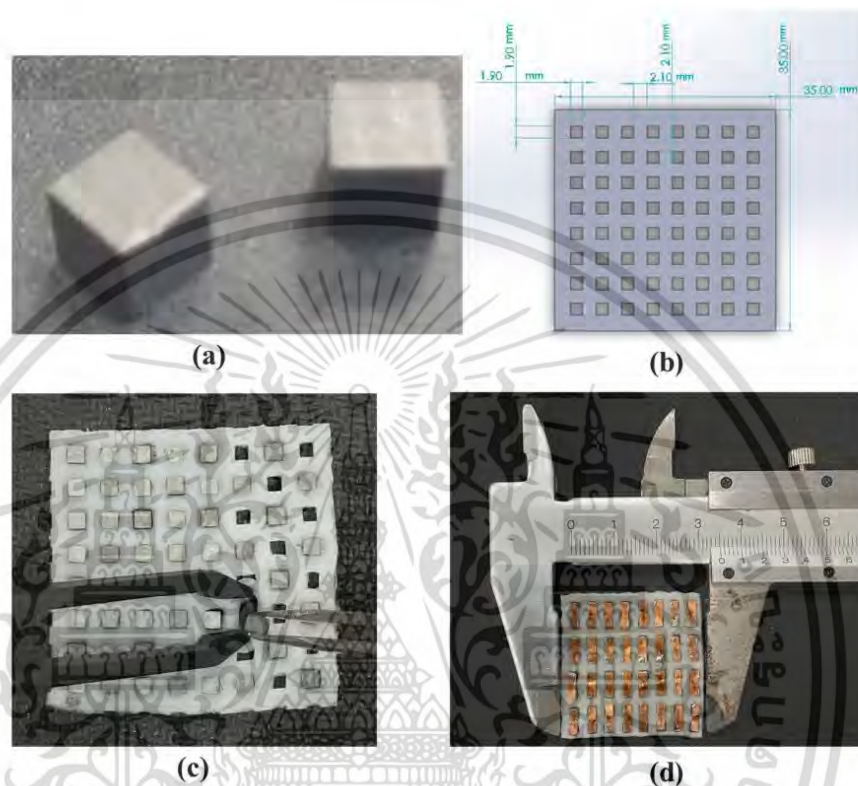


Figure 1. Flexible thermoelectric module manufacturing process. (a) Thermoelectric components sized at $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. (b) A silicone rubber sheet template with 8 rows and 8 columns; each hole measures $1.9 \times 1.9 \text{ mm}^2$, with the thermoelectric material evenly spaced at 2 mm intervals. (c) Embedding the thermoelectric components within the patterned silicone rubber. (d) Prototype of a $3.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$ flexible thermoelectric module.

2.2. Flexible Heatsink Fabrication

We developed and constructed a flexible phase-change material heatsink to enhance the power generation performance of FTEGs while ensuring leak prevention during operation. The detailed process is illustrated in Figure 2, and a flexible phase-change material heatsink fabrication process is outlined below.

First, we designed a silicone mold using SolidWorks software 2021, which consists of two parts: the structural frame and the top cover (Figure 2a). The structural frame measures $50 \times 50 \text{ mm}^2$ and is divided into nine equal compartments, each measuring $15.3 \times 15.3 \text{ mm}^2$ with 1 mm spacing between them. Each of the nine inner compartments has a 1 mm depth from the outer edges. Next, we 3D-printed the silicone mold, creating three different thicknesses: 4 mm, 7 mm, and 10 mm (Figure 2b). Then, we mixed liquid silicone (Fantastic Triumph Co., Ltd., Bangkok, Thailand) and a catalyst (Fantastic Triumph Co., Ltd., Bangkok, Thailand) at a ratio of 25 g of silicone to 6 drops of catalyst. This mixture was poured into the mold, and the silicone was left to solidify for approximately 2 days (Figure 2c). Once the silicone had hardened, we removed it from the mold (Figure 2d), obtaining both the frame and top cover for the flexible heat dissipation unit (Figure 2e).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The RT42 (Rubitherm®Technologies GmbH, Berlin, Germany) was selected for this work because it is low-cost and safe to use. The thermophysical properties of RT42 are shown in Table 1.

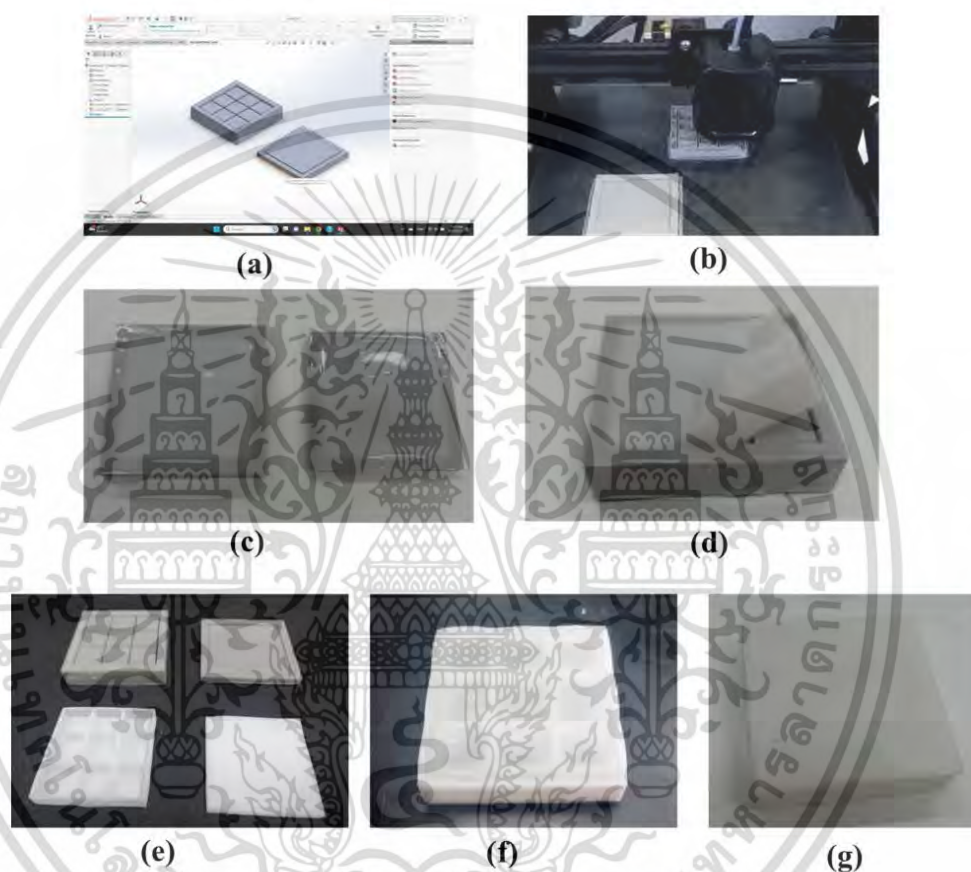


Figure 2. Manufacturing process of flexible phase-change material for heatsink application.

Table 1. Thermophysical properties of RT42 [24].

Properties	Unit	RT42
Solidus temperature	°C	38
Liquidus temperature	°C	42
Solid density	kg/m ³	880
Liquid density	kg/m ³	760
Specific heat	J/(kg·K)	2000
Latent heat	J/kg	165,000
Thermal expansion coefficient	1/K	0.0001
Thermal conductivity	W/(m·K)	0.2

The phase-change material RT42 was heated at 100 °C for 30 min and poured into the frame. Afterward, we waited for approximately 30 min for the phase-change material to solidify once again (Figure 2f). We then placed the top cover on top and connected both

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

components, sealing around the top cover using liquid silicone (Figure 2g). Finally, we attached the heatsink to the flexible thermoelectric module.

2.3. Output Power Measurement Setup

Figure 3 shows a diagram illustrating the setup used to evaluate the performance of the flexible thermoelectric generator (FTEG) experimentally. The FTEG, which had different thicknesses of a flexible heatsink, was placed on a circular hot pipe. To enhance thermal conductivity, fill air gaps, eliminate thermal interface resistance, improve heat transfer, and compensate for surface imperfections, the flexible thermoelectric device and heatsink were joined together using heat-conducting silicone grease. The temperature of the hot pipe was carefully regulated at 80 °C. During the heating process, the open-circuit voltage (V_{oc}) was measured, along with the temperatures on the hot side and cold side of the FTEG. The temperatures of the hot and cold sides were monitored using a K-type thermocouple, and the temperature data were recorded using a National Instruments NI cDAQ-9174 (National Instruments Corporation, Austin, TX, USA) data logger to capture the temperature behavior. Moreover, a fan, controlled by a DC (direct current) power supply, facilitated airflow at particular wind speeds. The wind speed was contingent on the governor current and was measured using an anemometer. The open-circuit voltage (V_{oc}) was measured using an RS pro 3055A digital multimeter (RS Group Plc., London, England, UK). The output power was estimated according to Equation (1)

$$P = \frac{V_{oc}^2}{4R_{out}} \quad (1)$$

where R_{out} is the matching load resistance of the FTEG.

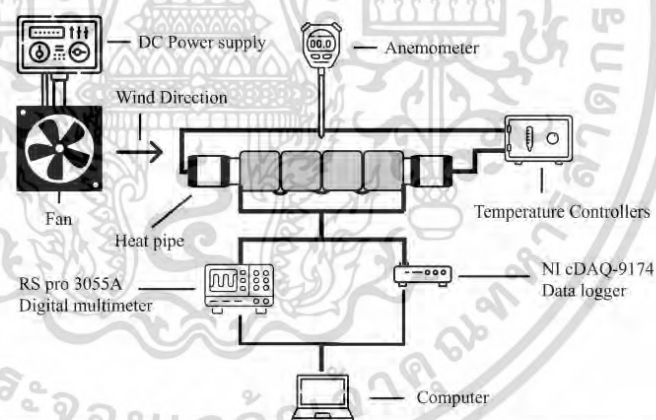


Figure 3. Schematic of the experimental setup for evaluating flexible thermoelectric generator performance.

3. Results and Discussion

3.1. Flexible Thermoelectric Module

The dimensions of the flexible thermoelectric module were measured using a vernier caliper, as depicted in Figure 4. To determine the electrical resistance of the flexible thermoelectric module, we employed a digital multimeter. The electrical resistance was measured three times, and the average electrical resistance was calculated. Table 2 displays the electrical resistance values for the flexible thermoelectric module. The average electrical resistance for the $3.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$ flexible thermoelectric module prototype obtained in this

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

study was approximately 0.6 to 0.7 Ω . It is evident that the electrical resistance of each module is similar, indicating the consistency of the manufacturing process.

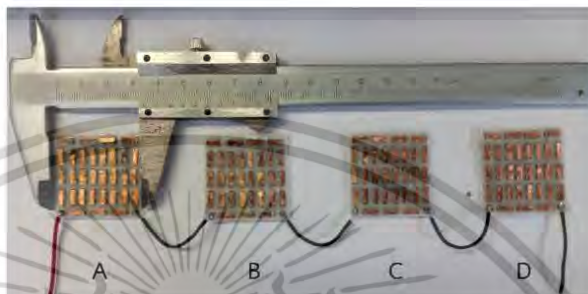


Figure 4. Four prototype flexible thermoelectric modules, each measuring $3.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$. (A–D) refer to the 1st, 2nd, 3rd and 4th flexible thermoelectric modules.

Table 2. The resistance and average resistance of the four prototype flexible thermoelectric modules.

Flexible Thermoelectric	Resistance (Ω)				S.D
	R_1	R_2	R_3	R_{average}	
A	0.60	0.70	0.70	0.67	0.06
B	0.60	0.70	0.60	0.63	0.06
C	0.70	0.70	0.80	0.73	0.06
D	0.80	0.60	0.70	0.70	0.10

3.2. Experimental Results of FTTEG Integrated with Flexible Heatsink

To evaluate the efficacy of the phase-change material container in preventing leaks, the flexible phase-change material heatsink was placed on a hotplate, and its temperature was monitored using an IR (infrared) camera, as depicted in Figure 5. The hotplate's temperature was precisely regulated at 80 °C. The operation was tested three times, revealing no instances of phase-change material leaks during the process. These results indicate the successful design and fabrication of the leak prevention container for the phase-change material during operation.



Figure 5. Experimental setup for monitoring phase change material leaks during operation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

To attain optimal performance from the FTEG and ensure an extended operational period, the heatsink must not only be flexible but also possess substantial heat capacity simultaneously. The total latent heat plays a crucial role in determining the retention time of the flexible phase-change material heatsinks; hence, increasing the quantity of PCM is necessary to prolong this retention period. To investigate this, we fabricated three heatsinks with varying amounts of PCM, each with heights of 4 mm, 7 mm, and 10 mm, respectively. The wind speed was set at 2 m/s, and in the experimental setup, K-type thermocouples were used to measure the temperatures on the hot side and cold side of FTEG. The temperatures of the hot side and the environment were kept steady at 80 °C and 25 °C, respectively. The temperature difference across the FTEG is depicted in Figure 6.

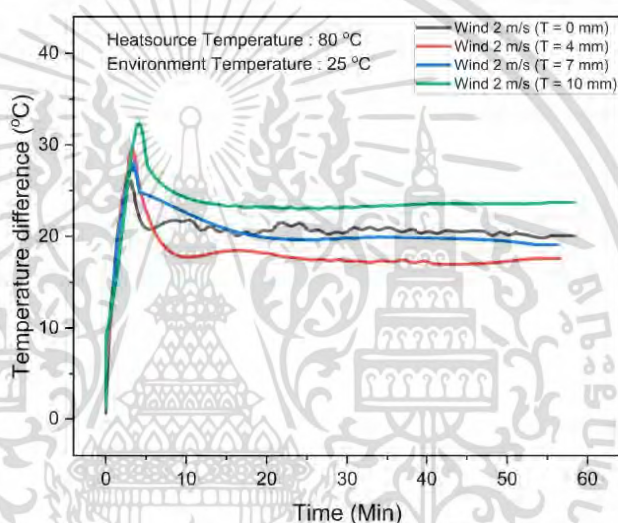


Figure 6. Temperature differences as functions of operating time for flexible thermoelectric generators, comparing those with and without flexible phase-change material heatsinks at a wind speed of 2 m/s.

With the flexible phase-change material system installed alongside the FTEG, the temperature difference increases over time, peaking at approximately 5 min. Subsequently, the temperature difference gradually decreases. Integrating the FTEG with flexible phase-change material heatsinks at heights of 4 mm, 7 mm, and 10 mm resulted in maximum temperature differences of 27 °C, 28 °C, and 32 °C, respectively. In contrast, the FTEG without flexible phase-change material heatsinks reaches a maximum temperature difference of approximately 25 °C within the initial 5 min timeframe. After 5 min, the temperature differences in all cases decrease until reaching stability at 10 min. Notably, after this point, the temperature difference in the FTEG without flexible phase-change material heatsinks exceeded that of the FTEGs with 4 mm and 7 mm thicknesses of flexible phase-change material heatsinks. These findings suggest that integrating relatively low thickness of flexible phase-change material heatsinks with the FTEG enhances the temperature difference between its hot and cold sides within a specific time frame, leveraging the latent heat properties of the phase-change material. As the phase-change material absorbs more heat and reaches its melting point, the installed flexible phase-change material heatsinks impede the cooling of the FTEG on the cold side, subsequently reducing the temperature difference. In contrast, the FTEGs equipped with 10 mm thicknesses of flexible phase-change material heatsinks consistently maintained a higher temperature difference than those without flexible phase-change material heatsinks. These outcomes illustrate that the appropriate

thickness of flexible phase-change material heatsinks, when coupled with wind speed considerations, has the potential to enhance the temperature difference in the FTEG.

When designing flexible phase-change material heatsinks, considering both melting and solidification behaviors becomes crucial. In passive PCM heatsinks, solidification often takes longer, posing challenges in handling [23]. Hence, ensuring adequate thickness and proper cooling for the flexible phase-change material heatsinks becomes essential to facilitate PCM solidification within a specified timeframe. However, a noticeable gap exists in the literature regarding the comprehension of flexible phase-change material heatsinks and the influence of wind speed convection during melting and solidification. This work addresses this gap by presenting a schematic model (Figure 7) that elucidates the effects of wind speed convection and PCM thickness throughout the melting and solidification processes.

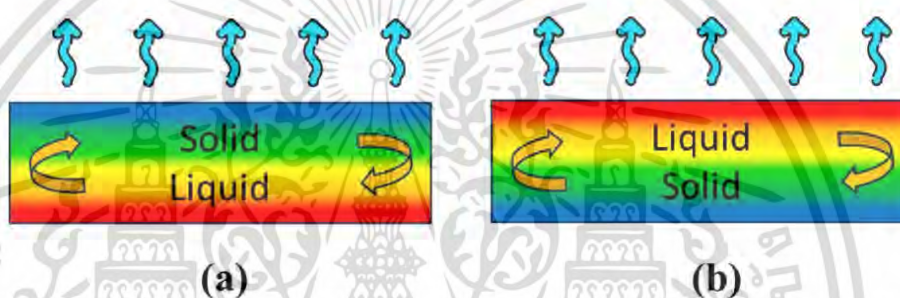


Figure 7. Illustrates the schematic model depicting the mechanism inside the phase change material when it absorbs heat from the FTEG. The arrows indicate phase transformation i.e. liquid to solid and solid to liquid.

To comprehend the heat dynamics within flexible phase-change material heatsinks, consider a scenario where both the temperature difference and maximum melting time increase with higher flexible phase-change material heatsink thicknesses. Once all phase changes have melted, heat convection occurs between the top area of the phase change material and the environment due to the applied wind speed. Consequently, this causes a decrease in the temperature of the top area of the phase change material, leading it to transform into the solid phase (Figure 7a). Subsequently, the high temperature of the liquid phase-change material at the bottom area moves towards the top area, while the solid phase-change material moves to the bottom area. As a result, the solid phase-change material absorbs heat from the flexible thermoelectric module, leading to an increased temperature difference (Figure 7b).

The open-circuit voltage (V_{oc}) data for the flexible thermoelectric system, both with and without flexible phase-change material heatsinks, are presented in Figure 8a. After 10 min, the FTEG integrated with flexible phase-change material heatsinks at a height of 10 mm exhibited an open-circuit voltage of 0.65 V, surpassing that of the FTEG without flexible phase-change material heatsinks. In contrast, the maximum open-circuit voltage observed for FTEGs with flexible phase-change material heatsinks at heights of 4 mm and 7 mm was lower than that of the FTEG without flexible phase-change material heatsinks. The relationships between power density and temperature difference are illustrated in Figure 8b. After 10 min, the FTEG equipped with a flexible phase-change material heatsink at a height of 10 mm achieved the highest power density, reaching $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. These experimental results underscore the critical need for a flexible and bendable heat dissipation system when integrated with the FTEG to generate adequate electrical power for practical applications, such as powering small electronic devices.

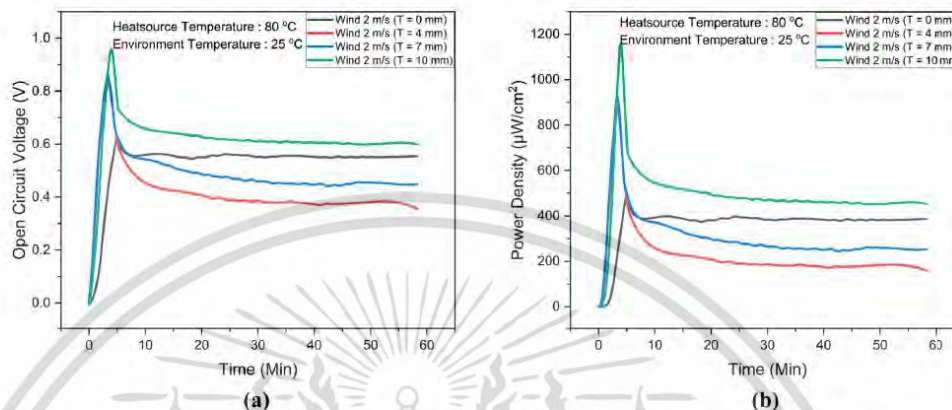


Figure 8. (a) Open-circuit voltage (V_{oc}) and (b) power density data for the flexible thermoelectric system with and without flexible phase-change material heatsinks at a wind speed of 2 m/s, as a function of operating time.

To investigate the influence of wind speed on the temperature difference and power density output of the FTEG integrated with a flexible phase-change material heatsink, wind speeds of 0, 1, 2, and 3 m/s were generated. The ambient temperature (25 °C) was controlled using an air conditioner. A flexible phase-change material heatsink with a thickness of 10 mm was integrated with the FTEG. The temperature difference and power density data are presented in Figure 9.

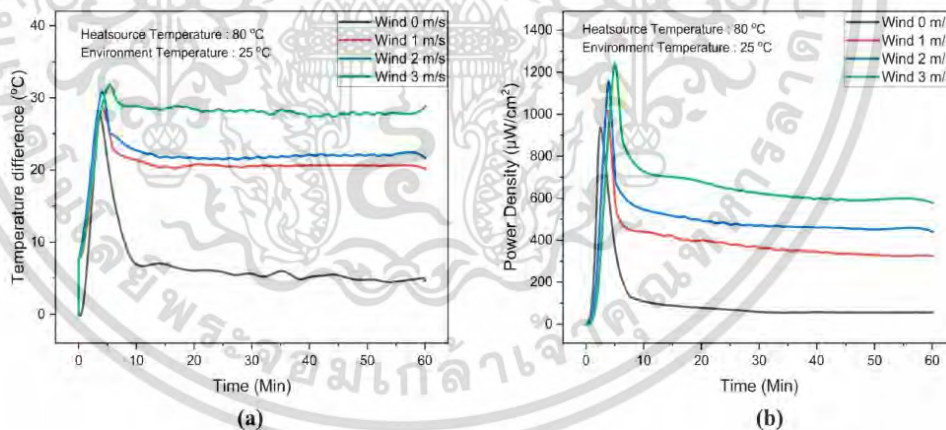


Figure 9. (a) Temperature differences and (b) power density data for the flexible thermoelectric integrated with flexible phase-change material heatsinks, comparing a 10 mm thickness with and without wind speed, across different operating times.

Figure 9a presents the temperature difference across the FTEG at various wind speeds. The temperature difference increases with higher wind speeds. The average temperature differences were 5 °C, 20 °C, 21 °C, and 30 °C corresponding to wind speeds of 0 m/s, 1 m/s, 2 m/s, and 3 m/s, respectively. Furthermore, the temperature difference across the FTEG remains almost stable at a wind speed of 3 m/s. The power density is shown in Figure 9b: a power density of 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ is obtained when the FTEG is integrated with

a flexible phase-change material heatsink without any applied wind in the system. It is noticeable that the power density achieved is more than four times higher when the wind speed is at 1 m/s compared to no wind speed. This result indicates that integrating phase-change material heatsinks and relatively low wind speeds can significantly enhance flexible thermoelectric generator efficiency. In addition, the FTEG equipped with a 10 mm thick flexible phase-change material heatsink, combined with a 3 m/s wind speed, achieved the highest power density, reaching $1250 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Moreover, this integrated system sustained a power output exceeding $625 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ for 60 min.

Table 3 presents the performance of FTEG in previous studies and this study. Our developed FTEG, alongside flexible phase-change material heatsinks with and without wind speed, exhibits higher output power and greater power density than in recent publications [14,16–18,24]. In our understanding, this figure is notably elevated when contrasted with other documented FTEG measurements, showcasing the efficacy of our design and the prospective usefulness of the FTEG.

Table 3. Comparison of FTEG performance.

Heat Sink	Wind Speed (m/s)	Power Density ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Reference
Copper electrodes	2	48	[14]
Copper foam	-	15	[16]
Assembled copper foam onto PDMS film	-	16	[17]
Assembled copper foam onto PDMS film	0.8	98	[17]
Phase-change material ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	-	35	[25]
Phase-change inorganics ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	1.5	50	[25]
Heteromorphic copper electrode	-	21	[18]
Heteromorphic copper electrode	2.1	116	[18]
Phase-change material (RT42)	-	100	This work
Phase-change material (RT42)	1	400	This work
Phase-change material (RT42)	3	625	This work

3.3. Application Demonstrations

To demonstrate the potential of the constructed FTEG integrated with the flexible phase-change material heatsink and relatively low wind speed for energy harvesting, an experimental setup was utilized, as depicted in Figure 10a. Four flexible thermoelectric modules were connected in a series, and they were covered with a graphite sheet. Thermal grease was used to reduce the thermal resistance at the contact points. The four flexible thermoelectric generators were affixed to the hot pipe, and the flexible heatsink was employed (Figure 10b). In this experiment, a wind speed of 1 m/s was used. The USB DC boost step-up module is connected to the smartphone, and the charging module, in turn, is connected to flexible thermoelectric generators. As the temperature difference across the FTEG materialized, electricity was generated at the output terminal of the FTEG. To elevate a low voltage to a higher level, a step-up DC-to-DC converter is commonly employed in low-voltage harvesting. This converter achieves a higher voltage by reducing the current, enabling power preservation and attainment of the desired voltage level. In this study, step-up DC-to-DC converters are utilized, given the low-power harvesting context. With the harvested low voltage, the goal is to power a mobile device. The smartphone charging was monitored using the Ampere application as presented in Figure 10c.

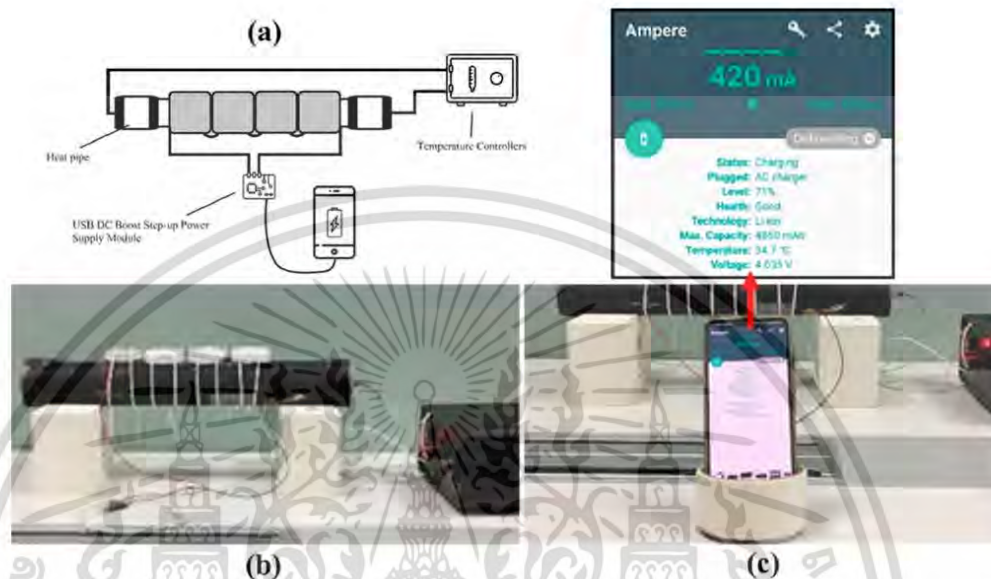


Figure 10. (a) The schematic of the smartphone charging demonstration setup, (b) four flexible thermoelectric generators were affixed to the hot pipe at a temperature setup of 80 °C, and (c) the smartphone was charged and monitored using the Ampere application.

4. Conclusions

This research introduces an innovative and groundbreaking concept for a flexible heatsink by integrating a phase-change material. Three different thicknesses (4 mm, 7 mm, and 10 mm) were created and used to regulate the heat dissipation of the flexible thermoelectric device. The design of the flexible phase-change material heatsink was specifically engineered to prevent leaks during operation. When the FTEG incorporated flexible phase-change material heatsinks at heights of 4 mm, 7 mm, and 10 mm, it exhibited peak temperature differences of 27 °C, 28 °C, and 32 °C, respectively. After 10 min of operation, the temperature difference in the FTEG without flexible phase-change material heatsinks surpassed that of the FTEGs with 4 mm and 7 mm thicknesses of flexible phase-change material heatsinks. Conversely, FTEGs equipped with 10 mm thicknesses of flexible phase-change material heatsinks consistently maintained higher temperature differences than those without flexible phase-change material heatsinks. Moreover, the FTEG equipped with a 10 mm thick flexible phase-change material heatsink, combined with relatively low wind speed, significantly enhanced the power density. Finally, we demonstrated a real-world application using the developed flexible thermoelectric generator combined with the FPCM heatsink, effectively converting excess heat from a circular hot pipe into electrical energy to power smartphones and similar devices.

Author Contributions: Conceptualization, N.S.; Methodology, P.E.; Validation, P.E.; Formal analysis, R.S.; Investigation, P.E.; Resources, R.S.; Data curation, R.S.; Writing—original draft, A.S., B.K. and N.S.; Writing—review & editing, B.K. and N.S.; Project administration, B.K.; Funding acquisition, A.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) and has received funding support from the NSRF (FRB660065/0258-RE-KRIS/FF66/54).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All data in this manuscript used to support the findings of this study are available from the corresponding author upon request.

Conflicts of Interest: The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- Forman, C.; Muritala, I.K.; Pardemann, R.; Meyer, B. Estimating the global waste heat potential. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *57*, 1568–1579. [CrossRef]
- Li, T.; Zhang, X.; Lacey, S.D.; Mi, R.; Zhao, X.; Jiang, F.; Song, J.; Liu, Z.; Chen, G.; Dai, J. Cellulose ionic conductors with high differential thermal voltage for low-grade heat harvesting. *Nat. Mater.* **2019**, *18*, 608–613. [CrossRef] [PubMed]
- Lee, S.W.; Yang, Y.; Lee, H.-W.; Ghasemi, H.; Kraemer, D.; Chen, G.; Cui, Y. An electro-chemical system for efficiently harvesting low-grade heat energy. *Nat. Commun.* **2014**, *5*, 3942. [CrossRef] [PubMed]
- Poletayev, A.D.; McKay, I.S.; Chueh, W.C.; Majumdar, A. Continuous electrochemical heat engines. *Energy Environ. Sci.* **2018**, *11*, 2964–2971. [CrossRef]
- Cao, T.; Shi, X.L.; Chen, Z.G. Advances in the design and assembly of flexible thermoelectric device. *Prog. Mater. Sci.* **2023**, *131*, 101003. [CrossRef]
- Toan, N.V.; Tuoi, T.T.K.; Sui, H.; Trung, N.H.; Samat, K.F.; Ono, T. Ultra-flexible thermoelectric generator sheet and electrodeposited thermoelectric material for waste heat harvesting. *Energy Rep.* **2022**, *8*, 5026–5037. [CrossRef]
- Gobpant, J.; Klongratog, B.; Rudradawong, C.; Sakdanuphab, R.; Junlabhut, P.; Nuthongkum, P.; Limsuwan, P.; Sakulkalavek, A. High-performance flexible thermoelectric generator based on silicone rubber and cover with graphite sheet. *Appl. Therm. Eng.* **2024**, *236*, 121656. [CrossRef]
- Shi, Y.; Wang, Y.; Mei, D.; Feng, B.; Chen, Z. Design and fabrication of wearable thermoelectric generator device for heat harvesting. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **2018**, *3*, 373–378. [CrossRef]
- Zhou, Z.; Huang, Y.; Wei, B.; Yang, Y.; Yu, D.; Zheng, Y.; He, D.; Zhang, W.; Zou, M.; Lan, J.-L.; et al. Compositing effects for high thermoelectric performance of Cu₂Se-based materials. *Nat. Commun.* **2023**, *14*, 2410. [CrossRef]
- Xie, L.; Yin, L.; Yu, Y.; Peng, G.; Song, S.; Ying, P.; Cai, S.; Sun, Y.; Shi, W.; Wu, H.; et al. Screening strategy for developing thermoelectric interface materials. *Science* **2023**, *382*, 921–928. [CrossRef]
- Lee, B.; Cho, H.; Park, K.T.; Kim, J.S.; Park, M.; Kim, H.; Hong, Y.; Chung, S. High-performance compliant thermoelectric generators with magnetically self-assembled soft heat conductors for self-powered wearable electronics. *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 5948. [CrossRef] [PubMed]
- Maksymuk, M.; Parashchuk, T.; Dzundza, B.; Nykyryu, L.; Chernyak, L.; Dashevsky, Z. Highly efficient bismuth telluride-based thermoelectric micro converter. *Mater. Today Energy* **2021**, *21*, 100753. [CrossRef]
- Mao, X.; Li, Z.; Liu, Y.; Nie, X.; Li, B.; Jiang, Q.; Gao, C.; Gao, Y.; Wang, L. Tuning the structure of borane-nitrogen derivatives towards high-performance carbon nanotubes-based n-type thermoelectric materials. *Chem. Eng. J.* **2021**, *405*, 126616. [CrossRef]
- Xu, Q.; Deng, B.; Zhang, L.; Lin, S.; Han, Z.; Zhou, Q.; Li, J.; Zhu, Y.; Jiang, F.; Li, Q.; et al. High-performance flexible thermoelectric generator based on bulk materials. *Cell Rep. Phys. Sci.* **2022**, *3*, 100780. [CrossRef]
- Kim, S.J.; We, J.H.; Cho, B.J. A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric. *Energy Environ. Sci.* **2014**, *7*, 1959–1965. [CrossRef]
- Jeong, M.H.; Kim, K.-C.; Kim, J.-S.; Choi, K.J. Operation of wearable thermoelectric generators using dual sources of heat and light. *Adv. Sci.* **2022**, *9*, 2104915. [CrossRef] [PubMed]
- Lv, J.-R.; Ma, J.-L.; Dai, L.; Yin, T.; He, Z.-Z. A high-performance wearable thermoelectric generator with comprehensive optimization of thermal resistance and voltage boosting conversion. *Appl. Energy* **2022**, *312*, 118696. [CrossRef]
- Kuang, N.; Niu, A.; Wang, W.; Zuo, Z.; Zhan, T.; Wang, H. High performance flexible thermoelectric generator using bulk legs and integrated electrodes for human energy harvesting. *Energy Convers. Manag.* **2022**, *272*, 116337. [CrossRef]
- Kim, C.S.; Yang, H.M.; Lee, J.; Lee, G.S.; Choi, H.; Kim, Y.J.; Lim, S.H.; Cho, S.H.C.B.J. Self-powered wearable electrocardiography using a wearable thermoelectric power generator. *ACS Energy Lett.* **2018**, *3*, 501–507. [CrossRef]
- Park, H.; Kim, D.; Eom, Y.; Wijethunge, D.; Hwang, J.; Kim, H.; Kim, W. Mat-like flexible thermoelectric system based on rigid inorganic bulk materials. *J. Phys. D Appl. Phys.* **2017**, *50*, 494006. [CrossRef]
- Park, H.; Lee, D.; Kim, D.; Cho, H.; Eom, Y.; Hwang, J.; Kim, H.; Kim, J.; Han, S.; Kim, W. High power output from body heat harvesting based on flexible thermoelectric system with low thermal contact resistance. *J. Phys. D Appl. Phys.* **2018**, *51*, 365501. [CrossRef]
- Lee, G.; Kim, C.S.; Kim, S.; Kim, Y.J.; Choi, H.; Cho, B.J. Flexible heatsink based on a phase-change material for a wearable thermoelectric generator. *Energy* **2019**, *179*, 12–18. [CrossRef]
- Prasad, J.S.; Anandalakshmi, R.; Muthukumar, P. Numerical investigation on conventional and PCM heat sinks under constant and variable heat flux conditions. *Clean. Techn. Environ. Policy* **2021**, *23*, 1105–1120. [CrossRef]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. Desai, A.N.; Shah, H.; Singh, V.K. Novel inverted fin configurations for enhancing the thermal performance of PCM based thermal control unit: A numerical study. *Appl. Therm. Eng.* **2021**, *195*, 117155. [[CrossRef](#)]
25. Zhu, S.; Miao, L.; Peng, Y.; Gao, J.; Lai, H.; Liu, C.; Zhang, Y.; Zhang, X.; Chen, Z.; Pei, Y. Persistently self-powered wearable thermoelectric generator enabled by phase-change inorganics as the heat sink. *Mater. Today Phys.* **2023**, *32*, 101011. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายภณธร อีลิปต์
วัน เดือน ปีเกิด	6 มีนาคม 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	58 ซอยอ่อนนุช 76/1 แขวง/เขตประเวศ กรุงเทพฯ 10250
ประวัติการศึกษา	(2563) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.17 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Optimizing Waste Heat Conversion: Integrating Phase-Change Material Heatsinks and Wind Speed Dynamics to Enhance Flexible Thermoelectric Generator Efficiency ตีพิมพ์บนสำนักพิมพ์ MDPI. วารสาร Materials 2024. ปีของวารสารที่ 17. ฉบับของวารสารที่ 2. เลข DOI ที่ 10.3390/ma17020420

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้