



เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน

วิทยานิพนธ์
ของ
กฤตานน ประเทพา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
กันยายน 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน

วิทยานิพนธ์

ของ

กฤตานน ประเทพา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กันยายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Self Powerless Heat Detection Using Thermoelectrical Energy Harvesting Technique

Krittanon Prathepha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

September 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกฤตานน ประเทพา
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

..... กรรมการ

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัฒน์ อังควิศิษฐพันธ์)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร. สุพรรณนิกา วัฒนนะ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

| | | | |
|------------------|--|------------|-----------------------------|
| ชื่อเรื่อง | เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน | | |
| ผู้วิจัย | กฤตานน ประเทพา | | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล | | |
| ปริญญา | ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต | สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ |
| มหาวิทยาลัย | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม | ปีที่พิมพ์ | 2564 |

บทคัดย่อ

พลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติสามารถเป็นพลังงานสำคัญต่อการขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีไม่มีพลังงานฟ้า หรือไม่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์เกิดอัคคีภัย เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเป็นเซนเซอร์และแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ในสถานการณ์ดังกล่าว อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงมากจากอัคคีภัยสามารถทำให้อุณหภูมิโดยรอบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งมีฝั่งรับความร้อนและฝั่งระบายความร้อน ความร้อนจากอัคคีภัยจะทำให้อุณหภูมิทั้งสองฝั่งนี้เท่ากันอย่างรวดเร็วและไม่สามารถกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนอุปกรณ์แจ้งเตือนอัคคีภัย

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญและถูกพิจารณาเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อน เนื่องจากมีคุณสมบัติการนำความร้อนและฉนวนความร้อนที่ดี ยางธรรมชาติมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.35 W/mk เมื่อนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตรวจจับอัคคีภัย ยางสามารถป้องกันความร้อนจากภายนอกเนื่องจากคุณสมบัติฉนวนความร้อน และสามารถนำความร้อนที่ฝั่งระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกในขณะเดียวกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้เสนอเทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุระบายความร้อนเคลือบบนครีปของฮีตซิงก์ จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น และแรงดันไฟฟ้า มีค่าสูงสุด $15.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 0.18 V ตามลำดับ

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ, แจ้งเตือนอัคคีภัย, ไร้พลังงาน, เทอร์โมอิเล็กทริก, อัคคีภัย, การตรวจจับความร้อน, เซนเซอร์

| | | | |
|-------------------|--|--------------|-------------------------------------|
| TITLE | Self Powerless Heat Detection Using Thermoelectrical Energy Harvesting Technique | | |
| AUTHOR | Krittanon Prathepha | | |
| ADVISORS | Associate Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D. | | |
| DEGREE | Doctor of Philosophy | MAJOR | Electrical and Computer Engineering |
| UNIVERSITY | Maharakham University | YEAR | 2021 |

ABSTRACT

Thermoelectrical energy from a thermoelectric generator is one of many phenomena energies in nature that can be a power supply for electronic devices due to losing electricity in the fluctuated situation. Specifically, in a fire hazard situation thermoelectric can be a sensor for sensing and converting the heat from a fire into electricity for supplying an alarm circuit. However, the significant temperature from a fire could haul an ambient temperature and anything in the vicinity into heat. Mainly, it will cause the temperatures between the hot and the cold side of the thermoelectric device to be equal. Therefore no electricity is being generated.

Natural rubber mainly becomes popular in various commercial and residential applications. Generally, it is considered to be an electrical and thermal insulator because they have excellent thermal conductivity and insulation properties which are preferred for electronics. The value of thermal conductivity of natural rubber is 0.35 W/mk that could recover electronic products that operated at high temperatures for long-term stability. Considering, thermoelectric having natural rubber as cooling substrate at the cold side while insulation at the outer side at the same time was obviously preferred in a fire hazard.

In this article, another thermoelectrical energy harvesting technique was proposed which potentially improved the differential temperature gap and

stabilized the cold side of thermoelectric. The proposed system was based on the use of natural rubber which was coated on the fins of the heat sink, to keep the cold side temperature steadily. The experimental results illustrated that the improvements of this technique achieved the maximum differential temperature and the voltage which were 15.9 °C and 0.18 V, respectively.

Keyword : natural rubber, fire alarm, self-powered, thermoelectric, fire hazard, heat detection, sensor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัตร เสงี่ยมวิบูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร, รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิวัตร อังควิเศษฐพันธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพรรณนิกา วัฒนะ ที่ได้ให้แนวคิดความรู้ทางวิชาการ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ทุกชั้นตอน ตลอดจนกำลังใจแก่ผู้วิจัย ซึ่งเป็นผลให้ผู้วิจัยมีความสามารถในการทำและพัฒนางานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท และปริญญาเอก ผู้เป็นกำลังใจทุกท่าน

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ช่วยส่งเสริมสนับสนุนกระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมา

กฤตานัน ประเทพา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ฉ |
| กิตติกรรมประกาศ | ช |
| สารบัญ | ฅ |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูปภาพ | ฐ |
| บทที่ 1 | 1 |
| บทนำ | 1 |
| 1.1 ภูมิหลัง | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย | 3 |
| 1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย | 4 |
| 1.6 สถานที่ทำการวิจัย | 5 |
| 1.7 นิยามศัพท์ | 5 |
| บทที่ 2 | 6 |
| ปริทัศน์เอกสารข้อมูล | 6 |
| 2.1 อัคร์ภัย | 6 |
| 2.2 องค์ประกอบของไฟ | 8 |
| 2.3 ชนิดของไฟ | 9 |
| 2.4 กระบวนการการจุดติดไฟของเชื้อเพลิง | 14 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5 ความร้อนและการถ่ายเทความร้อน..... | 16 |
| 2.6 อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน | 20 |
| 2.7 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก | 23 |
| 2.8 เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก | 25 |
| บทที่ 3..... | 42 |
| วิธีดำเนินการวิจัย..... | 42 |
| 3.1 อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน | 42 |
| 3.2 ระบบตรวจจับความร้อน..... | 43 |
| 3.3 กระบวนการตรวจจับความร้อน..... | 44 |
| 3.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน..... | 48 |
| บทที่ 4..... | 49 |
| การทดลองและผลการวิจัย | 49 |
| 4.1 กระบวนการทดลองใช้อย่างดูดซับความร้อนบริเวณผิงเย็นของฮีตซิงก์..... | 49 |
| 4.2 การทดลองการใช้อย่างดูดซับความร้อนของฮีตซิงก์..... | 53 |
| 4.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์ | 53 |
| บทที่ 5..... | 61 |
| สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... | 61 |
| 5.1 วิเคราะห์ผลความแตกต่างของอุณหภูมิผิงร้อนและเย็นของฮีตซิงก์แต่ละขนาด | 61 |
| 5.2 วิเคราะห์ผลแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์แต่ละขนาด | 63 |
| 5.3 สรุปผลการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยยางธรรมชาติ | 66 |
| 5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย | 66 |
| บรรณานุกรม | 67 |
| ภาคผนวก..... | 67 |

| | |
|-----------------------|----|
| ภาคผนวก ก..... | 68 |
| ตารางผลการทดลอง..... | 69 |
| ประวัติผู้เขียน | 87 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตาราง 1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย | 4 |
| ตาราง 2 ความเร็วการลุกลามของการเผาไหม้คู่ในเชื้อเพลิงหลายชนิด [22]..... | 14 |
| ตาราง 3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการไหลของตัวกลางรูปแบบต่าง ๆ [23]..... | 17 |
| ตาราง 4 สภาพการนำความร้อนของวัสดุต่าง ๆ [23] | 18 |
| ตาราง 5 อุณหภูมิระหว่างฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละเดือน ... | 30 |
| ตาราง 6 คุณสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 2 รุ่นระหว่าง TEC-12706 และ TEC1-12710.... | 38 |
| ตาราง 7 คุณสมบัติอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC1-12706 | 44 |
| ตาราง 8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างฝั่งรับความร้อน และฝั่งเย็น และแรงดันไฟฟ้า..... | 46 |
| ตาราง 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นและแรงดันไฟฟ้าที่เวลา 90 วินาที | 59 |

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| ภาพประกอบ 1 ขั้นตอนการเกิดอค์คีภัย..... | 7 |
| ภาพประกอบ 2 แผนภาพสามเหลี่ยมไฟ..... | 8 |
| ภาพประกอบ 3 กระบวนการเผาไหม้เปลวไฟแบบแพร่..... | 10 |
| ภาพประกอบ 4 กระบวนการเผาไหม้เปลวไฟแบบผสมก่อน..... | 10 |
| ภาพประกอบ 5 (ก) เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ข) หัวตัดแก๊ส..... | 11 |
| ภาพประกอบ 6 (ก) เชื้อเพลิงจากกองใบไม้ (ข) เชื้อเพลิงจากกองแกลบ..... | 12 |
| ภาพประกอบ 7 กระบวนการเผาไหม้คู่ของเชื้อเพลิง..... | 12 |
| ภาพประกอบ 8 (ก) การเผาไหม้ของถ่าน (ข) การเผาไหม้ของบุหรี..... | 13 |
| ภาพประกอบ 9 สรุประบวนการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงของแข็ง ของเหลว และแก๊ส..... | 15 |
| ภาพประกอบ 10 กระบวนการทำงานของระบบตรวจจับอค์คีภัย..... | 21 |
| ภาพประกอบ 11 กระบวนการตรวจจับความร้อนแบบกำหนดอุณหภูมิ..... | 21 |
| ภาพประกอบ 12 กระบวนการตรวจจับความร้อนแบบใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ..... | 21 |
| ภาพประกอบ 13 (ก), (ข) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอล..... | 22 |
| ภาพประกอบ 14 (ก), (ข) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์..... | 22 |
| ภาพประกอบ 15 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก..... | 23 |
| ภาพประกอบ 16 ส่วนประกอบของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก..... | 24 |
| ภาพประกอบ 17 กระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก..... | 25 |
| ภาพประกอบ 18 การระบายความร้อนบริเวณฝั่งเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก..... | 26 |
| ภาพประกอบ 19 (ก) อุณหภูมิการระบายความร้อนกรณีใช้และไม่ใช้ท่อความร้อน (ข) กำลังไฟฟ้ากรณีใช้และไม่ใช้ท่อความร้อน..... | 27 |
| ภาพประกอบ 20 กระบวนการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี..... | 28 |

| | |
|---|----|
| ภาพประกอบ 21 (ก) กราฟระหว่างอุณหภูมิ แรงดันขาเข้าของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบอัตโนมัติ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (ข) กราฟระหว่างแรงดันขาเข้าของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบอัตโนมัติ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด | 29 |
| ภาพประกอบ 22 กระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งบริเวณหลังคาบ้าน | 30 |
| ภาพประกอบ 23 วงจรการทดลองรับความร้อนส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย | 31 |
| ภาพประกอบ 24 (ก) กราฟแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเพิ่มแรงดันของส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย (ข) กราฟแรงดันไฟฟ้า LED ของส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย | 31 |
| ภาพประกอบ 25 วงจรการทดลองแปลงผันแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก | 32 |
| ภาพประกอบ 26 ผังงานการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า | 32 |
| ภาพประกอบ 27 (ก), (ข) แรงดันไฟฟ้าที่วัดจากออสซิลโลสโคป | 33 |
| ภาพประกอบ 28 รูปแบบการทดลองด้วยหลอดไฟฮาโลเจน | 34 |
| ภาพประกอบ 29 (ก) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจัดวางในแนวตั้ง (ข) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีแสงแดดของการจัดวางในแนวตั้ง (ค) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีเมฆมากของการจัดวางในแนวตั้ง | 35 |
| ภาพประกอบ 30 (ก) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจัดวางในแนวนอน (ข) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีแสงแดดของการจัดวางในแนวนอน (ค) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีเมฆมากของการจัดวางในแนวนอน | 36 |
| ภาพประกอบ 31 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำการทดลอง | 36 |
| ภาพประกอบ 32 (ก), (ข) กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ (ค), (ง) แรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ (จ), (ช) กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ..... | 37 |
| ภาพประกอบ 33 (ก), (ข) การต่อวงจรในรูปแบบที่ 1 และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้ ตามลำดับ (ค), (ง) การต่อวงจรในรูปแบบที่ 2 และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้ ตามลำดับ (จ), (ช) การต่อวงจรในรูปแบบที่ 3 และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้ ตามลำดับ | 39 |
| ภาพประกอบ 34 (ก) อุปกรณ์ภายในเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริก (ข) อุปกรณ์ภายนอกเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริก | 40 |

| | |
|---|----|
| ภาพประกอบ 35 (ก) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดความร้อนในแต่ละระยะทาง (ข) ระยะทางของเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริกตรวจจับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด | 41 |
| ภาพประกอบ 36 (ก), (ข) ส่วนประกอบภายในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน | 43 |
| ภาพประกอบ 37 บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง | 43 |
| ภาพประกอบ 38 บล็อกไดอะแกรมภาครับ | 44 |
| ภาพประกอบ 39 วงจรภายในโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก | 45 |
| ภาพประกอบ 40 ภายนอกอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน | 46 |
| ภาพประกอบ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็น และแรงดันไฟฟ้า | 47 |
| ภาพประกอบ 42 การทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน | 48 |
| ภาพประกอบ 43 (ก), (ข) การเคลื่อนย้ายบนครีบบีตซิงก์ | 49 |
| ภาพประกอบ 44 (ก), (ข), (ค) ความหนาของยางที่ 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตรตามลำดับ | 50 |
| ภาพประกอบ 45 โมเดลแสดงการปรับความหนาของยางขนาดต่างกัน | 50 |
| ภาพประกอบ 46 ทาซิลิโคนนำความร้อนบริเวณหน้าสัมผัส | 51 |
| ภาพประกอบ 47 (ก) โมดูลทดลองจริง (ข) จำลองโมดูลทดลอง 3 มิติ | 51 |
| ภาพประกอบ 48 องค์ประกอบของระบบที่นำเสนอ | 52 |
| ภาพประกอบ 49 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยไม่เคลือบยาง | 54 |
| ภาพประกอบ 50 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 0.5 มิลลิเมตร | 55 |
| ภาพประกอบ 51 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 1.0 มิลลิเมตร | 56 |
| ภาพประกอบ 52 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยไม่เคลือบยาง | 57 |

| | |
|---|----|
| ภาพประกอบ 53 แสดงผลการทดลองฮีตซิงค์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยเคลือบ ยางหนา 0.5 มิลลิเมตร..... | 58 |
| ภาพประกอบ 54 แสดงผลการทดลองฮีตซิงค์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยเคลือบ ยางหนา 1.0 มิลลิเมตร..... | 59 |
| ภาพประกอบ 55 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงค์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร | 62 |
| ภาพประกอบ 56 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงค์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร | 63 |
| ภาพประกอบ 57 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงค์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร..... | 64 |
| ภาพประกอบ 58 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงค์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร..... | 65 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ในปัจจุบันอัคคีภัยเป็นอุบัติเหตุร้ายแรง ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากสภาวะโลกร้อน ก่อให้เกิดอุณหภูมิสูงบริเวณวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิง เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่องและลุกลามไปบริเวณใกล้เคียง สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน รวมถึงจิตใจของผู้ประสบเหตุ [1] โดยทั่วไปการป้องกันอัคคีภัยก่อนเกิดเหตุ กระทำโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบ่งเป็นสองรูปแบบคือ 1) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอล และ 2) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ [2] ข้อดีของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอลคือ ตรวจจับความร้อนได้ดีและมีราคาถูก แต่ข้อเสียคือ หลังจากตรวจจับความร้อน อุปกรณ์ภายในจะเสียหาย จำเป็นต้องติดตั้งใหม่ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์มีข้อดีคือ หลังจากตรวจจับความร้อน อุปกรณ์ภายในจะคืนสู่สภาพเดิมอัตโนมัติ สามารถตรวจจับอัคคีภัยได้ตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ แต่ข้อเสียคือ มีราคาแพง และต้องหมั่นซ่อมบำรุงอยู่ตลอดเวลา

เพื่อป้องกันอัคคีภัยอย่างมีประสิทธิภาพ วิศวกรซ่อมบำรุงต้องหมั่นซ่อมบำรุงเพื่อไม่ให้ อุปกรณ์ชำรุดหรือเสียหายระหว่างการตรวจจับความร้อน โดยกระทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันระบบ แจ้งเหตุอัคคีภัย เพราะอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน จัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถชำรุดหรือเสียหายได้ในหลายกรณี ได้แก่ การติดตั้งไม่ได้มาตรฐาน สายไฟชำรุดหรือหลุดจากจุดเชื่อมต่อ การลัดวงจรภายในระบบ ประกอบกับต้องมีผู้เชี่ยวชาญคอยเฝ้าระวังและซ่อมบำรุงอย่างสม่ำเสมอ ดังกล่าวนี้เป็นข้อเสียที่สำคัญของระบบแจ้งเหตุอัคคีภัยในปัจจุบัน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พลังงานทดแทน โดยใช้เทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงาน [3]-[20]

เทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นที่แพร่หลายในงานวิจัย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในทางกลับกัน สามารถเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน งานวิจัย [3] ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก และท่อความร้อน ในการลดอุณหภูมิบริเวณฝั่งเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า งานวิจัย [4] ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตและเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ งานวิจัย [5] ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งบริเวณหลังคาบ้านในป่ากีสถาน โดยฝั่งรับความร้อน จะรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ในขณะที่ฝั่งเย็นระบายความร้อนด้วยเครื่องปรับอากาศภายในบ้าน และสรุปผลสถิติการผลิตพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน งานวิจัย [6] ใช้ อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกรับความร้อนจากส่วนต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ ประกอบด้วย ขา ข้อมือ

ด้านบนและด้านล่าง และฝ่ามือด้านบนและด้านล่าง เพื่อสรุปแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอุปกรณ์งานวิจัย [7] เก็บเกี่ยวพลังงานอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดิซีเป็นดิซีด้วยหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้า งานวิจัย [8] ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจัดวางในลักษณะแตกต่างกัน ได้แก่ แนวตั้ง และแนวนอน เพื่อสรุปพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละลักษณะการจัดวาง งานวิจัย [9] วิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก กรณีใช้และไม่ใช้การระบายความร้อน เพื่อทดลองผลลัพธ์ของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า งานวิจัย [10] ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเคลือบสารต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์การดูดซับความร้อน ทดสอบโดยการให้ความร้อนโดยไม่มีสารเคลือบ ใช้แผ่นเหล็ก ใช้แผ่นอลูมิเนียม ใช้แผ่นอลูมิเนียมทาสีดำด้าน ใช้แผ่นอลูมิเนียมบนอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามตัว และใช้แผ่นอลูมิเนียมทาสีดำบริเวณด้านบนอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามตัว เพื่อทดลองผลลัพธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ในหนึ่งนาที่ งานวิจัย [11] ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวนแปดตัวต่อวงจรในรูปแบบต่างกันระหว่างต่อวงจรแบบอนุกรม ขนาน และผสม และสรุปผลแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบของการต่อวงจร งานวิจัย [12] ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเซนเซอร์วัดการไหลของพลังงานความร้อน ก่อนเกิดอัคคีภัยของเชื้อเพลิงหลายชนิดได้แก่ ไม้ แอลกอฮอล์ ถ่านหิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซิน สามารถส่งสัญญาณไร้สายหลังจากตรวจพบอัคคีภัย ภายในอุปกรณ์ใช้ขี้ผึ้ง ดูดซับความร้อนบริเวณฝั่งเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนตัวอุปกรณ์ให้ตอบสนองอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการใช้ขี้ผึ้งซึ่งเป็นวัสดุจากปิโตรเคมีเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และเป็นวัสดุที่ไม่ได้มีอยู่ตามธรรมชาติ

ดังที่กล่าวมาวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอเทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อน โดยใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงานเป็นเซนเซอร์ตรวจจับความร้อน ในขณะที่สามารถนำความร้อนที่ตรวจจับได้แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์แจ้งเตือนอัคคีภัย โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า ประกอบกับใช้ยางธรรมชาติ เป็นวัสดุระบายความร้อนบริเวณฝั่งเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก จากวิธีการเสนอดังกล่าวอุปกรณ์สามารถตอบสนองรวดเร็วในการตรวจจับอัคคีภัย และถูกต้องแม่นยำ ไม่ใช้วัสดุสิ้นเปลือง และเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรรวมถึงแก้ปัญหาอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบัน

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 ประยุกต์ใช้เทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อน

1.2.2 เพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก

1.2.3 วิเคราะห์และสรุปผลความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น และแรงดันไฟฟ้า

1.2.4 แก้ปัญหาอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.3.1.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

1.3.1.2 ฮีตซิงก์ ขนาด 40x40x18 จำนวน 8 ครีบ และ 40x45x21 จำนวน 4 ครีบ

1.3.1.3 ยางธรรมชาติ

1.3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1.3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติของยางธรรมชาติ

1.3.2.2 ศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น และแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 เทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนสามารถแจ้งเตือนอัคคีภัยได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

1.4.2 ลดการใช้วัสดุสิ้นเปลืองในการผลิตอุปกรณ์ และเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร

1.4.3 สามารถแก้ปัญหาอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบัน

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตาราง 1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

| กิจกรรม | ระยะเวลา (เดือน) | | | | | |
|--|------------------|------|------|-------|-------|-------|
| | ส.ค. | ต.ค. | ธ.ค. | ก.พ. | เม.ย. | มิ.ย. |
| | – | – | – | – | – | – |
| | ก.ย. | พ.ย. | ม.ค. | มี.ค. | พ.ค. | ก.ค. |
| 1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากงานวิจัย เอกสาร บทความ | ←→ | | | | | |
| 2. ออกแบบการทดลองและสร้างอุปกรณ์ เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน | ←→ | → | | | | |
| 3. เก็บข้อมูลอุณหภูมิห้องและทดลอง | | | ←→ | | | |
| 4. เพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนของ เทอร์โมอิเล็กทริก | | | ←→ | → | | |
| 5. ทดลองและบันทึกผล | | | | ←→ | | |
| 7. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล | | | | | ←→ | |
| 6. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ และส่งผล งานวิจัยเพื่อพิจารณาการตีพิมพ์ | | | | | ←→ | → |

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

สถานที่ทำการวิจัย : อาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.7 นิยามศัพท์

การตรวจจับความร้อน (Heat Detection) หมายถึง การเฝ้าสังเกตอุณหภูมิในบริเวณจำกัด
ส่งสัญญาณแจ้งเหตุเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างผิดปกติ หรือตรวจพบความร้อนสูง

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) หมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อน
ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในทางกลับกันสามารถเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็น
พลังงานความร้อน

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) หมายถึง กระบวนการนำพลังงานที่ปรากฏใน
สิ่งแวดล้อมหรือพลังงานตามธรรมชาติ มาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า

ไม่ใช้พลังงาน (Self Powerless) หมายถึง ไม่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนอุปกรณ์
อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

การตรวจจับความร้อนหรืออัคคีภัยในปัจจุบัน ใช้เทคนิคทางกลตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างมีการลุกไหม้ (Fire Development Stages) ส่งสัญญาณเตือนภัย หรือสั่งการเพื่อยุติเหตุก่อนเกิดอัคคีภัย ปัจจัยสำคัญคืออุปกรณ์รับสัญญาณเพื่อแจ้งเตือนหรืออุปกรณ์ตรวจจับความร้อน แบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ 1) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอล และ 2) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ดังกล่าวจัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า สามารถชำระหรือเสียหายได้ในหลายกรณี ได้แก่ การติดตั้งไม่ได้มาตรฐาน สายไฟชำรุดหรือหลุดจากจุดเชื่อมต่อ การลัดวงจรภายในระบบหรือใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ตลอดเวลา จากประเด็นดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อแก้ปัญหาอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบัน เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายอย่างละเอียดในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอัคคีภัย อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบัน เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ตลอดจนสรุปข้อดีและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 อัคคีภัย

อัคคีภัย คือรูปแบบหนึ่งของการเผาไหม้ (Combustion) ที่สามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นการเผาไหม้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้บนเตาไฟหุงต้ม การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ของเปลวเทียน เป็นต้น ตัวอย่างเหล่านี้เป็นการเผาไหม้ที่สามารถควบคุมได้ แต่ในทางกลับกันอัคคีภัยคือการเผาไหม้ที่ไม่สามารถควบคุมได้ และบางครั้งเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ไฟฟ้าลัดวงจร หรืออุณหภูมิสูงบริเวณที่เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น อัคคีภัยมีจุดเริ่มต้นจากการเกิดไฟ แบ่งตามลักษณะออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) ชั้นแรกเริ่ม 2) ชั้นเติบโต 3) ชั้นลุกไหม้อย่างสมบูรณ์ และ 4) ชั้นสลายตัว ดังแสดงในภาพประกอบ 1

2.1.1 ชั้นแรกเริ่ม

ชั้นแรกเริ่ม (Incipient Stage) คือเริ่มมีอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate) เกิดการเผาไหม้ในชั้นแรก เมื่อความร้อน เชื้อเพลิง และออกซิเจนทำปฏิกิริยาเคมีต่อกันก่อให้เกิดการจุดติดไฟ (Ignition) โดยทั่วไปชั้นแรกเริ่มจะแสดงผลผลิตของการเผาไหม้ (Products of Combustion) ด้วยควันและเปลวไฟขนาดเล็กมาก

2.1.2 ชั้นเติบโต

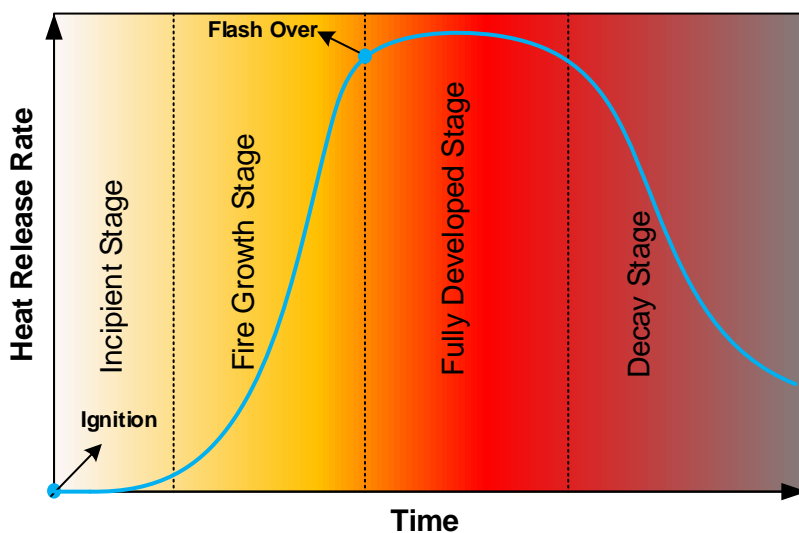
ชั้นเติบโต (Fire Growth Stage) คืออัตราการปลดปล่อยความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณออกซิเจน และวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิงมีมากพอ ในขั้นตอนนี้จะเริ่มมองเห็นควันและไฟได้ เมื่ออัตราการปลดปล่อยความร้อนเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์วาบไฟ (Flash Over) เป็นการลุกไหม้ในทันที ความร้อนจะลอยสูงขึ้นและแผ่รังสีความร้อนสู่ด้านล่าง ทำให้เชื้อเพลิงบริเวณรอบ ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้น และติดไฟง่าย

2.1.3 ชั้นลุกไหม้อย่างสมบูรณ์

ชั้นลุกไหม้อย่างสมบูรณ์ (Fully Developed) คืออัตราการปลดปล่อยความร้อนมีค่าสูงสุด ไฟเกิดการลุกไหม้ต่อเนื่องและลุกลามไปบริเวณใกล้เคียงที่เป็นวัสดุเชื้อเพลิง ทำให้ขั้นตอนนี้ไฟมีความร้อนมากที่สุด และมีความอันตรายที่สุดสำหรับสิ่งมีชีวิต

2.1.4 ชั้นสลายตัว

ชั้นสลายตัว (Decay Stage) คืออัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากปริมาณออกซิเจน และเชื้อเพลิงลดลง ทำให้ไฟมอดดับ ในขั้นตอนนี้จะเห็นร่องรอยการเผาไหม้ หรือเถ้าถ่าน เถ้าถ่านนี้สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นใหม่ได้ เมื่อมีองค์ประกอบของไฟ และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม



ภาพประกอบ 1 ขั้นตอนการเกิดอัคคีภัย

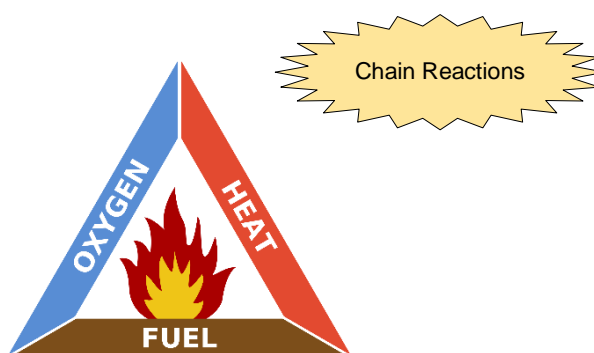
(ดัดแปลงจาก: <https://guides.firedynamicstraining.ca/g/fd203-enclosure-fires-sd/118181>)

โดยทั่วไประยะห่างระหว่างชั้นแรกเริ่ม และชั้นเติบโต จะใช้เวลาเป็นนาที่หรือชั่วโมง ขณะที่ระยะห่างระหว่างปรากฏการณ์วาบไฟ และชั้นลุกไหม้อย่างสมบูรณ์ จะใช้เวลาเป็นนาที่หรือวินาที ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของไฟ

2.2 องค์ประกอบของไฟ

ไฟ (Fire) คือปฏิกิริยาเคมีที่ปลดปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่าง เกิดจากองค์ประกอบพื้นฐาน 3 อย่างคือ 1) เชื้อเพลิง (Fuel) คือวัตถุที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยสามารถมีสถานะของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส สำหรับการเผาไหม้ที่สามารถมองเห็นเปลวไฟ เชื้อเพลิงต้องอยู่ในสถานะแก๊ส จึงจะสามารถทำปฏิกิริยากับตัวสันดาปได้ 2) ตัวสันดาป (Oxidizer) คือสารที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับเชื้อเพลิงและปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา โดยปกติตัวสันดาปที่เผาไหม้ในอากาศคือออกซิเจน ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 21 โดยปริมาตร และ 3) ความร้อน (Heat) คือพลังงานที่ถ่ายเทจากสสารหรือระบบหนึ่งไปยังสสารหรือระบบอื่นโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ ความร้อนมีหน้าที่หลักอยู่ 2 ประการในการเกิดไฟ คือ 1) ใช้ในการเปลี่ยนสถานะเชื้อเพลิงให้กลายเป็นแก๊ส 2) ทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและออกซิเจนสูงเพื่อจะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ การเผาไหม้จะไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ เมื่ออุณหภูมิระหว่างการทำปฏิกิริยาทางเคมีของอุณหภูมิเปลวไฟลดลงต่ำกว่า 1300 °C โดยประมาณ

องค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 อย่างของการเกิดไฟสามารถเขียนแสดงเป็นแผนภาพสามเหลี่ยมไฟ (Fire Triangle) ดังแสดงในภาพประกอบ 2 โดยถ้าขาดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง ไฟจะไม่สามารถเกิดขึ้นหรือดำเนินต่อไปได้ นอกจากนี้การเผาไหม้ที่ยาวนานจะขึ้นกับปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reactions) เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง และมีบทบาทสำคัญในการทำให้การเผาไหม้ดำเนินต่อไป ในทางกลับกันถ้าหยุดการทำงานของปฏิกิริยาลูกโซ่ จะทำให้การเผาไหม้สิ้นสุดลง



ภาพประกอบ 2 แผนภาพสามเหลี่ยมไฟ

(ดัดแปลงจาก: https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_triangle)

2.3 ชนิดของไฟ

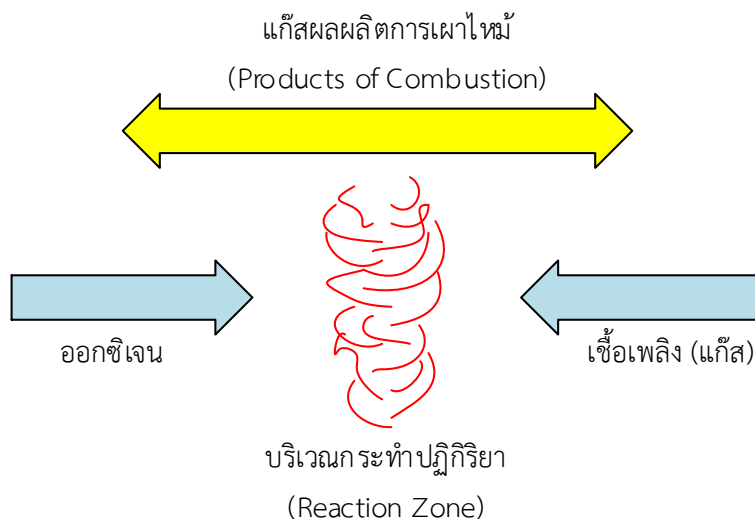
การแบ่งชนิดของไฟตามลักษณะการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน สามารถแบ่งเป็น 2 ลักษณะได้แก่ 1) การเผาไหม้แบบมีเปลวไฟ (Flame Mode) สามารถแยกย่อยได้อีก 2 ลักษณะได้แก่ 1.1) เปลวไฟแบบแพร่ และ 1.2) เปลวไฟแบบผสมก่อน และ 2) การเผาไหม้แบบไม่มีเปลวไฟ (Flameless Mode) สามารถแยกย่อยได้อีก 2 ลักษณะได้แก่ 2.1) การเผาไหม้แบบสพอนเทเนียส และ 2.2) การเผาไหม้คู่

2.3.1 การเผาไหม้แบบมีเปลวไฟแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.3.1.1 เปลวไฟแบบแพร่

เปลวไฟแบบแพร่ (Diffusion Flame) เป็นการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่เคลื่อนที่มาจากบริเวณที่ต่างกัน เรียกว่า บริเวณกระทำปฏิกิริยา (Reaction Zone) เมื่อเชื้อเพลิงและออกซิเจนเคลื่อนมาพบกันภายในบริเวณกระทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการเผาไหม้ จากการเผาไหม้จะเกิดแก๊สผลผลิตการเผาไหม้และความร้อน จากนั้นแก๊สผลผลิตการเผาไหม้จะเคลื่อนออกจากบริเวณกระทำปฏิกิริยาในทิศตรงข้ามกับเชื้อเพลิงและออกซิเจนดังแสดงในภาพประกอบ 3 บริเวณกระทำปฏิกิริยาจะไม่มีเชื้อเพลิงเหลือและออกซิเจนเหลืออยู่เพราะถูกใช้หมดไปในการเผาไหม้ ดังนั้นเปลวไฟในกระบวนการที่เชื้อเพลิงและออกซิเจนไม่ได้ผสมกันก่อนนี้เรียกอีกอย่างว่าเปลวไฟแบบไม่ผสมก่อน (Non-premixed Flame)

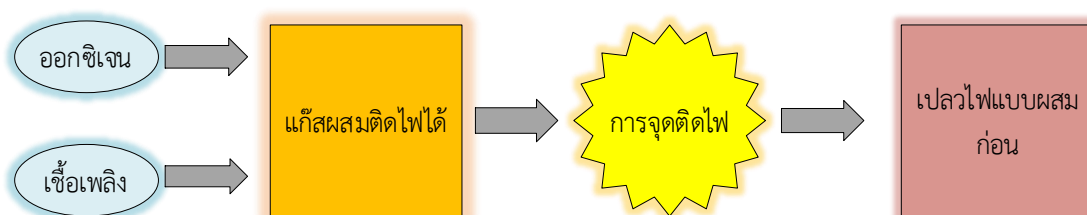
กระบวนการสำคัญที่เชื้อเพลิงและออกซิเจนเคลื่อนที่สู่บริเวณกระทำปฏิกิริยา และทำให้เกิดแก๊สที่ผลผลิตการเผาไหม้เคลื่อนตัวออกจากบริเวณกระทำปฏิกิริยา สามารถอธิบายได้จาก Fick's Law เป็นกฎของการแพร่ (Diffusion) กล่าวว่า สสารจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ดังนั้นการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนจนหมดไป จะทำให้ความเข้มข้นของบริเวณนั้นเป็นศูนย์ จากนั้นเชื้อเพลิงและออกซิเจนจากภายนอกบริเวณกระทำปฏิกิริยาจะแพร่เข้ามาในทางตรงข้ามกับแก๊สผลผลิตการเผาไหม้ทำให้เกิดความเข้มข้นสูงสุดขณะเดียวกันแก๊สผลผลิตการเผาไหม้จึงแพร่ออกในทิศตรงข้ามกับเชื้อเพลิงและออกซิเจน การเผาไหม้ที่เกิดจากธรรมชาติและการเผาไหม้ของอัคคีภัยจะเป็นลักษณะเปลวไฟแบบแพร่เป็นส่วนใหญ่



ภาพประกอบ 3 กระบวนการเผาไหม้เปลวไฟแบบแพร่
(ดัดแปลงจาก: [1])

2.3.1.2 เปลวไฟแบบผสมก่อน

เปลวไฟแบบผสมก่อน (Premixed Flame) เป็นการเผาไหม้ระหว่างไอเชื้อเพลิงที่ผสมกับออกซิเจน เกิดเป็นแก๊สผสมติดไฟได้ (Flammable Mixture) ก่อนรับความร้อนและการจุดติดไฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4 การเผาไหม้ยังไม่สามารถเกิดขึ้นจนกว่าแก๊สผสมติดไฟได้จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิจุดติดไฟ (Ignition Temperature) ตัวอย่างเปลวไฟแบบผสมก่อน ได้แก่ เปลวไฟจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) หรือเปลวไฟจากหัวตัดแก๊ส (Oxyacetylene Welding) ดังแสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 4 กระบวนการเผาไหม้เปลวไฟแบบผสมก่อน
(ดัดแปลงจาก: [1])



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5 (ก) เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ข) หัวตัดแก๊ส

(ที่มา: <https://www.pngfuel.com/>)

2.3.2 การเผาไหม้แบบไม่มีเปลวไฟแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.3.2.1 การเผาไหม้แบบสปอนเทเนียส

การเผาไหม้แบบสปอนเทเนียส (Spontaneous Combustion) เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีอย่างช้า ๆ ระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน หรือสิ่งแวดล้อม เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) เมื่อความร้อนหลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมีมีปริมาณน้อยกว่าความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม จะก่อให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในทางกลับกันเมื่อความร้อนหลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมีมีปริมาณมากกว่าความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม ทำให้ความร้อนสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึงจุดหนึ่ง เชื้อเพลิงจะสามารถจุดติดไฟได้เอง (Self-ignition) หรือเรียกว่าการเกิดความร้อนต่อเนื่องแบบกุไม่กลับ (Thermal Runaway) การจุดติดไฟเองลักษณะนี้สามารถเกิดกับแก๊สผสมติดไฟได้ของเปลวไฟแบบผสมก่อน ก่อให้เกิดการจุดติดไฟเองของเปลวไฟแบบผสมก่อน (Premixed Flame Auto-ignition) ขณะเดียวกันถ้าเกิดการจุดติดไฟเองกับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง จะก่อให้เกิดการจุดติดไฟแบบสปอนเทเนียส (Spontaneous Ignition)

การเผาไหม้แบบสปอนเทเนียสสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อนของกองเชื้อเพลิงและสิ่งแวดล้อม เช่น กองใบไม้ที่ทับถมอย่างหนาแน่นเป็นเวลานาน และกองแกลบที่ทับถมกันในโรงไฟฟ้าชีวมวล ดังแสดงในภาพประกอบ 6 เป็นต้น อุณหภูมิบริเวณตรงกลางกองจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากความร้อนที่คายออกมาจากระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งจะก่อให้เกิดการจุดติดไฟแบบสปอนเทเนียส ระยะเวลาของปฏิกิริยาคายความร้อนออกมาจนกระทั่งเกิดการจุดติดไฟแบบสปอนเทเนียส อาจใช้เวลาหลายนาที หลายชั่วโมง หรือหลายวัน ปัจจัยสำคัญขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบและลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิง



(ก)

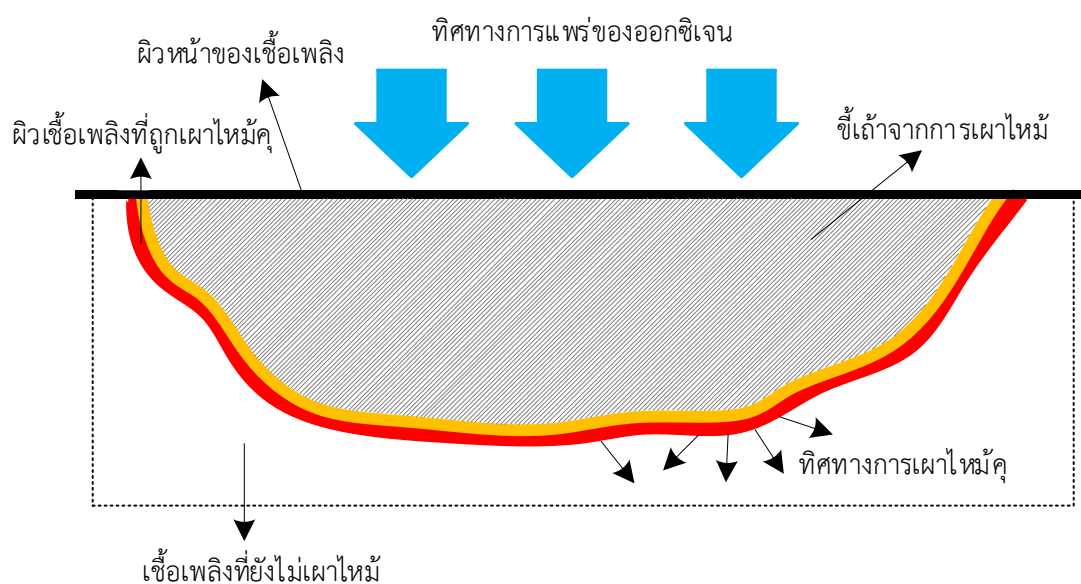


(ข)

ภาพประกอบ 6 (ก) เชื้อเพลิงจากกองใบไม้ (ข) เชื้อเพลิงจากกองแกลบ
(ที่มา: <https://www.pexels.com/>)

2.3.2.2 การเผาไหม้คู้

การเผาไหม้คู้ (Smoldering Combustion) เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีอย่างช้า ๆ ระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและออกซิเจน โดยออกซิเจนจะแพร่จากอากาศบริเวณรอบ ๆ เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวของเชื้อเพลิงดังแสดงในภาพประกอบ 7 ส่วนใหญ่การเผาไหม้คู้จะไม่เกิดเปลวไฟที่สามารถมองเห็นได้ชัด แต่จะเกิดการเรืองแสง (Glowing) ที่ผิวของเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิมากกว่า 1000 °C เช่น การเผาไหม้ของถ่าน และการเผาไหม้ของบุหรี เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 7 กระบวนการเผาไหม้คู้ของเชื้อเพลิง
(ดัดแปลงจาก: [1])



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 8 (ก) การเผาไหม้ของถ่าน (ข) การเผาไหม้ของบุหรี

(ที่มา: <https://www.pngfuel.com/>)

ความร้อนจากการเผาไหม้คมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก ทำให้ยากต่อการตรวจจับความร้อนด้วยอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน แต่อาจตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับควัน (Smoke Detector) และเนื่องจากอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก ความเสียหายที่เกิดจากการเผาไหม้คจึงมีไม่มาก แต่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นแก๊สพิษที่อันตรายต่อมนุษย์ จะถูกขับออกมาจากการเผาไหม้ลักษณะนี้ เพราะเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

การเผาไหม้คจะเกิดขึ้นได้ดีกับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งที่มีลักษณะรูพรุน (Porous Solid Fuel) เพราะการเผาไหม้สามารถลุกลามเข้าไปในบริเวณผิวของเชื้อเพลิงได้ดี เนื่องจากการแพร่ของออกซิเจนและรูพรุนของเชื้อเพลิง ความเร็วของการลุกลามที่บริเวณผิวหน้าของปฏิกิริยาเคมี (Reaction Front) ของการเผาไหม้คมีค่าไม่สูงมาก มีค่าประมาณ 1~10 mm/min พฤติกรรมการเผาไหม้คของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ที่จัดวางในแต่ละลักษณะ แสดงดังตาราง 2 การเผาไหม้คจะสามารถเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ ถ้าอัตราการไหลของออกซิเจนจากบริเวณภายนอกไปสู่บริเวณกระทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น เช่น ลมพัดขณะที่เกิดการเผาไหม้ค หรือการเป่าลมให้ถ่านที่กำลังจะมอด เป็นต้น

ตาราง 2 ความเร็วการลุกลามของการเผาไหม้คู่ในเชื้อเพลิงหลายชนิด [22]

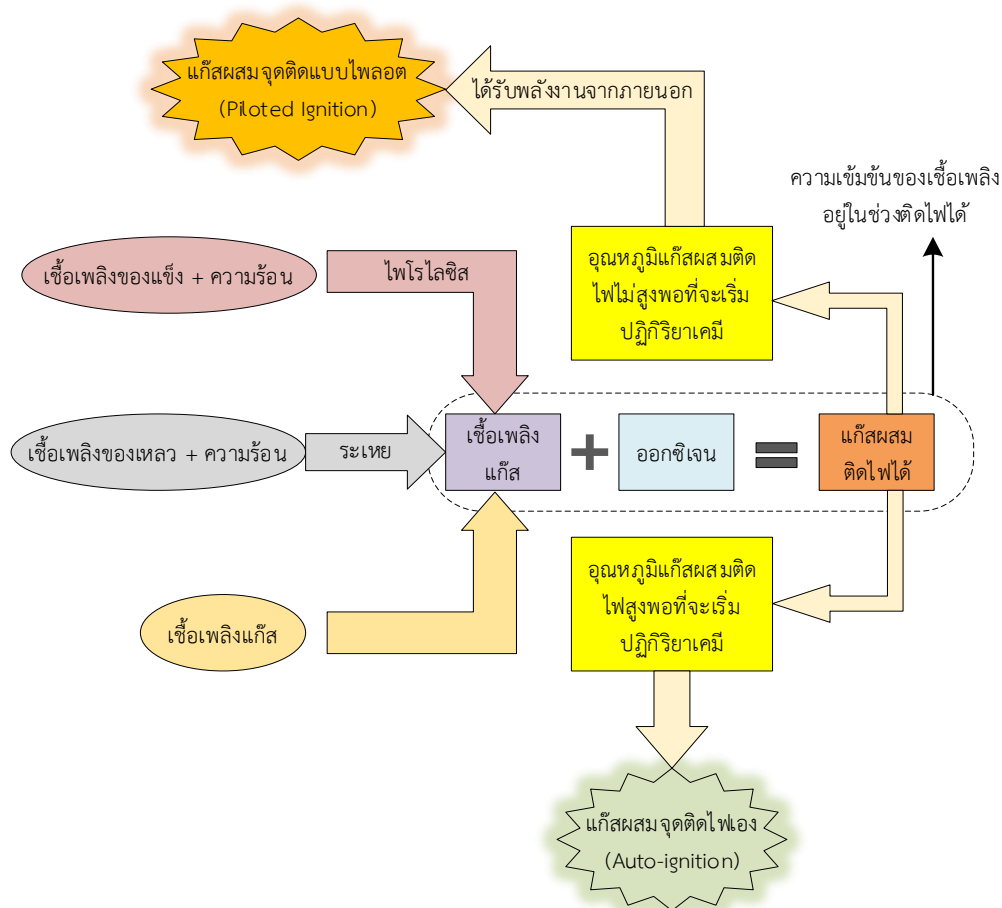
| เชื้อเพลิง | ลักษณะเชื้อเพลิงและลักษณะการเผาไหม้คู่ | ลักษณะและอัตราการไหลเติมของอากาศ | ความเร็วในการลุกลาม |
|--|---|--|-----------------------------|
| Pressed fiber insulation board, 0.23 - 0.29 g/CC | หนา 1.3 cm. แผ่น fiber วางตัวในแนวระดับ | อากาศไหลเติมโดยธรรมชาติ (Natural Convection) | $1.3 - 2.2 \times 10^{-3}$ |
| Pressed fiber insulation board, 0.23 - 0.29 g/CC | หนา 1.3 cm. แผ่น fiber วางตัวในแนวตั้ง | อากาศไหลเติมโดยธรรมชาติ (Natural Convection) | $2.7 - 4.7 \times 10^{-3}$ |
| Pressed fiber insulation board, 0.23 - 0.29 g/CC | หนา 1.3 cm. การลุกลามตามทิศทางของอากาศ | อากาศไหลเติมโดยบังคับ (Force Flow), 20 - 1500 cm/s | $2.5 - 13.0 \times 10^{-3}$ |
| Pressed fiber insulation board, 0.23 - 0.29 g/CC | หนา 1.3 cm. การลุกลามทวนทิศทางของอากาศ | อากาศไหลเติมโดยบังคับ (Force Flow), 80 - 700 cm/s | $2.8 - 3.5 \times 10^{-3}$ |
| ใบยาสูบหั่นละเอียด | บุหรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 cm. วางตัวในแนวระดับ | อากาศไหลเติมโดยธรรมชาติ (Natural Convection) | $3.5 - 5.0 \times 10^{-3}$ |
| ผ้า + 3% NaCl | ผ้า 2 ชั้นหนา 0.2 cm. วางตัวในแนวระดับ การลุกลามตามทิศทางการไหลของอากาศ | อากาศไหลเติมโดยธรรมชาติ (Natural Convection) | $\approx 1 \times 10^{-2}$ |

2.4 กระบวนการการจุดติดไฟของเชื้อเพลิง

การจุดติดไฟเป็นกระบวนการเริ่มต้นของการเผาไหม้ โดยการเผาไหม้แบบมีเปลวไฟเชื้อเพลิงจะต้องมีสถานะแก๊สก่อนทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนจึงจะเกิดการเผาไหม้ การจุดติดไฟสามารถเกิดภายใต้สภาวะเหมาะสมใน 2 กรณี คือ 1) ความเข้มข้นเชื้อเพลิงของแก๊สผสมอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และ 2) อุณหภูมิของแก๊สผสมติดไฟได้สูงพอที่จะสามารถเริ่มปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน นอกจากนี้การจุดติดไฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) การจุดติดไฟแบบ

ไพลอต (Piloted Ignition) และ 2) การจุดติดไฟเอง (Auto-ignition) ภาพประกอบ 9 แสดงสรุปกระบวนการกระบวนการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงแต่ละสถานะ ได้แก่ เชื้อเพลิงของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ความแตกต่างระหว่างการจุดติดไฟแบบไพลอตและการจุดติดไฟเองคือ การจุดติดไฟแบบไพลอตต้องใช้พลังงานจากภายนอก เช่น ประกายไฟที่เกิดจากไฟฟ้าลัดวงจร หรือประกายไฟจากไม้ขีดไฟ เป็นต้น เพื่อให้อุณหภูมิของแก๊สผสมติดไฟได้เพิ่มขึ้นจนเพียงพอที่จะสามารถเริ่มปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน ส่วนการจุดติดไฟเองไม่ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอก สามารถเริ่มปฏิกิริยาเคมีได้เอง เมื่ออุณหภูมิของแก๊สผสมติดไฟได้สูงเพียงพอ

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีสถานะของเหลวหรือของแข็ง ต้องรับความร้อนจากภายนอกเพื่อเปลี่ยนสถานะให้กลายเป็นแก๊ส ได้แก่ วิธีการไพโรไลซิสสำหรับเชื้อเพลิงสถานะของแข็ง และการระเหยสำหรับเชื้อเพลิงสถานะของเหลว จึงสามารถรวมกับออกซิเจนและกลายเป็นแก๊สผสมติดไฟได้ จากนั้นการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงจะเป็นไปตามกระบวนการจุดติดไฟแบบไพลอตหรือการจุดติดไฟเอง



ภาพประกอบ 9 สรุปกระบวนการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงของแข็ง ของเหลว และแก๊ส
(ดัดแปลงจาก: [1])

2.5 ความร้อนและการถ่ายเทความร้อน

ความร้อน (Heat) เป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของไฟ คือพลังงานรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุลวัตถุ สามารถเปลี่ยนมาจากพลังงานรูปแบบอื่นตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน และสามารถถ่ายเทจากบริเวณที่มีความร้อนสูงไปยังบริเวณที่มีความร้อนต่ำกว่า ขณะที่การเผาไหม้ คือปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน หน่วยของพลังงานความร้อนคือจูล (J) อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยเวลาคือวัตต์ (W) และอัตราการไหลของพลังงานความร้อน (Thermal Flux) หน่วยคือพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ($W \cdot m^{-2}$) โดยเป็นไปตามสมการ

$$\dot{q}'' = \frac{Q}{A}$$

โดย \dot{q}'' คืออัตราการไหลของพลังงานความร้อน Q คือพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัตถุต่อหนึ่งหน่วยเวลา และ A คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

ความร้อนและอุณหภูมิไม่ใช่สิ่งเดียวกัน ความร้อนคือพลังงาน ขณะที่อุณหภูมิคือปริมาณที่ใช้ระบุระดับพลังงานความร้อน หรือพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุล ค่าพลังงานความร้อนดังกล่าวสามารถวัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) อุณหภูมิสามารถบ่งบอกว่าความร้อนจะถ่ายเทไปในทิศทางใด โดยจะมีทิศทางการถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ 1) การพาความร้อน 2) การนำความร้อน และ 3) การแผ่รังสีความร้อน

2.5.1 การพาความร้อน

การพาความร้อน (Heat Convection) คือการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่หรือการไหลของตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือแก๊ส เช่น น้ำ หรืออากาศ เป็นต้น โดยโมเลกุลที่ได้รับความร้อนจะเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ไปด้วยในเวลาเดียวกัน การพาความร้อนแบ่งตามการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวกลางได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) การพาความร้อนอย่างอิสระ (Free Convection) หรืออย่างธรรมชาติ (Natural Convection) คือการพาความร้อนที่โมเลกุลของตัวกลางเคลื่อนที่ไปด้วย เพราะมีความหนาแน่นต่างกัน เช่น การเกิดลม เป็นต้น และ 2) การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced Convection) คือการพาความร้อนที่โมเลกุลของตัวกลางถูกทำให้เคลื่อนที่ไปด้วยแรงภายนอก เช่น การเป่าลมด้วยพัดลม หรือการระบายความร้อนของหม้อน้ำในรถยนต์ เป็นต้น การพาความร้อนเป็นไปตามกฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's Cooling Law) คือ

$$\dot{q}'' = h(\Delta T)$$

โดย q'' คืออัตราการไหลของพลังงานความร้อน h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และ ΔT คือความแตกต่างของอุณหภูมิ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficient) มีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล รวมถึงอัตราเร็ว รูปร่าง และลักษณะการวางตัวของวัตถุ ทำให้การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าการพาความร้อนสามารถทำได้โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่วัดได้จากการทดลอง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในเหตุอัศจรรย์และค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงมีการสรุปค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการไหลของตัวกลางรูปแบบต่าง ๆ แสดงดังตาราง 3

ตาราง 3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการไหลของตัวกลางรูปแบบต่าง ๆ [23]

| ลักษณะการไหล | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) |
|--|--|
| การพาความร้อนโดยธรรมชาติของอากาศ | 5 - 10 |
| เปลวไฟแบบราบเรียบของไม้ขีดไฟ | ~ 30 |
| เปลวไฟแบบปั่นป่วนจากกองเพลิง | ~ 30 |
| กลุ่มควันใต้เตา | 5 - 50 |
| การพาความร้อนโดยบังคับของอากาศที่ความเร็ว 2 m/s | ~ 10 |
| การพาความร้อนโดยบังคับของอากาศที่ความเร็ว 35 m/s | ~ 75 |

2.5.2 การนำความร้อน

การนำความร้อน (Heat Conduction) คือการเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัตถุ ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากฝั่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังฝั่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การสัมผัสกันระหว่างโมเลกุลของตัวกลางโดยที่อะตอมไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย เช่น การนำความร้อนของฮีตซิงก์ในคอมพิวเตอร์ หรือการนำความร้อนจากการเอามือจับวัตถุร้อน เป็นต้น การนำความร้อนเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) คือ

$$q'' = k \frac{dT}{dx}$$

โดย q'' คืออัตราการไหลของพลังงานความร้อน k คือสภาพนำความร้อน และ $\frac{dT}{dx}$ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ

สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) คือความสามารถในการนำความร้อนของตัวกลางแต่ละชนิด เช่น ตัวกลางที่เป็นโลหะมีสภาพนำความร้อนสูง ตัวกลางที่เป็นอโลหะมีสภาพนำความร้อนปานกลาง และตัวกลางที่เป็นอากาศหรือแก๊สมีสภาพนำความร้อนต่ำ เป็นต้น แสดงดังตาราง 4 เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโมเลกุลของแต่ละตัวกลางแตกต่างกัน ตัวกลางที่มีสภาพนำความร้อนสูงเรียกว่า ตัวนำความร้อน (Thermal Conductor) ขณะที่ตัวกลางนำความร้อนต่ำเรียกว่า ฉนวนความร้อน (Thermal Insulator)

ตาราง 4 สภาพการนำความร้อนของวัสดุต่าง ๆ [23]

| วัสดุ | สภาพการนำความร้อน ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) |
|-------------------|--|
| ทองแดง | 387 |
| เหล็ก | 45.8 |
| อิฐก่อสร้าง | 0.69 |
| คอนกรีต | 0.8 - 1.4 |
| แผ่นแก้ว | 0.76 |
| บอร์ดยิบซัม | 0.45 |
| พลาสติก PMMA | 0.19 |
| ไม้ไผ่ | 0.17 |
| แผงฉนวนความร้อน | 0.041 |
| Polyurethane foam | 0.034 |
| อากาศ | 0.026 |

2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) คือการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่างกันโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ หรือการแผ่รังสีของหลอดไฟ เป็นต้น วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute Zero) หรือ ศูนย์เคลวิน (Zero Kelvin) จะแผ่รังสีออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความเร็วของคลื่นเท่ากับความเร็วแสง ($\sim 3 \times 10^8$ m/s) ในสุญญากาศ และความถี่ของคลื่นความร้อนอยู่บริเวณช่วงต่ำกว่าแสงที่ตามองเห็น เรียกว่า ย่านความถี่อินฟราเรด (Infrared) ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของวัตถุที่ถูกแผ่รังสีมีความร้อนสูงขึ้น ความถี่ของคลื่นความร้อนก็จะสูงขึ้นด้วย ทำให้ความถี่ของการแผ่รังสีข้ามไปบริเวณที่แสงสามารถมองเห็นได้ การแผ่รังสีระหว่างวัตถุและสิ่งแวดล้อมสามารถพิจารณาเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ 1) เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อม วัตถุจะแผ่รังสีมากกว่ารับรังสี ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิลดลง 2) เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิต่ำกว่าสิ่งแวดล้อม วัตถุจะรับรังสีมากกว่าแผ่รังสี ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และ 3) เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อม อัตราการแผ่รังสีจะเท่ากับอัตราการรับรังสี ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิตั้งที่ การแผ่รังสีความร้อนเป็นไปตามกฎของสเตฟาน (Stefan's Law) คือ

$$\dot{q}'' = \sigma e T^4$$

โดย \dot{q}'' คืออัตราการไหลของพลังงานความร้อน σ คือค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลต์ซมานน์ (มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} W·m⁻²·K⁻⁴) e คือค่าสภาพการแผ่รังสี และ T คืออุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K)

สภาพการแผ่รังสี (Emissivity) คือคุณสมบัติของแต่ละพื้นผิววัตถุที่แผ่รังสี มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เช่น ผิวมันจะเป็นพื้นผิวที่แผ่รังสีได้ไม่ดี หรือผิวขรุขระและผิวสีดำจะเป็นพื้นผิวที่แผ่รังสีได้ดี เป็นต้น พื้นผิวที่ดูดกลืนรังสีทั้งหมดที่ตกกระทบ เรียกว่า วัตถุดำ (Black Body) มีค่าสภาพการแผ่รังสีเท่ากับ 1 จะมีพลังงานความร้อนที่แผ่รังสีออกมามากที่สุด เช่น ดวงอาทิตย์เป็นวัตถุสีดำที่ดูดกลืนและแผ่รังสีได้ทุกความยาวคลื่น เป็นต้น ขณะที่วัตถุทั่วไปที่มีค่าสภาพการแผ่รังสีน้อยกว่า 1 เรียกว่า วัตถุเทา (Gray Body) จะมีพลังงานความร้อนที่แผ่รังสีออกมาน้อยกว่าวัตถุสีดำ

อัคคีภัยหรือเพลิงไหม้คือการเผาไหม้ที่ไม่สามารถควบคุมได้ และไม่สามารถหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดอัคคีภัยได้ จากประเด็นดังกล่าวจึงมีการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน ตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างมีการลุกไหม้เป็นไฟ ส่งสัญญาณเพื่อเป็นการเตือนภัย หรือสั่งการเพื่อยุติเหตุก่อนเกิดอัคคีภัย

2.6 อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน

ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบตรวจจับอัคคีภัย (Fire Detection and Alarm System) เพื่อตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างมีการลุกไหม้เป็นไฟ ส่งสัญญาณเพื่อเป็นการเตือนภัยหรือสั่งการเพื่อยุติเหตุก่อนเกิดอัคคีภัย ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) อุปกรณ์เริ่มรับสัญญาณ 2) ตู้ควบคุม 3) อุปกรณ์แจ้งเตือน ดังแสดงในภาพประกอบ 10 ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นในส่วนของอุปกรณ์เริ่มรับสัญญาณหรืออุปกรณ์ตรวจจับความร้อน แบ่งคุณลักษณะในการใช้งานออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ 1) ตรวจจับความร้อนแบบกำหนดอุณหภูมิ (Fixed Temperature Type) ภายในมีแผ่นโลหะคู่ต่างชนิด (Bimetallic Strips) ที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวไม่เท่ากันเชื่อมประกบติดกัน อุปกรณ์จะทำงานเมื่ออุณหภูมิมากกว่าระดับที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ส่งผลให้เกิดการบิดตัวโค้งงอของแผ่นโลหะคู่ต้นหน้าสัมผัส (Contact) ให้แตะกัน เพื่อส่งสัญญาณแจ้งเหตุไปที่ส่วนควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 11 ข้อดีคือ มีความแม่นยำสูงในการตรวจจับความร้อน ฝุ่นหรือมลภาวะในอากาศไม่มีผลต่ออุปกรณ์ ซ่อมบำรุงน้อยครั้ง และราคาถูกกว่าอุปกรณ์ตรวจจับควัน แต่ข้อเสียคือ ความเร็วในการตอบสนองช้ากว่าอุปกรณ์ตรวจจับควัน และไม่สามารถตรวจจับผลผลิตของการเผาไหม้ 2) ตรวจจับความร้อนแบบใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Rate of Rise Type) ภายในประกอบด้วยแผ่นไดอะแฟรม (Diaphragm Plate) ห้องอากาศ (Air Chamber) และช่องลมขนาดเล็ก (Vent) สำหรับให้อากาศถ่ายเทที่อุณหภูมิปกติ อุปกรณ์จะทำงานเมื่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 5~15°C ภายใน 1 นาที โดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิเริ่มต้น อากาศภายในไม่สามารถถ่ายเทผ่านช่องลมได้ จึงเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วภายในห้องอากาศ ส่งผลให้แผ่นไดอะแฟรมต้นหน้าสัมผัสให้แตะกัน เพื่อส่งสัญญาณแจ้งเหตุไปที่ส่วนควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 12 ข้อดีคือ มีความเร็วในการตรวจจับความร้อนมากกว่าแบบกำหนดอุณหภูมิ ฝุ่นหรือมลภาวะในอากาศไม่มีผลต่ออุปกรณ์ ซ่อมบำรุงน้อยครั้ง และราคาถูกกว่าอุปกรณ์ตรวจจับควัน แต่ข้อเสียคือ ความเร็วในการตอบสนองช้ากว่าอุปกรณ์ตรวจจับควัน และไม่สามารถตรวจจับผลผลิตของการเผาไหม้ และ 3) ตรวจจับความร้อนโดยรวมคุณสมบัติของการกำหนดอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Combination Type) สำหรับตรวจจับความร้อนที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ ข้อดีคือ ความเร็วและความแม่นยำในการตรวจจับความร้อนสูงขึ้น แต่ข้อเสียคือ ความเร็วในการตอบสนองช้ากว่าอุปกรณ์ตรวจจับควัน และไม่สามารถตรวจจับผลผลิตของการเผาไหม้ อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอล และ 2) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์

2.6.1 อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอล

อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอล (Mechanical Heat Detectors) คืออุปกรณ์สำหรับฝ้าสังเกตอุณหภูมิในบริเวณจำกัด ส่งสัญญาณแจ้งเหตุเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างผิดปกติ หรือตรวจพบความร้อนสูง ดังแสดงในภาพประกอบ 13 อุปกรณ์ภายในประกอบด้วยโลหะที่ไม่สามารถคืนรูปได้ หลังจากทดสอบการทำงาน หรือตรวจจับความร้อนไปแล้ว ข้อดีของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอลคือ มีราคาถูกกว่าแบบอิเล็กทรอนิกส์ แต่ข้อเสียคือ หลังจากทดสอบการทำงาน หรือตรวจจับความร้อนไปแล้ว อุปกรณ์ภายในจะไม่คืนสู่สภาพเดิม ไม่สามารถนำมาใช้ตรวจจับความร้อนได้อีก



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 13 (ก), (ข) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแมคคานิคอล

(ที่มา: <https://www.a1securitycameras.com/>)

2.6.2 อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical Heat Detectors) คืออุปกรณ์สำหรับฝ้าสังเกตอุณหภูมิในบริเวณจำกัด ส่งสัญญาณแจ้งเหตุเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างผิดปกติ หรือตรวจพบความร้อนสูง ดังแสดงในภาพประกอบ 14 อุปกรณ์ภายในประกอบด้วยโลหะคืนรูปได้ หลังจากทดสอบการทำงาน หรือตรวจจับความร้อนไปแล้ว ข้อดีของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์คือ หลังจากทดสอบการทำงาน หรือตรวจจับความร้อนไปแล้ว อุปกรณ์ภายในจะคืนสู่สภาพเดิม สามารถนำมาใช้ตรวจจับความร้อนได้อีก



(ก)



(ข)

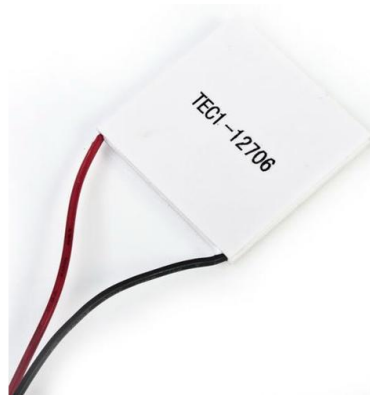
ภาพประกอบ 14 (ก), (ข) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนอิเล็กทรอนิกส์

(ที่มา: <http://aganfire.com/>)

อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบันจัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า สามารถชำระหรือเสียหายได้ในหลายกรณี ได้แก่ การติดตั้งที่ไม่ได้มาตรฐาน สายไฟชำระหรือหลุดจากจุดเชื่อมต่อ การลัดวงจรภายในระบบ ประกอบกับต้องมีผู้เชี่ยวชาญคอยเฝ้าระวังและซ่อมบำรุงอยู่เสมอ ข้อเสียดังกล่าวนี้เป็นปัญหาสำคัญของระบบแจ้งเหตุอัคคีภัยในปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้พลังงานทดแทนจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เปลี่ยนพลังงานความร้อนของอัคคีภัยเป็นพลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนเพื่อแจ้งเตือนเหตุ

2.7 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Devices) คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 15 เกิดจากปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูปพลังงาน 3 ปรากฏการณ์ ได้แก่ 1) ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) คือ กระแสไฟฟ้าจะเกิดการไหลในวงจร เมื่อเกิดความร้อนบริเวณรอยต่อของตัวนำไฟฟ้า 2 ชนิด 2) ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) คือ ความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าไหลบริเวณรอยต่อของตัวนำไฟฟ้า 2 ชนิด และ 3) ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect) คือ ทิศทางของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้า 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิต่างกัน



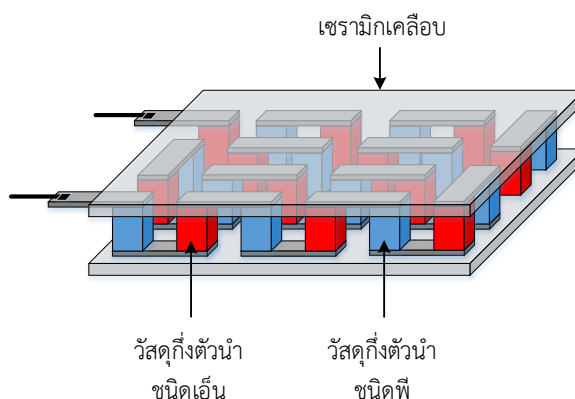
ภาพประกอบ 15 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials) เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างฝั่งที่รับความร้อน (Hot Side) และฝั่งเย็น (Cold Side) พบว่าจะมีการถ่ายเทความร้อนจากฝั่งอุณหภูมิสูงไปยังฝั่งอุณหภูมิต่ำกว่า โมเลกุลวัสดุจะเกิดการสั่น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะ (Carriers) ระหว่างอิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) เป็นผลให้เกิดพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อวัสดุ

เทอร์โมอิเล็กทริกมีแรงดันไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของตัวนำไฟฟ้า 2 ชนิด พบว่าจะมีการถ่ายเทแรงดันไฟฟ้า จากแรงดันไฟฟ้าสูงไปยังแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า เป็นผลให้เกิดให้เกิดความร้อน

2.7.1 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการรวมกันของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ชนิดพี (P-type) และชนิดเอ็น (N-type) จัดวางสลับกันเป็นคู่ แต่ละคู่จะเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าแบบอนุกรมด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Conductor) ในลักษณะของโมดูล (Thermoelectric module) ภายนอกประกอบด้วยแผ่นเซรามิก เพื่อป้องกันความร้อนเข้าสู่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยตรง ดังแสดงในภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 ส่วนประกอบของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

(ดัดแปลงจาก: <https://www.energiatermoambiente.com.br/>)

2.7.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

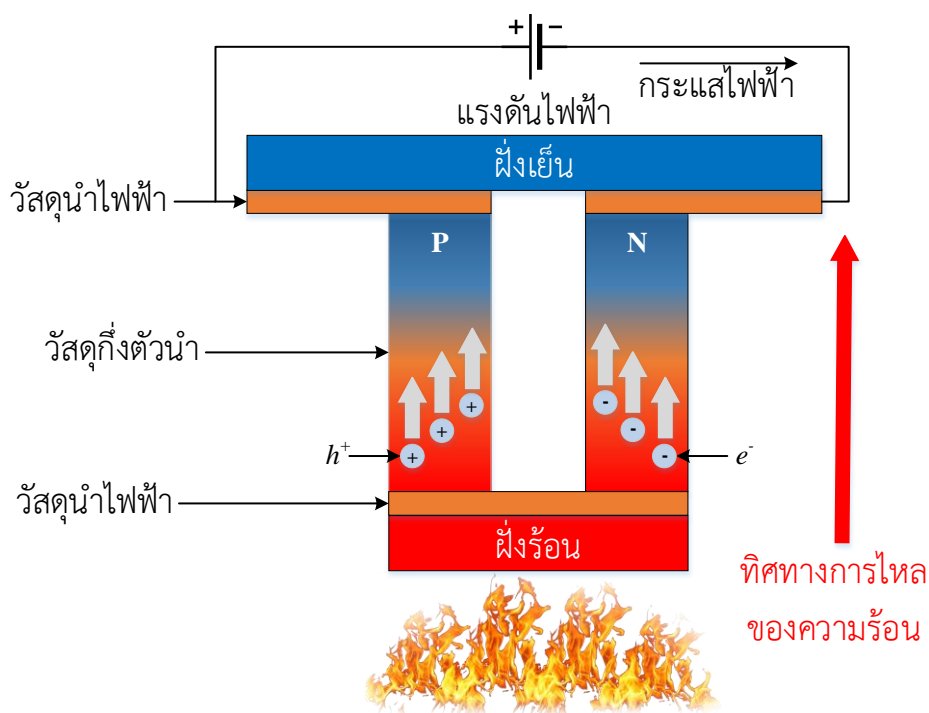
แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator) คือการทำให้อุณหภูมิระหว่างแผ่นเซรามิกด้านบนและด้านล่างของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแตกต่างกัน ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ตามปรากฏการณ์ซีเบค และเมื่อมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากโหลดไฟฟ้า (Load) จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 17 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกตามปรากฏการณ์ซีเบคสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_o = \alpha(T_h - T_c)$$

$$I = \frac{V_o}{R_L + R_G}$$

$$P_o = V_o I$$

โดย V_o คือแรงดันไฟฟ้า α คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค T_h คืออุณหภูมิฝั่งรับความร้อน T_c คืออุณหภูมิฝั่งเย็น I คือกระแสไฟฟ้า R_L คือความต้านทานของโหลดไฟฟ้า R_G คือความต้านทานในวงจร และ P_o คือกำลังไฟฟ้า



ภาพประกอบ 17 กระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นเทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และสามารถแก้ปัญหาอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบัน ในเรื่องของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนชำรุดหรือเสียหายระหว่างการตรวจจับความร้อน เพราะสูญเสียพลังงานไฟฟ้า

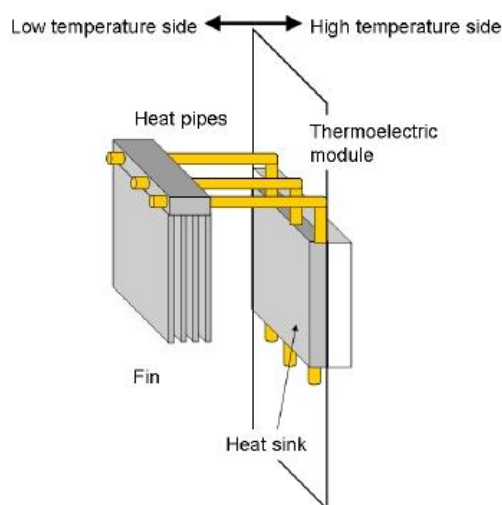
2.8 เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

งานวิจัยที่ผ่านมา มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงาน เพื่อเก็บหรือใช้พลังงานทดแทนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะแบ่งงานวิจัยที่ผ่านมาออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วย

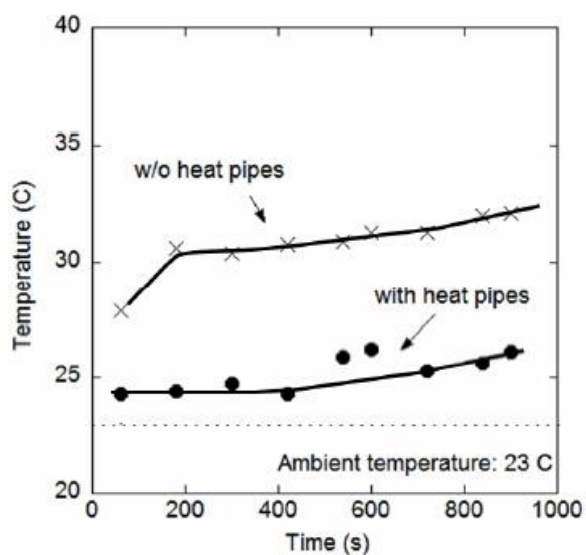
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับงานทั่วไป และ 2) เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน ตลอดจนสรุปข้อดีและข้อจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมา

2.8.1 เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับงานทั่วไป

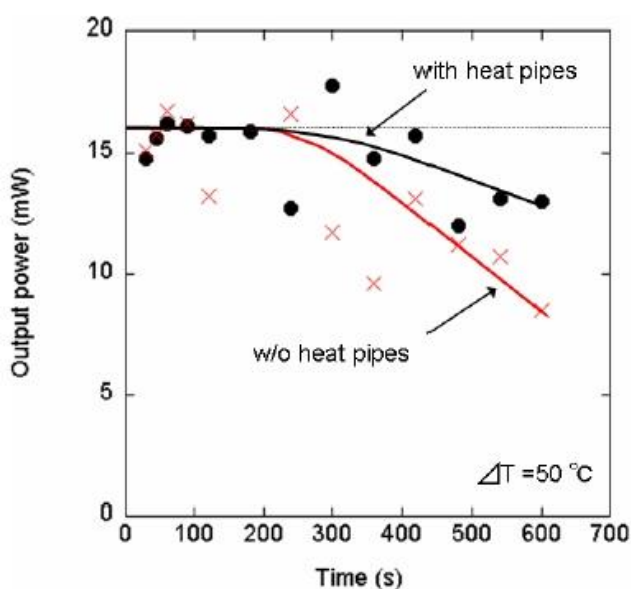
T. Ishiyama and H. Yamada [3] นำท่อความร้อน (Heat Pipes) ฮีตซิงก์ (Heat Sink) และอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ประกอบเข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 18 เพื่อแสดงว่าท่อความร้อนมีประสิทธิภาพในการลดความร้อนแก่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก และการเพิ่มจำนวนของท่อความร้อนมากขึ้น สามารถคงเสถียรภาพของค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้ ภาพประกอบ 19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้และไม่ใช้ท่อความร้อน ส่งผลให้สามารถคงเสถียรภาพของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 18 การระบายความร้อนบริเวณฝั่งเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก



(ก)

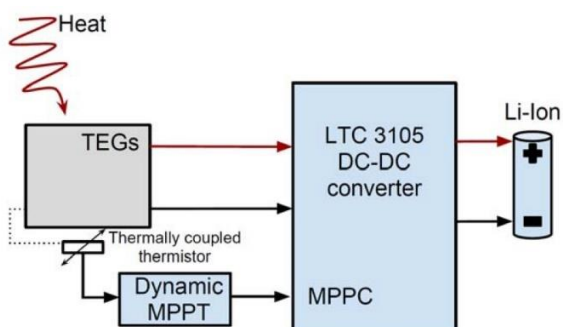


(ข)

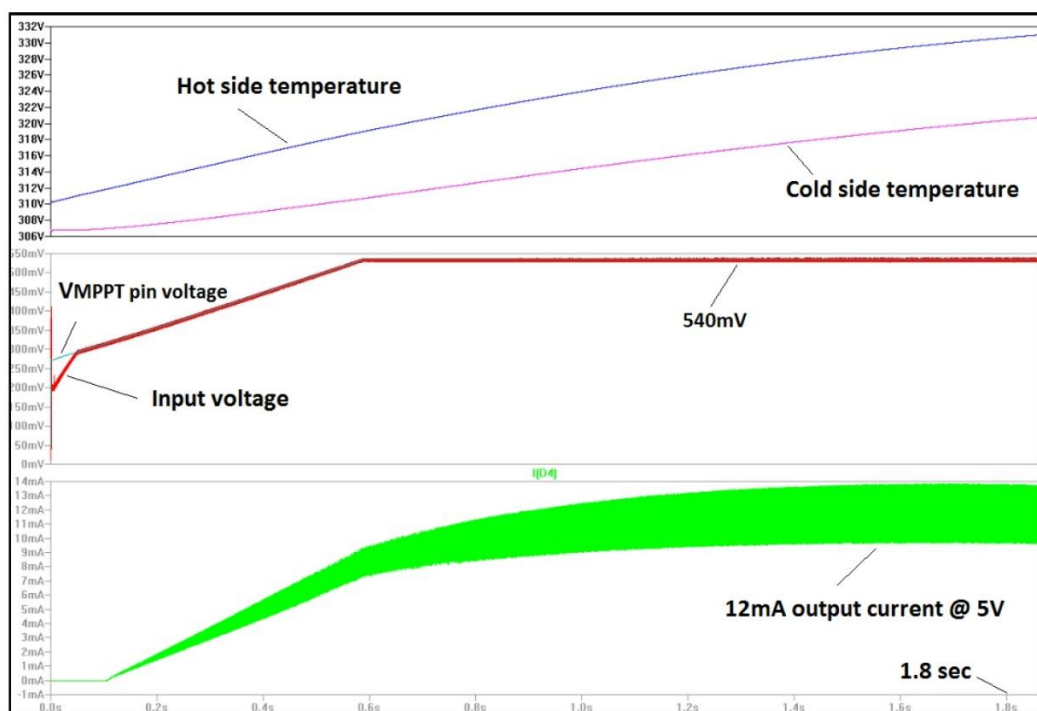
ภาพประกอบ 19 (ก) อุณหภูมิการระบายความร้อนกรณีใช้และไม่ใช้ท่อความร้อน (ข) กำลังไฟฟ้ากรณีใช้และไม่ใช้ท่อความร้อน

M. O. Cernaianu, C. Cirstea, and A. Gontean [4] นำระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบอัตโนมัติ (Autonomous Maximum Power Point Tracking) และวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก และเก็บไว้ในแบตเตอรี่ ดังแสดงในภาพประกอบ 20 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะถูกดึงออกมาจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 2 ตัว

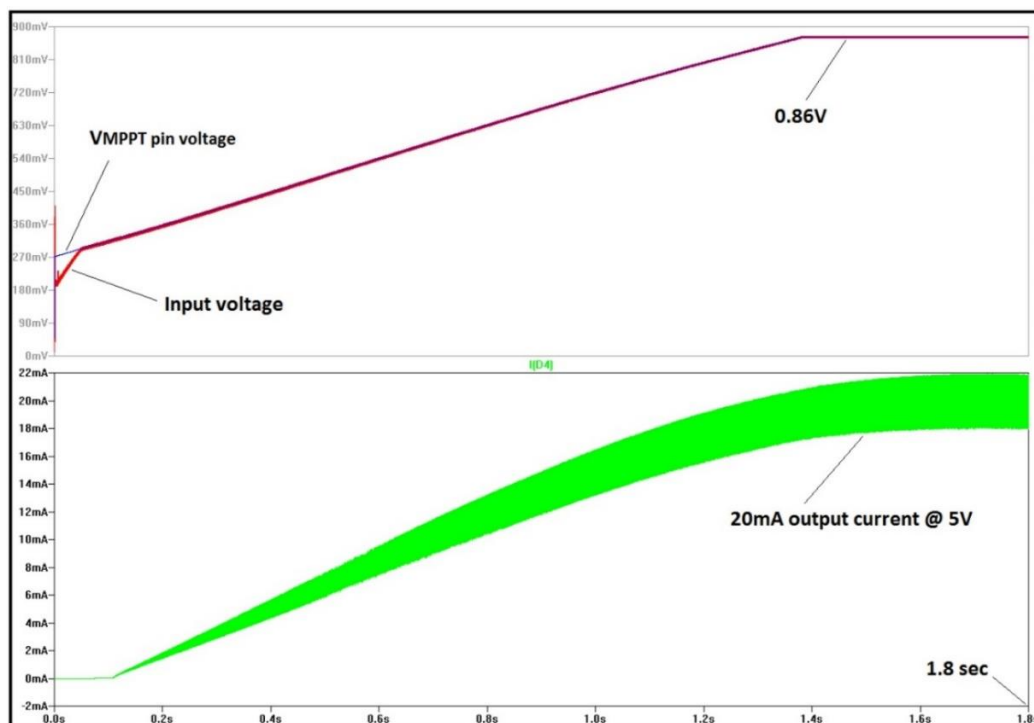
ภาพประกอบ 21 แสดงผลทดสอบที่อุณหภูมิฝั่งรับความร้อนเท่ากับ 310 K และ 328 K พบว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดัน 5 V เท่ากับ 12 mA และ 20 mA ตามลำดับ



ภาพประกอบ 20 กระบวนการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี



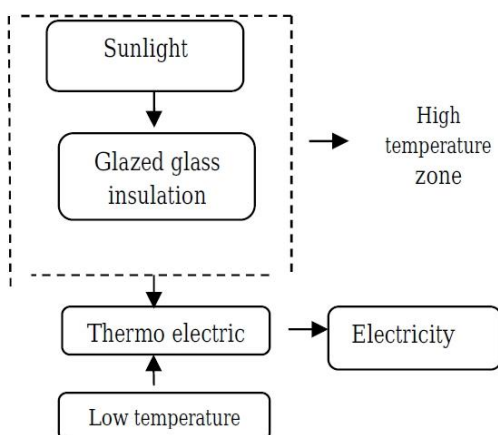
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 21 (ก) กราฟระหว่างอุณหภูมิ แรงดันขาเข้าของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบอัตโนมัติ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (ข) กราฟระหว่างแรงดันขาเข้าของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบอัตโนมัติ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด

T. Ilahi, M. Abid, and T. Ilahi [5] นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งบริเวณหลังคาบ้านในประเทศปากีสถาน เพื่อสรุปผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน ภาพประกอบ 22 แสดงกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยฝั่งรับความร้อนรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ ฝั่งเย็นระบายความร้อนด้วยเครื่องปรับอากาศภายในบ้าน อุณหภูมิระหว่างฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็น แสดงดังตาราง 5 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ประมาณ $40 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ในเดือนมิถุนายน

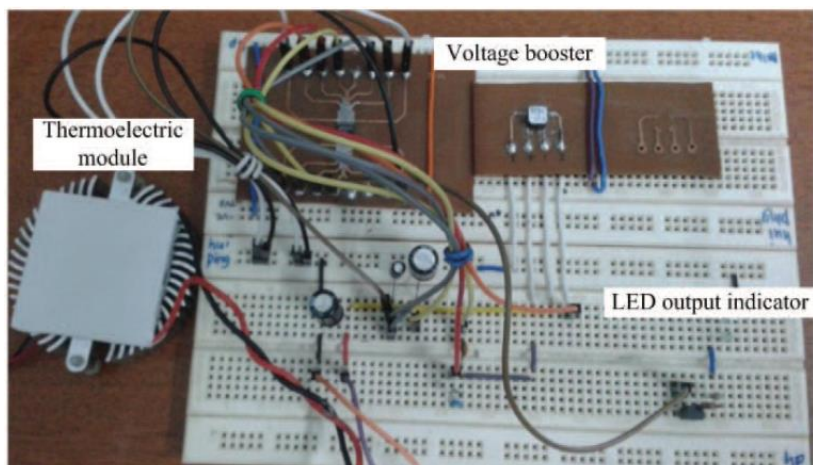


ภาพประกอบ 22 กระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งบริเวณหลังคาบ้าน

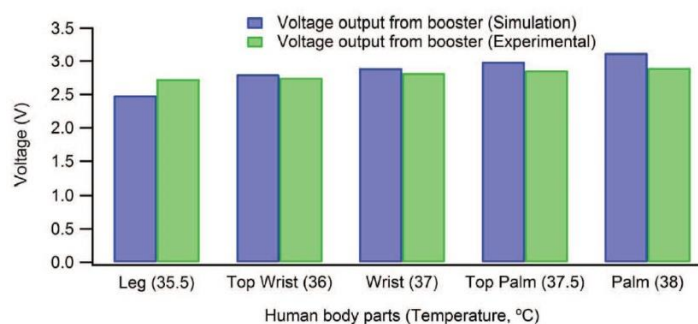
ตาราง 5 อุณหภูมิระหว่างฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละเดือน

| Month | Room Temperature T_c ($^{\circ}\text{C}$) | External Temperature T_H ($^{\circ}\text{C}$) | ΔT ($^{\circ}\text{C}$) |
|-------|---|---|-----------------------------------|
| Jan | 18 | 40 | 22 |
| Feb | 19 | 41 | 22 |
| March | 22* | 45 | 23 |
| April | 20* | 51 | 31 |
| May | 18* | 55 | 37 |
| June | 18* | 64 | 46 |
| July | 18* | 60 | 42 |
| Aug | 20* | 55 | 35 |
| Sep | 22* | 54 | 32 |
| Oct | 20 | 48 | 28 |
| Nov | 16 | 40 | 24 |
| Dec | 14 | 35 | 21 |

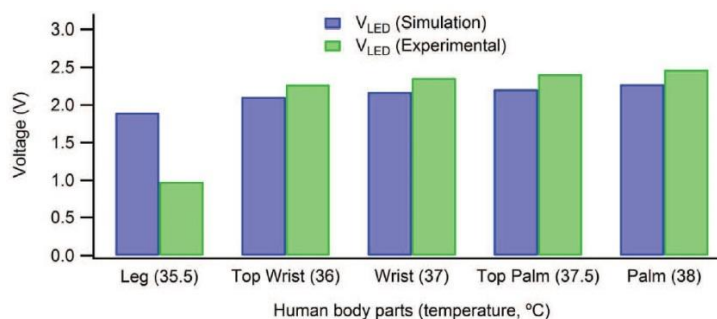
H. P. Wong and Z. Dahari [6] นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งบริเวณส่วนต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ ได้แก่ ขา ข้อมือด้านบนและด้านล่าง และฝ่ามือด้านบนและด้านล่าง ภาพประกอบ 23 แสดงวงจรที่ใช้การทดลองประกอบด้วยวงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้า LED และโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และ LED ดังแสดงในภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 23 วงจรการทดลองรับความร้อนส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย



(ก)

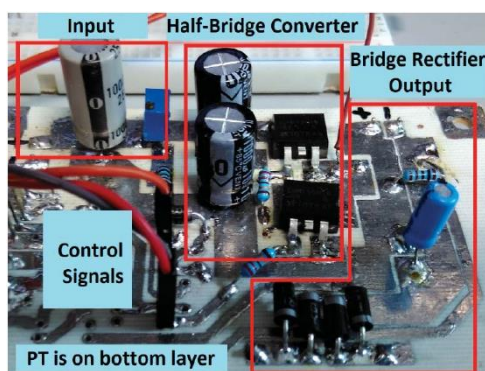


(ข)

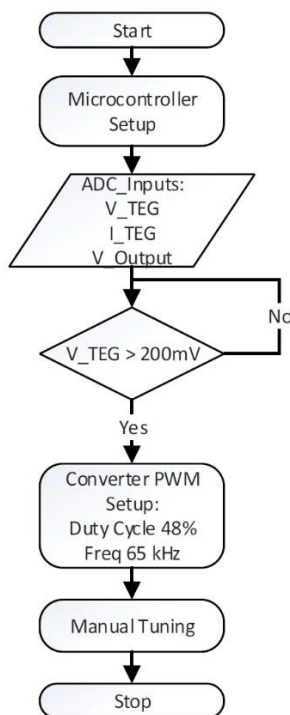
ภาพประกอบ 24 (ก) กราฟแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเพิ่มแรงดันของส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย (ข) กราฟแรงดันไฟฟ้า LED ของส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย

C. Correa-Betanzo, C. Lopez-Perez, A. Rodriguez, and A. Lopez-Nunez [7] นำหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกเพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น ภาพประกอบ 25 แสดงวงจรที่ใช้การทดลองประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 2 ตัว วงจรหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก และวงจรเรียงกระแสแบบ

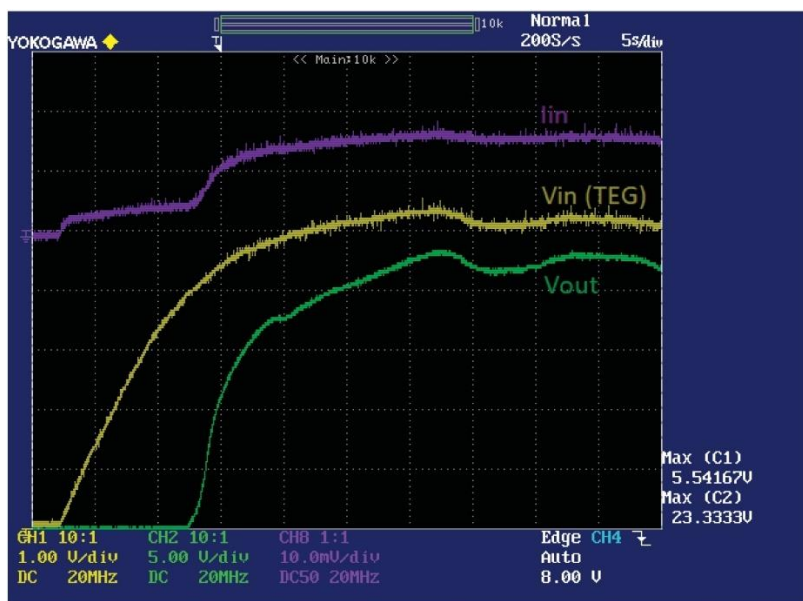
บริดจ์ ภาพประกอบ 26 แสดงผังงานการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่า 200 mV ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างคลื่น 62.5 kHz เป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจาก 5.5 V เพิ่มขึ้นเป็น 23.3 V และเมื่อเพิ่มความถี่เป็น 65 kHz เป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจาก 5.6 V เพิ่มขึ้นเป็น 25.8 V ดังแสดงในภาพประกอบ 27



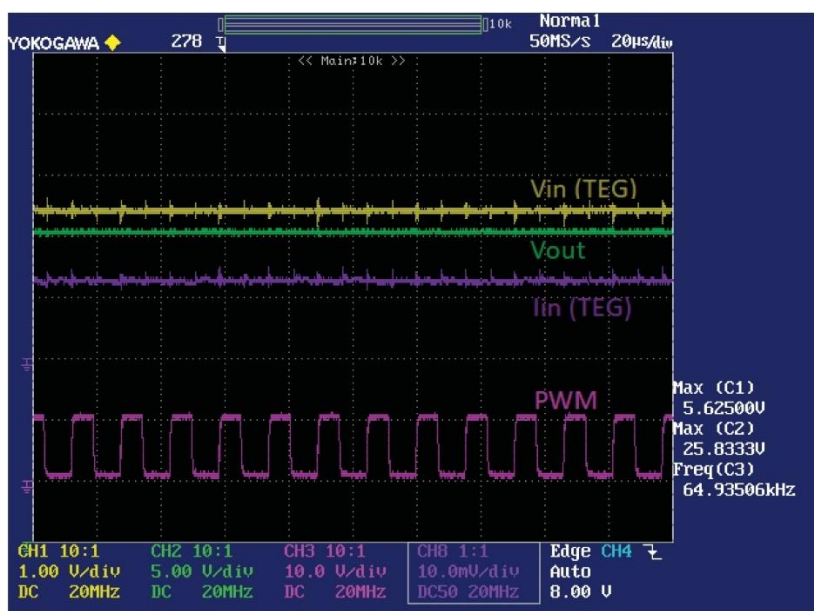
ภาพประกอบ 25 วงจรการทดลองแปลงผันแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 26 ผังงานการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า



(ก)

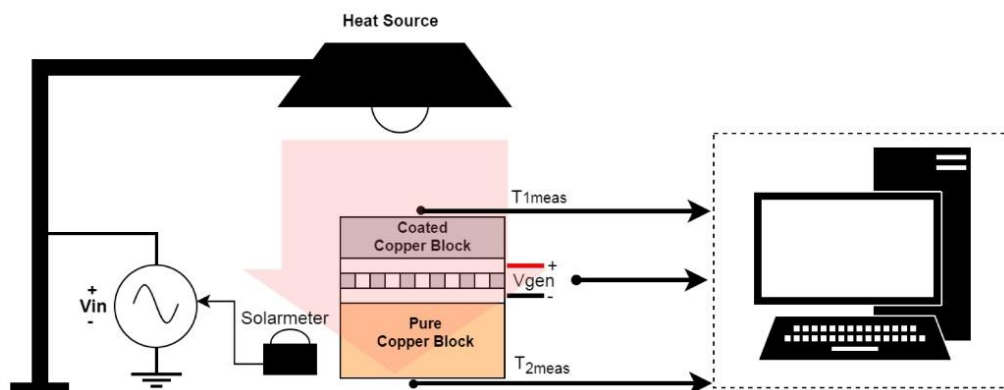


(ข)

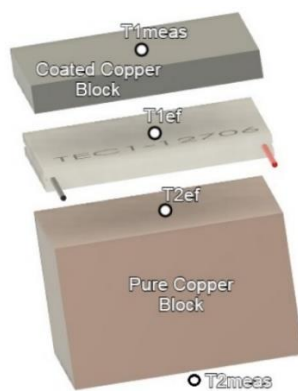
ภาพประกอบ 27 (ก), (ข) แรงดันไฟฟ้าที่วัดจากออสซิลโลสโคป

V. S. Oliveira, M. Miranda Camboim, B. A. Silva Guedes De Lima, C. Protasio De Souza, and O. Baiocchi [8] นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจัดวางในลักษณะที่แตกต่างกัน ได้แก่ แนวตั้ง และแนวนอน เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ เปรียบเทียบระหว่าง วันที่มีแสงแดด และวันที่มีเมฆมาก หลอดไฟฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงถูกใช้ในการทดลอง เนื่องจากแสงมีความคล้ายกับแสงแดดของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 28 เมื่อนำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

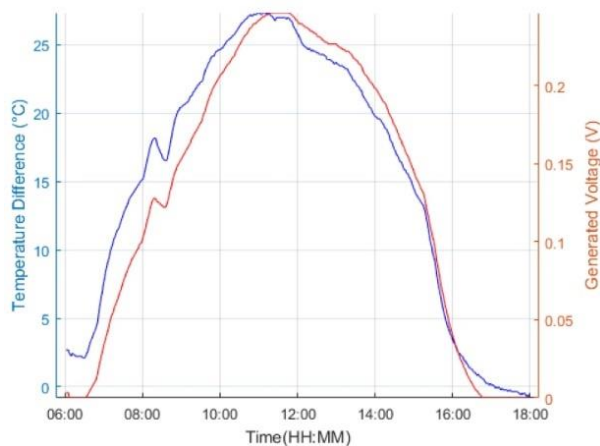
ริกจัตวางในแนวตั้ง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ในวันที่มีแสงแดด และวันที่มีเมฆมาก ดังแสดงในภาพประกอบ 29 และเมื่อนำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจัตวางในแนวนอน ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ในวันที่มีแสงแดด และวันที่มีเมฆมาก ดังแสดงในภาพประกอบ 30



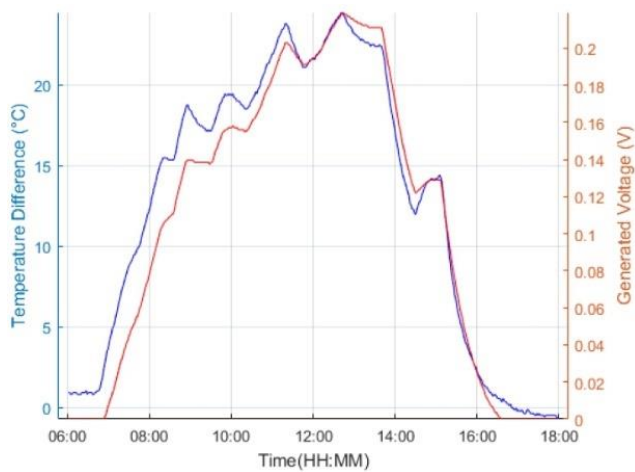
ภาพประกอบ 28 รูปแบบการทดลองด้วยหลอดไฟฮาโลเจน



(ก)

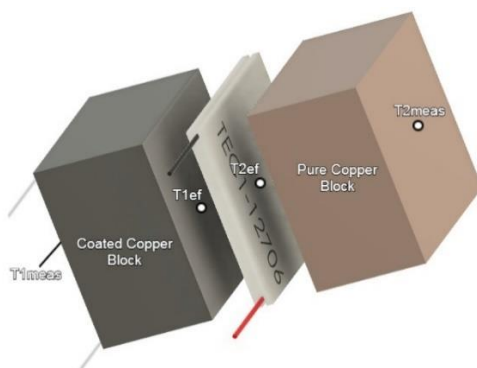


(ข)

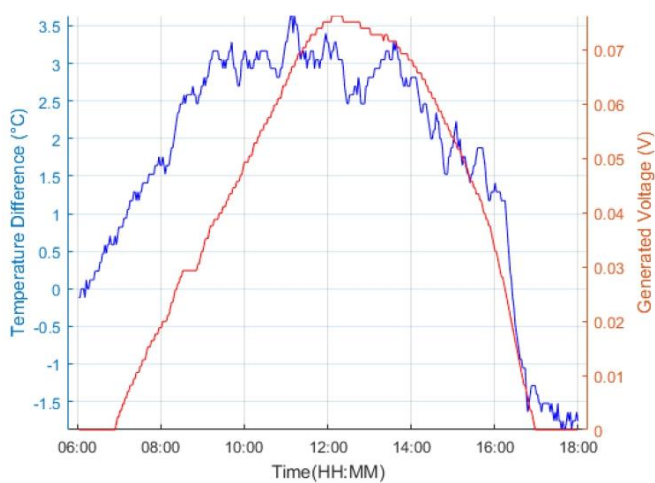


(ค)

ภาพประกอบ 29 (ก) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจัดวางในแนวตั้ง (ข) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีแสงแดดของการจัดวางในแนวตั้ง (ค) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีเมฆมากของการจัดวางในแนวตั้ง



(ก)



(ข)



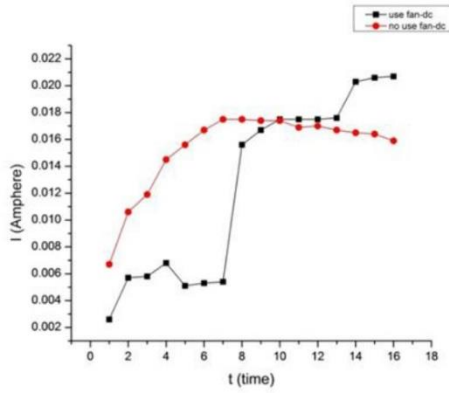
(ค)

ภาพประกอบ 30 (ก) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจัดวางในแนวนอน (ข) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีแสงแดดของการจัดวางในแนวนอน (ค) แรงดันไฟฟ้าในวันที่มีเมฆมากของการจัดวางในแนวนอน

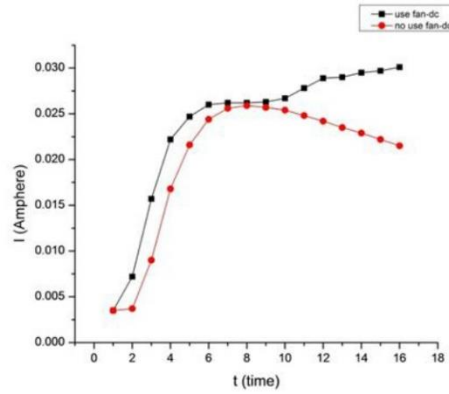
K. H. Mahmud, S. A. Yudistirani, and A. I. Ramadhan [9] วิเคราะห์อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ในกรณีใช้และใช้และไม่ใช้การระบายความร้อน เพื่อสรุปค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ภาพประกอบ 31 แสดงแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ทดสอบและวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 1 และ 2 ตัว ประกอบด้วย กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ตามลำดับดังแสดงในภาพประกอบ 32



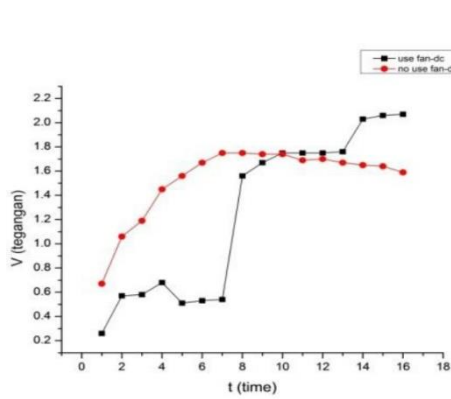
ภาพประกอบ 31 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำการทดลอง



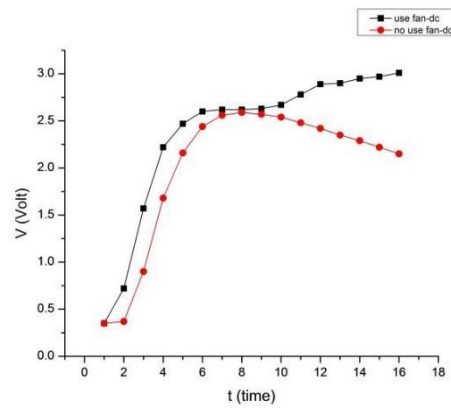
(ก)



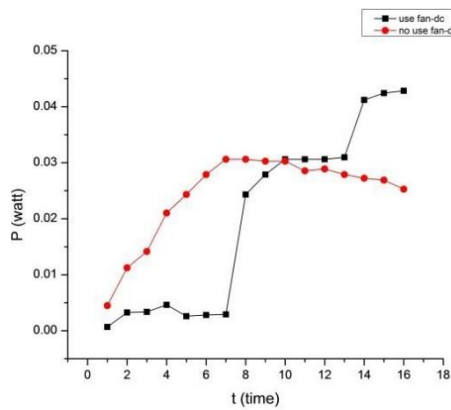
(ข)



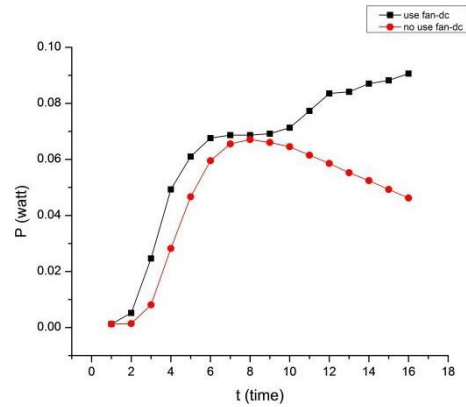
(ค)



(ง)



(จ)



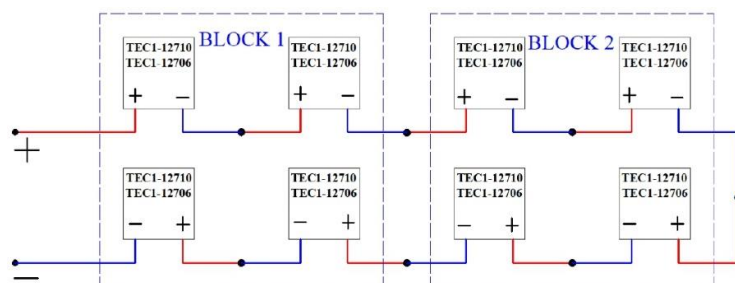
(ช)

ภาพประกอบ 32 (ก), (ข) กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ (ค), (ง) แรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ (จ), (ช) กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 1 และ 2 ตัว ตามลำดับ

A. Ağucaçayak *et al.* [11] นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 8 ตัวต่อวงจรในรูปแบบต่างกัน เพื่อสรุปค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า คุณสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 2 รุ่นระหว่าง TEC-12706 และ TEC1-12710 แสดงตาราง 6 ต่อวงจรอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 8 ตัวระหว่างต่อวงจรแบบอนุกรม ขนาน และแบบผสม วัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ขณะมีและไม่มีโหลดไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 33

ตาราง 6 คุณสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก 2 รุ่นระหว่าง TEC-12706 และ TEC1-12710

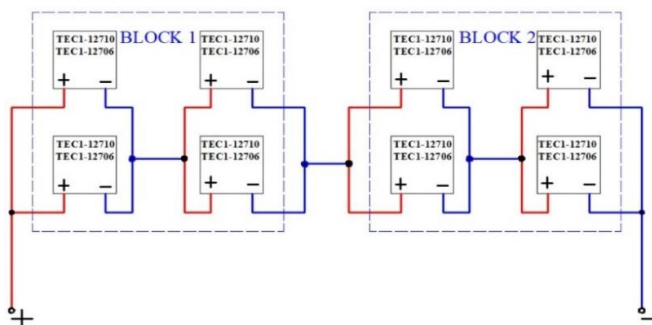
| Performance characteristics | TEC1-12706 | | TEC1-12710 | |
|-----------------------------|------------|------|------------|------|
| Hot Side Temperature (°C) | 25 | 50 | 25 | 50 |
| Qmax (Watt) | 50 | 57 | 85 | 96 |
| ΔT_{max} (°C) | 66 | 75 | 66 | 75 |
| I _{max} (Ampere) | 6,4 | 6,4 | 10,5 | 10,5 |
| V _{max} (Voltage) | 14,4 | 16,4 | 15,2 | 17,4 |
| Modul Resistance (Ohm) | 1,98 | 2,30 | 1,08 | 1,24 |



(ก)

| TEC1-12706 | | | | | | | |
|------------|------|----------|------|---------------|-------------|--------------|-----------|
| 1.BLOCK | | 2. BLOCK | | No-Load State | | Loaded State | |
| Heat | Cold | Heat | Cold | Voltage (V) | Voltage (V) | Current (A) | Power (W) |
| 70 | 19 | 73 | 19 | 15,56 | ? | ? | ? |
| TEC1-12710 | | | | | | | |
| 1.BLOCK | | 2. BLOCK | | No-Load State | | Loaded State | |
| Heat | Cold | Heat | Cold | Voltage (V) | Voltage (V) | Current (A) | Power (W) |
| 74 | 19 | 75 | 19 | 12,03 | 0,13 | 0,5 | 0,065 |

(ข)

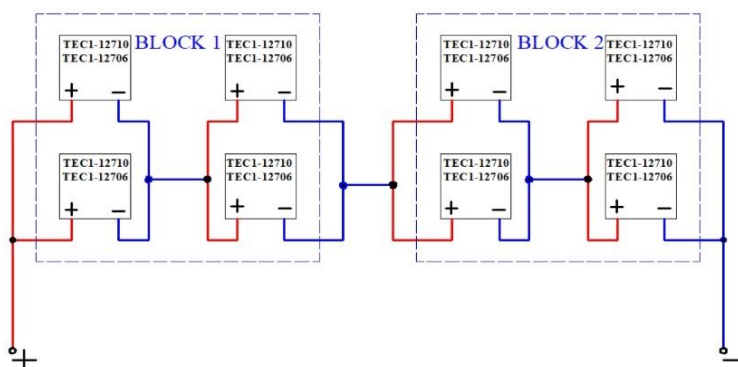


(ค)

| TEC1-12706 | | | | | | | |
|------------|------|----------|------|---------------|--------------|-------------|-----------|
| 1.BLOCK | | 2. BLOCK | | No-Load State | Loaded State | | |
| Heat | Cold | Heat | Cold | Voltage (V) | Voltage (V) | Current (A) | Power (W) |
| 74 | 21 | 74 | 22 | 8,2 | 0,09 | 0,35 | 0,032 |

| TEC1-12710 | | | | | | | |
|------------|------|----------|------|---------------|--------------|-------------|-----------|
| 1.BLOCK | | 2. BLOCK | | No-Load State | Loaded State | | |
| Heat | Cold | Heat | Cold | Voltage (V) | Voltage (V) | Current (A) | Power (W) |
| 71 | 19 | 72 | 21 | 5,56 | 0,24 | 0,9 | 0,216 |

(ง)



(จ)

| TEC1-12706 | | | | | | | |
|------------|------|----------|------|---------------|--------------|-------------|-----------|
| 1.BLOCK | | 2. BLOCK | | No-Load State | Loaded State | | |
| Heat | Cold | Heat | Cold | Voltage (V) | Voltage (V) | Current (A) | Power (W) |
| 73 | 19 | 71 | 19 | 8,96 | 0,22 | 0,72 | 0,158 |

| TEC1-12710 | | | | | | | |
|------------|------|----------|------|---------------|--------------|-------------|-----------|
| 1.BLOCK | | 2. BLOCK | | No-Load State | Loaded State | | |
| Heat | Cold | Heat | Cold | Voltage (V) | Voltage (V) | Current (A) | Power (W) |
| 71 | 19 | 71 | 19 | 5,79 | 0,27 | 0,97 | 0,262 |

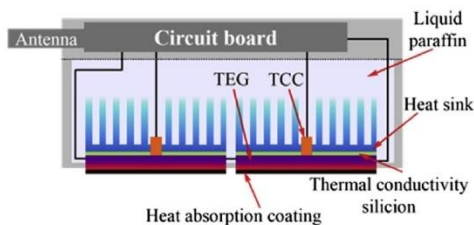
(ข)

ภาพประกอบ 33 (ก), (ข) การต่อวงจรในรูปแบบที่ 1 และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้ ตามลำดับ (ค), (ง) การต่อวงจรในรูปแบบที่ 2 และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้ ตามลำดับ (จ), (ข) การต่อวงจรในรูปแบบที่ 3 และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้ ตามลำดับ

งานวิจัยเทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับงานทั่วไป เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออก และการใช้พลังงานจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเป็นข้อดีที่สำคัญ แต่มีข้อจำกัดคือ ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลิตได้ ไม่เพียงพอต่อความต้องการสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับงานเฉพาะ เช่น ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับความร้อน เป็นต้น

2.8.2 เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน

Y. Shi *et al.* [12] นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเซนเซอร์ตรวจจับความร้อน ก่อนเกิดอัคคีภัยของเชื้อเพลิงหลายชนิด ภาพประกอบ 34 แสดงภายในและภายนอกของเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริก ทดสอบการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงหลายชนิด ได้แก่ ไม้ แอลกอฮอล์ ถ่านหิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซิน แก๊สรับความร้อนของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ขณะที่ฝั่งเย็นระบายความร้อนด้วยฮีตซิงก์ และซีฟี่ง (Paraffin) เพื่อดูดซับความร้อน ทำให้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อตอบสนองอย่างรวดเร็วก่อนเกิดอัคคีภัย ภาพประกอบ 35 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดความร้อนในแต่ละระยะทาง และระยะทางของเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริกตรวจจับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

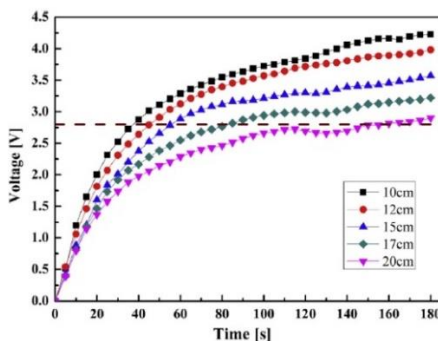


(ก)

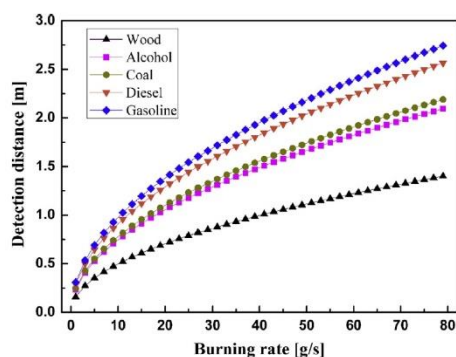


(ข)

ภาพประกอบ 34 (ก) อุปกรณ์ภายในเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริก (ข) อุปกรณ์ภายนอกเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริก



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 35 (ก) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดความร้อนในแต่ละระยะทาง (ข)

ระยะทางของเซนเซอร์เทอร์โมอิเล็กทริกตรวจจับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

งานวิจัย [12] มีข้อดีคือ ใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกอย่างเหมาะสม และสามารถตรวจจับอัคคีภัยได้อย่างถูกต้อง และแต่มีข้อจำกัดคือ การใช้ชี้ซึ่งเป็นวัสดุจากปิโตรเคมี ซึ่งไม่ได้มีอยู่ตามธรรมชาติ เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน ประกอบกับเมื่อชี้ซึ่งโดนความร้อนจนเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวจะทำให้ความสามารถในการดูดซับความร้อนลดลง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดประยุกต์ใช้เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน โดยใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงานเป็นเซนเซอร์ตรวจจับความร้อน ในขณะที่สามารถนำความร้อนที่ตรวจจับได้แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์แจ้งเตือนอัคคีภัย โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า ประกอบกับใช้ยางธรรมชาติ เป็นวัสดุระบายความร้อนบริเวณผิวยื่นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก จากวิธีการเสนอดังกล่าวอุปกรณ์สามารถตอบสนองรวดเร็วในการตรวจจับอัคคีภัย และถูกต้องแม่นยำ ไม่ใช้วัสดุสิ้นเปลือง และเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร รวมถึงแก้ปัญหาอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในปัจจุบัน โดยผู้วิจัยจะอธิบายหลักการอย่างละเอียดในบทต่อไป

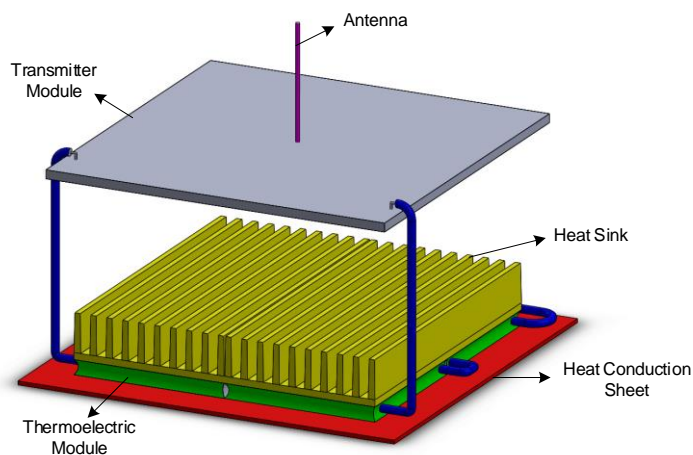
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

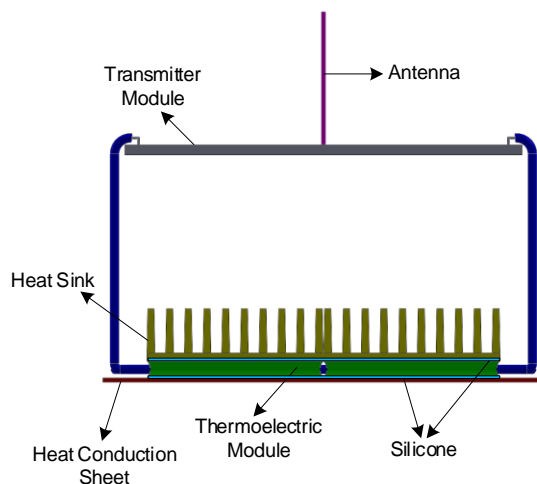
เนื้อหาบทนี้ผู้วิจัยจะอธิบายรายละเอียดเทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับการตรวจจับความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ 1) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน 2) ระบบตรวจจับความร้อน 3) กระบวนการตรวจจับความร้อน และ 4) การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน

3.1 อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน

จากข้อจำกัดของงานวิจัย [3] - [11] เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับงานทั่วไป แม้จะใช้พลังงานทดแทนจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก แต่เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ไม่เพียงพอต่อความต้องการสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมา [12] จึงใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับงานเฉพาะ เช่น ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับความร้อน เป็นต้น แต่ยังมีข้อจำกัดคือ การใช้ซีพิ้งซึ่งเป็นวัสดุจากปิโตรเคมี ซึ่งได้มีอยู่ตามธรรมชาติ เป็น การสิ้นเปลืองพลังงาน ประกอบกับเมื่อซีพิ้งโดนความร้อนจนเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวจะทำให้ความสามารถในการดูดซับความร้อนลดลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดประยุกต์ใช้เทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน โดยใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงานเป็นเซนเซอร์ตรวจจับความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 36 เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ในแต่ละส่วน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 36 (ก), (ข) ส่วนประกอบภายในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน

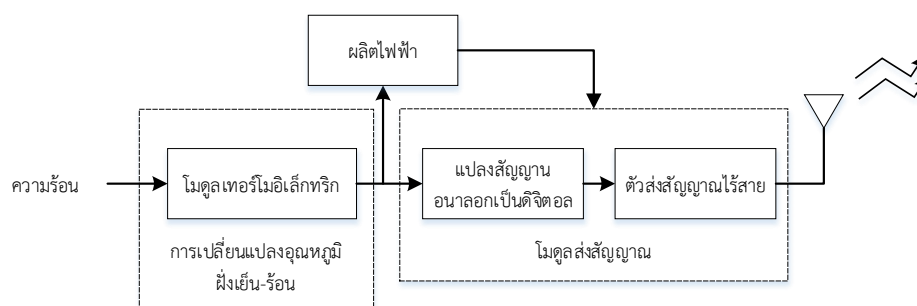
3.2 ระบบตรวจจับความร้อน

ระบบตรวจจับความร้อนด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) ภาคส่ง และ 2) ภาครับ ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

3.2.1 ภาคส่ง

ประกอบด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเซนเซอร์รับความร้อน และโมดูลส่งสัญญาณ ดังแสดงในภาพประกอบ 37

หลักการทำงานคือ เมื่อความร้อนส่งผ่านฝั่งรับความร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็นในทันที ทำให้เกิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะส่งให้แก่โมดูลส่งสัญญาณ ไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในทำการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และส่งสัญญาณไปยังเครือข่ายไร้สาย เพื่อส่งต่อไปที่ภาครับ



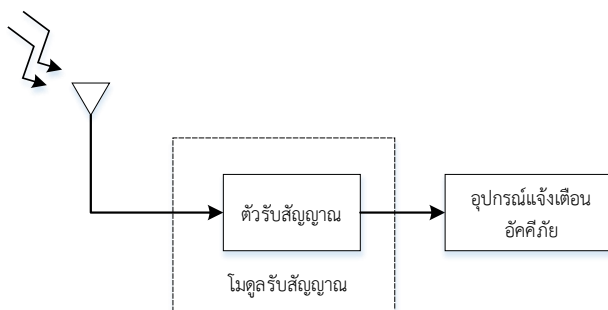
ภาพประกอบ 37 บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง

3.2.2 ภาครับ

ประกอบด้วยตัวรับสัญญาณ และอุปกรณ์แฉ่งเตือนอัคคีภัย ดังแสดงในภาพประกอบ

38

หลักการทำงานคือ สัญญาณที่ส่งมาจากภาครับจะเข้าสู่ตัวรับสัญญาณภายในโมดูลรับสัญญาณเครือข่ายสื่อสารไร้สาย จากนั้นส่งสัญญาณไปที่อุปกรณ์แฉ่งเตือนอัคคีภัย หรือเข้าสู่ส่วนควบคุมก่อนการแฉ่งเตือนอัคคีภัย การตรวจจับอัคคีภัยอย่างมีประสิทธิภาพเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ผู้วิจัยจะอธิบายอย่างละเอียดในขั้นตอนต่อไป



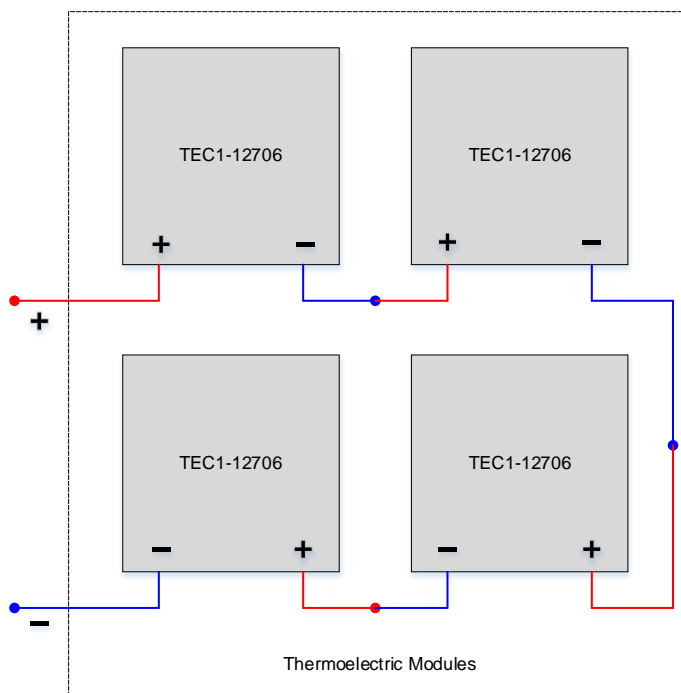
ภาพประกอบ 38 บล็อกไดอะแกรมภาครับ

3.3 กระบวนการตรวจจับความร้อน

เริ่มต้นพิจารณาคุนสมบัติอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยงานวิจัยนี้ใช้ TEC1-12706 ขนาด 40x40x3.8 มิลลิเมตร แสดงดังตาราง 7 จากนั้นพิจารณาการออกแบบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจากการต่อวงจรรูปแบบต่าง ๆ [11] มีผลต่อการตอบสนองของโมดูลส่งสัญญาณ และความเร็วในการแฉ่งเตือนอัคคีภัย โดยงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก จำนวน 4 ตัว ต่อวงจรแบบอนุกรม ดังแสดงในภาพประกอบ 39

ตาราง 7 คุณสมบัติอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC1-12706

| Performance Specification | TEC1-12706 | |
|---------------------------|------------|------|
| Hot Side Temperature (°C) | 25 | 50 |
| Qmax (W) | 50 | 57 |
| ΔT_{max} (°C) | 66 | 75 |
| I _{max} (A) | 6.4 | 6.4 |
| V _{max} (Vdc) | 14.4 | 16.4 |
| Module Resistance (Ohm) | 1.98 | 2.3 |



ภาพประกอบ 39 วงจรภายในโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

การต่อวงจรแบบอนุกรมของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 4 ตัว แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้สามารถเขียนเป็นสมการ

$$V_T = V_{O1} + V_{O2} + V_{O3} + V_{O4}$$

โดย V_T คือแรงดันไฟฟ้ารวม และ $V_{O1,2,3,4}$ คือแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

เมื่อใช้การระบายความร้อนด้วยฮีตซิงค์ขนาด 40x40x11 มิลลิเมตร ติดตั้งที่บริเวณฝั่งเย็น และเปิดช่องระบายอากาศบริเวณด้านข้างของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน แสดงในภาพประกอบ 40 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกให้สามารถตอบสนองเร็วยิ่งขึ้น

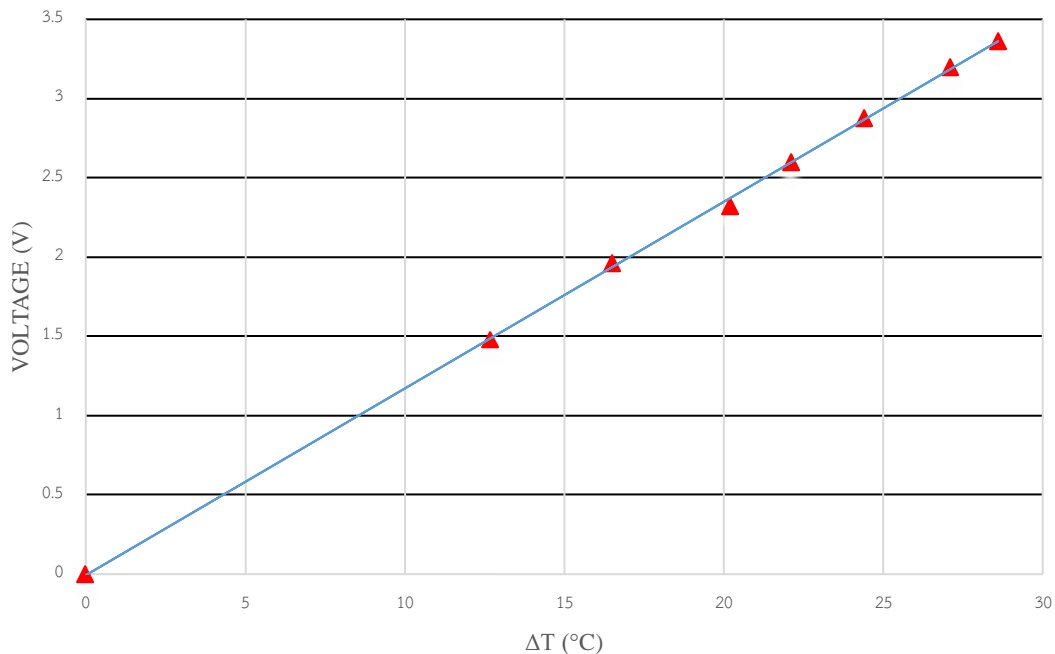


ภาพประกอบ 40 ภายนอกอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน

เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ($27\text{ }^{\circ}\text{C}$) และให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอจาก $0 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ บริเวณฝั่งรับความร้อนของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน ผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็น และแรงดันไฟฟ้า แสดงดังตาราง 8 และกราฟในภาพประกอบ 41

ตาราง 8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็น และแรงดันไฟฟ้า

| อุณหภูมิฝั่งร้อน ($^{\circ}\text{C}$) | อุณหภูมิฝั่งเย็น ($^{\circ}\text{C}$) | ผลต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น ($^{\circ}\text{C}$) | แรงดันไฟฟ้า (V) |
|--|--|--|--------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49.9 | 37.2 | 12.7 | 1.48 |
| 55.3 | 38.8 | 16.5 | 1.96 |
| 60.4 | 40.2 | 20.2 | 2.32 |
| 66.1 | 44 | 22.1 | 2.6 |
| 70.7 | 46.3 | 24.4 | 2.88 |
| 75.6 | 48.5 | 27.1 | 3.2 |
| 81.2 | 52.6 | 28.6 | 3.36 |



ภาพประกอบ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิฝั่งรับความร้อนและฝั่งเย็น และ แรงดันไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 41 ความแตกต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุดจะเท่ากับ $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่แรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 3 V จะทำให้โมดูลส่งสัญญาณไร้สายเริ่มทำงาน และส่งสัญญาณแจ้งเตือนอัคคีภัย จากการทดลองสามารถหา V_T ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) จากสมการ

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\hat{y} = a + bx$$

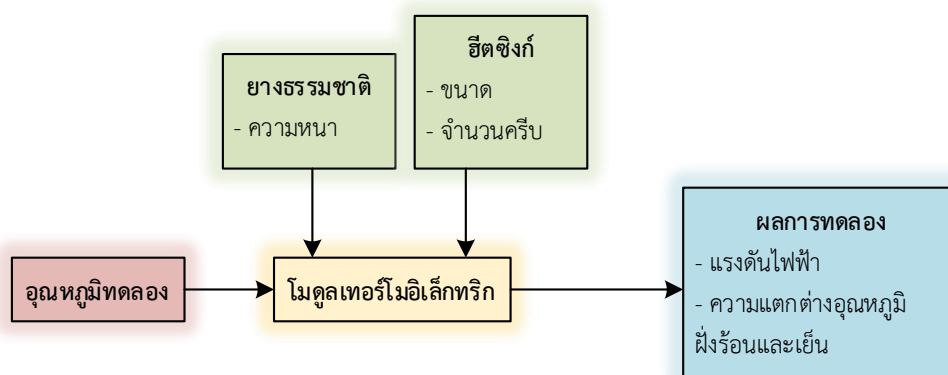
ดังนั้นสมการ V_T คือ

$$V_T = -0.0067 + 0.1178\Delta T$$

จากการทดลองแสดงให้เห็นการตอบสนองของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุดเท่ากับ $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อขับเคลื่อนโมดูลส่งสัญญาณไร้สาย โดยฝั่งเย็นระบายความร้อนด้วยอากาศที่เป็นฉนวนความร้อน [23] และฮีตซิงก์ขนาด $40\times 40\times 11$ มิลลิเมตร ในสถานการณ์จริงเมื่อนำอุปกรณ์ไปติดตั้งบริเวณที่เกิดอัคคีภัย อากาศบริเวณโดยรอบจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้อุปกรณ์ตอบสนองค่อนข้างช้า อาจเกิดการขัดข้อง และไม่สามารถแจ้งเตือนอัคคีภัย เนื่องจากอุณหภูมิฝั่งเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน

เนื่องจากอากาศเป็นตัวกลางที่เป็นฉนวนความร้อน ผู้วิจัยจึงศึกษาความเป็นไปได้ของยางธรรมชาติซึ่งมีสภาพการนำความร้อน $0.35\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [25] ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับซีฟิ่งที่มีสภาพการนำความร้อน $0.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [12] ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญและถูกพิจารณาเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนเนื่องจากมีคุณสมบัติการนำความร้อนและฉนวนความร้อนที่ดี สามารถป้องกันความร้อนจากภายนอกเนื่องจากคุณสมบัติฉนวนความร้อน และสามารถนำความร้อนที่ฝั่งระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกในขณะเดียวกัน ภาพประกอบ 42 แสดงการออกแบบการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน โดยนำฮีตซิงก์ที่มีขนาดและความสูงของครีบบแตกต่างกันเคลือบด้วยยางธรรมชาติที่มีความหนาแตกต่างกัน ทดลองให้ความร้อนในระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นสรุปผลอุณหภูมิฝั่งร้อนและฝั่งเย็น ความแตกต่างของอุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4



ภาพประกอบ 42 การทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน

บทที่ 4

การทดลองและผลการวิจัย

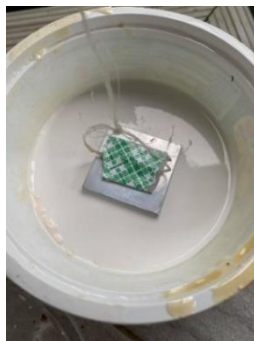
เนื้อหาบทนี้แสดงผลการทดลองและแสดงผลของวิธีนำเสนอ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) กระบวนการทดลองใช้ยาลดอุณหภูมิบริเวณผนังเย็นของฮีตซิงก์ 2) การทดลองการใช้ยาลดอุณหภูมิของฮีตซิงก์ และ 3) ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผนังร้อนและเย็นและแรงดันไฟฟ้า

4.1 กระบวนการทดลองใช้ยาลดอุณหภูมิบริเวณผนังเย็นของฮีตซิงก์

เนื้อหาส่วนนี้แสดงการเคลื่อนย้ายบริเวณผนังเย็นของฮีตซิงก์และการปรับความหนาของยางประกอบฮีตซิงก์เข้ากับเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อสร้างโมดูลทดลอง และระบบที่นำเสนอ

4.1.1 การเคลื่อนย้ายบริเวณผนังเย็นของฮีตซิงก์และการปรับความหนาของยาง

การเคลื่อนย้ายทำโดยเทน้ำยางธรรมชาติลงในภาชนะที่เตรียมไว้ จากนั้นจุ่มฮีตซิงก์ลงในภาชนะและนำมาตากให้แห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 43 เมื่ออยู่ที่เกาะบนครีบบนค้ำแล้ว ทำการจุ่มอีกรอบเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ ดังแสดงในภาพประกอบ 44 และภาพประกอบ 45 แสดงโมเดลแสดงการปรับความหนาของยางขนาดต่างกัน ได้แก่ 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

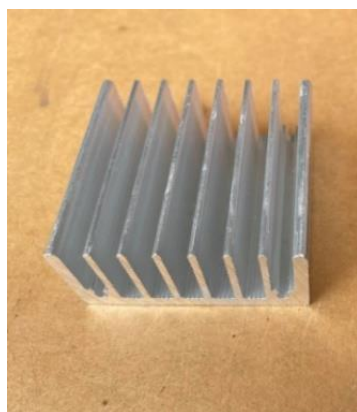


(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 43 (ก), (ข) การเคลื่อนย้ายบนครีบบฮีตซิงก์



(ก)

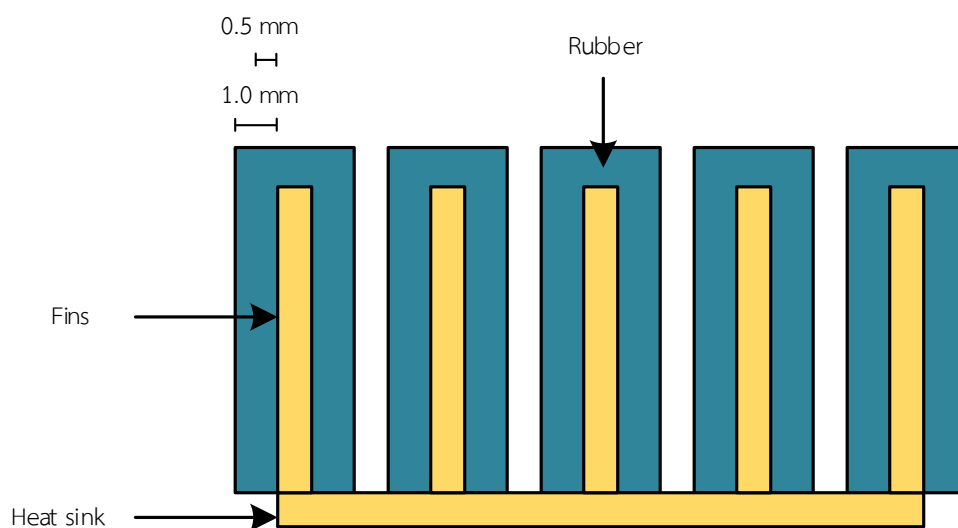


(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 44 (ก), (ข), (ค) ความหนาของยางที่ 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ



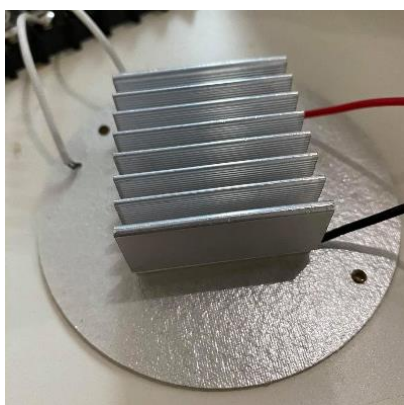
ภาพประกอบ 45 โมเดลแสดงการปรับความหนาของยางขนาดต่างกัน

4.1.2 การประกอบฮีตซิงก์เข้ากับเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อสร้างโมดูลทดลอง

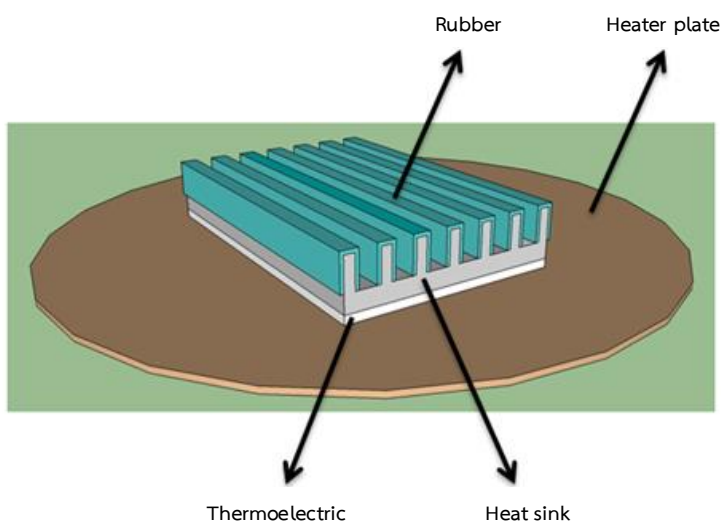
เพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนโดยทาซิลิโคนนำความร้อนบริเวณหน้าสัมผัสของฮีตซิงก์และเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่งร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 46 จากนั้นประกอบอุปกรณ์ทั้งสองเข้าด้วยกัน และนำมาวางบนแผ่นทำความร้อนเพื่อสร้างโมดูลทดลอง ดังแสดงในภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 46 ทาซิลิโคนนำความร้อนบริเวณหน้าสัมผัส



(ก)



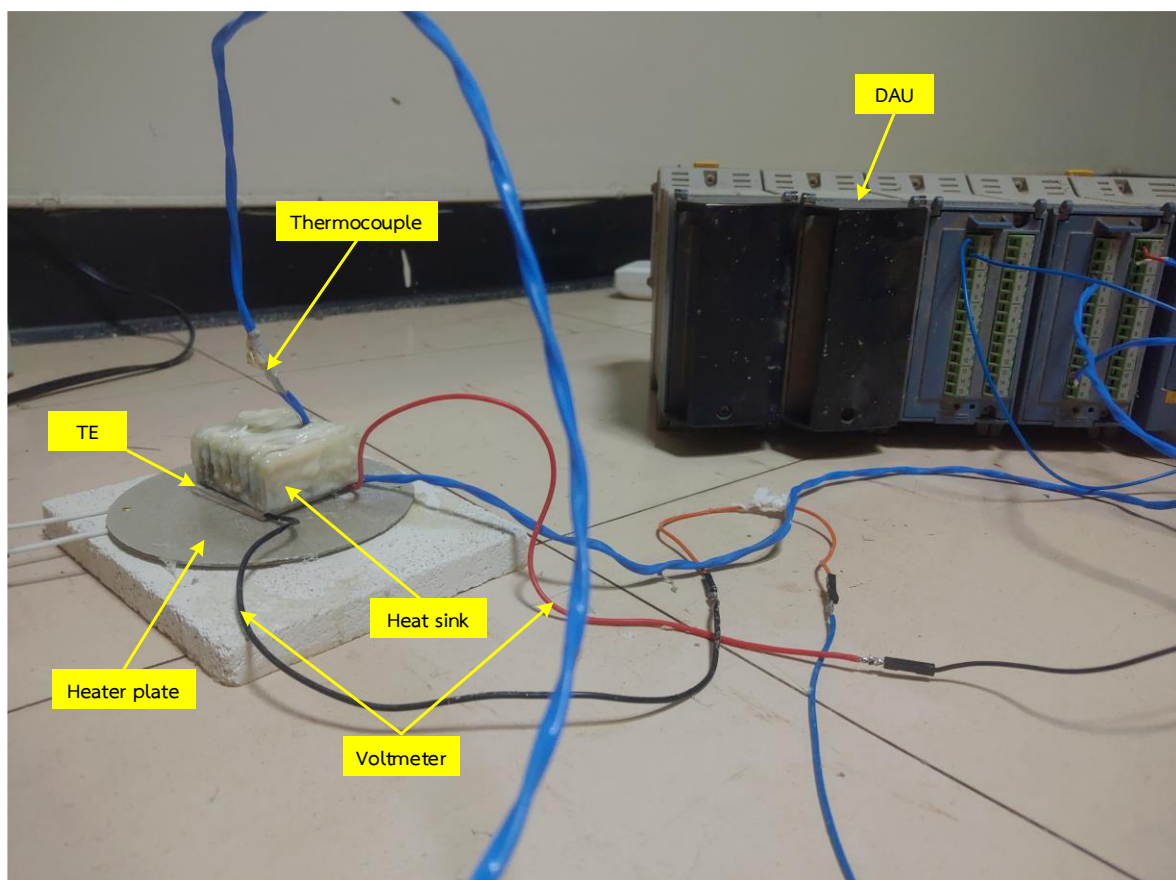
(ข)

ภาพประกอบ 47 (ก) โมดูลทดลองจริง (ข) จำลองโมดูลทดลอง 3 มิติ

4.1.3 ระบบที่นำเสนอ

ภาพประกอบ 48 แสดงระบบที่นำเสนอประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ส่วนทดลอง ประกอบด้วย ฮีตซิงก์เคลือบยางประกอบกับเทอร์โมอิเล็กทริกบนแผ่นทำความร้อน และ 2) ส่วนการวัดค่าพารามิเตอร์ ประกอบด้วย เครื่องบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิ (DAU : Data Acquisition Unit) แสดงผลด้วยซอฟต์แวร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์

การทดลองเริ่มจากสร้างความร้อนบนแผ่นนำความร้อนอุณหภูมิ 0 – 100 °C เกิดการนำความร้อนระหว่างแผ่นนำความร้อนและเทอร์โมอิเล็กทริกบริเวณฝั่งร้อน ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณฝั่งร้อนและเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นความร้อนจะพยายามปรับสมดุลระหว่างฝั่งร้อนและเย็น ดังนั้นครีบบนฮีตซิงก์ที่บริเวณฝั่งเย็นจะช่วยระบายความร้อนโดยการนำความร้อนเข้าสู่ยางที่เคลือบไว้ ขณะที่เครื่องบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิทำหน้าที่บันทึกผลการทดลองที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 – 90 วินาที



ภาพประกอบ 48 องค์ประกอบของระบบที่นำเสนอ

4.2 การทดลองการใช้ยางดูดซับความร้อนของฮีตซิงก์

การทดลองจะใช้ฮีตซิงก์ขนาดและจำนวนครีบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบบ และ 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ และความหนาของยางเคลือบบนครีบบฮีตซิงก์ ได้แก่ 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร สรุปการทดลองในกรณีต่าง ๆ ได้ดังนี้

- กรณีที่ 1 การทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบบ โดยไม่เคลือบยาง
- กรณีที่ 2 การทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบบ โดยเคลือบยางหนา 0.5 มิลลิเมตร
- กรณีที่ 3 การทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบบ โดยเคลือบยางหนา 1.0 มิลลิเมตร
- กรณีที่ 4 การทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยไม่เคลือบยาง
- กรณีที่ 5 การทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยเคลือบยางหนา 0.5 มิลลิเมตร
- กรณีที่ 6 การทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยเคลือบยางหนา 1.0 มิลลิเมตร

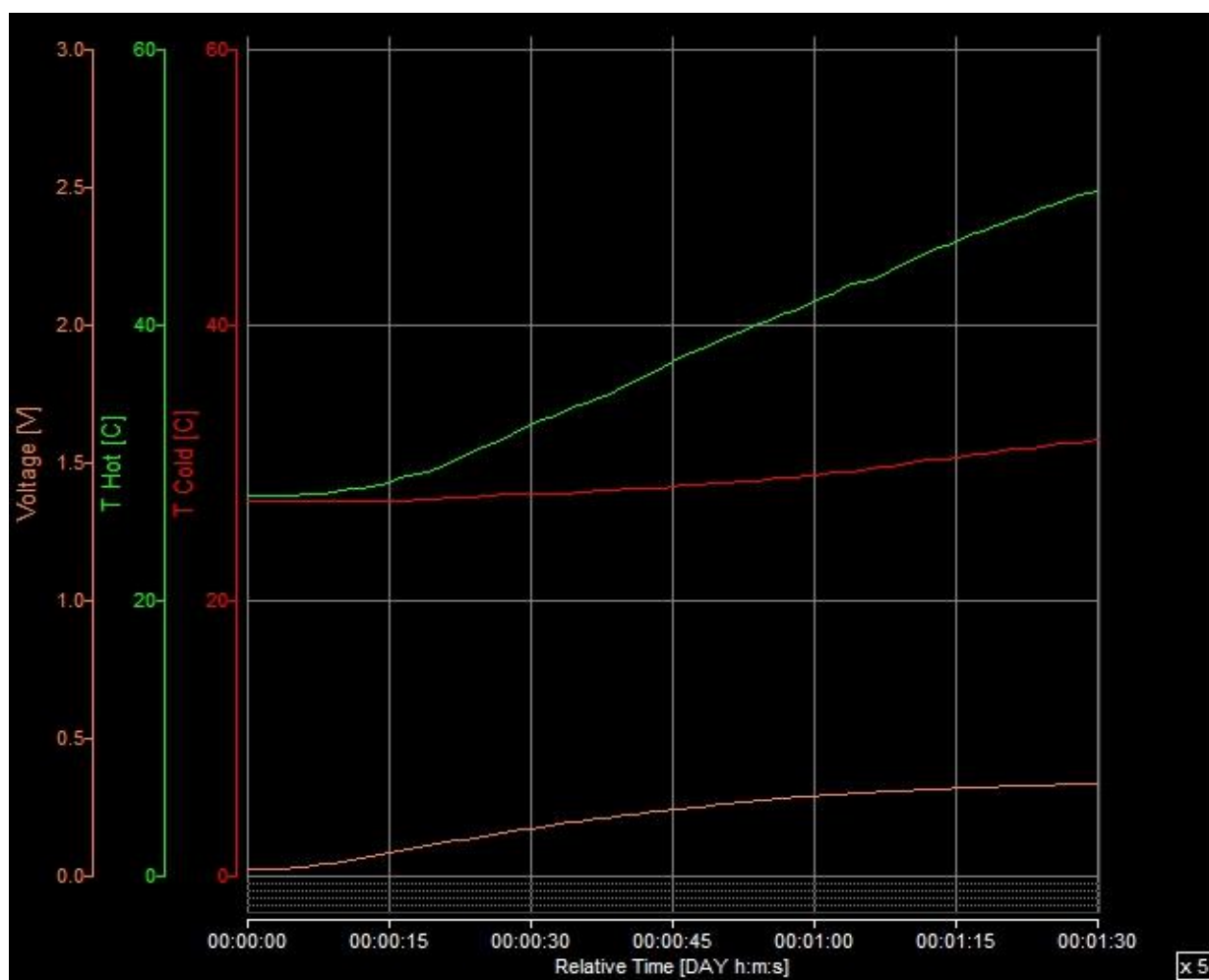
4.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์

จากการให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ 0 – 100 °C แก่โมดูลทดลองเป็นเวลา 90 วินาที ผู้วิจัยสามารถบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิด้วยซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อสรุปและแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิฝั่งร้อน อุณหภูมิฝั่งเย็น ความแตกต่างของอุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

4.3.1 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยไม่เคลือบ

ยาง

ภาพประกอบ 49 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยไม่เคลือบยาง เมื่อพิจารณาวินาทีที่ 90 พบว่า อุณหภูมิฝั่งร้อน 49.8 °C อุณหภูมิฝั่งเย็น 31.7 °C ความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น 18.1 °C และแรงดันไฟฟ้า 0.34 V

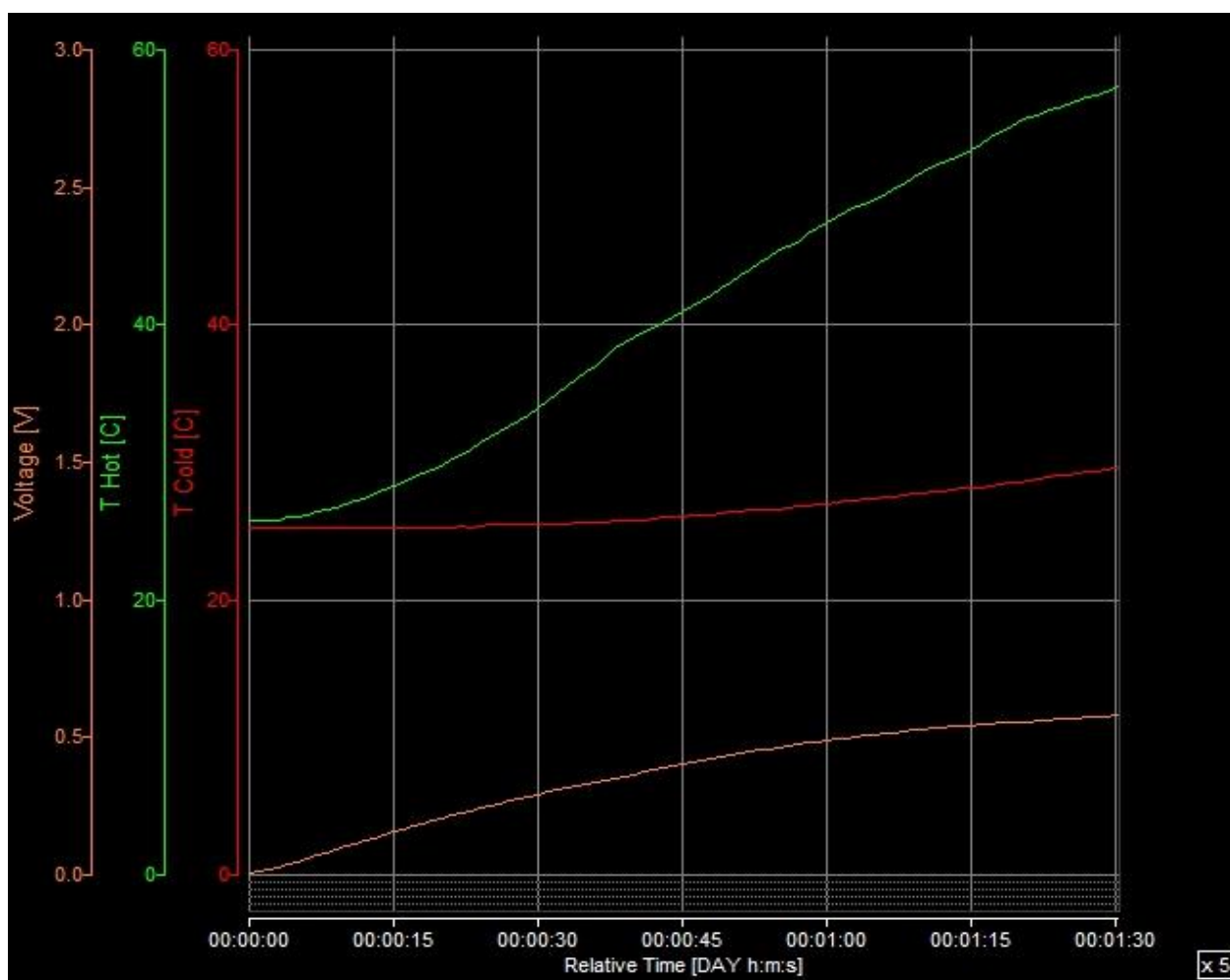


ภาพประกอบ 49 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยไม่เคลือบ

ยาง

4.3.2 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยเคลือบ ยางหนา 0.5 มิลลิเมตร

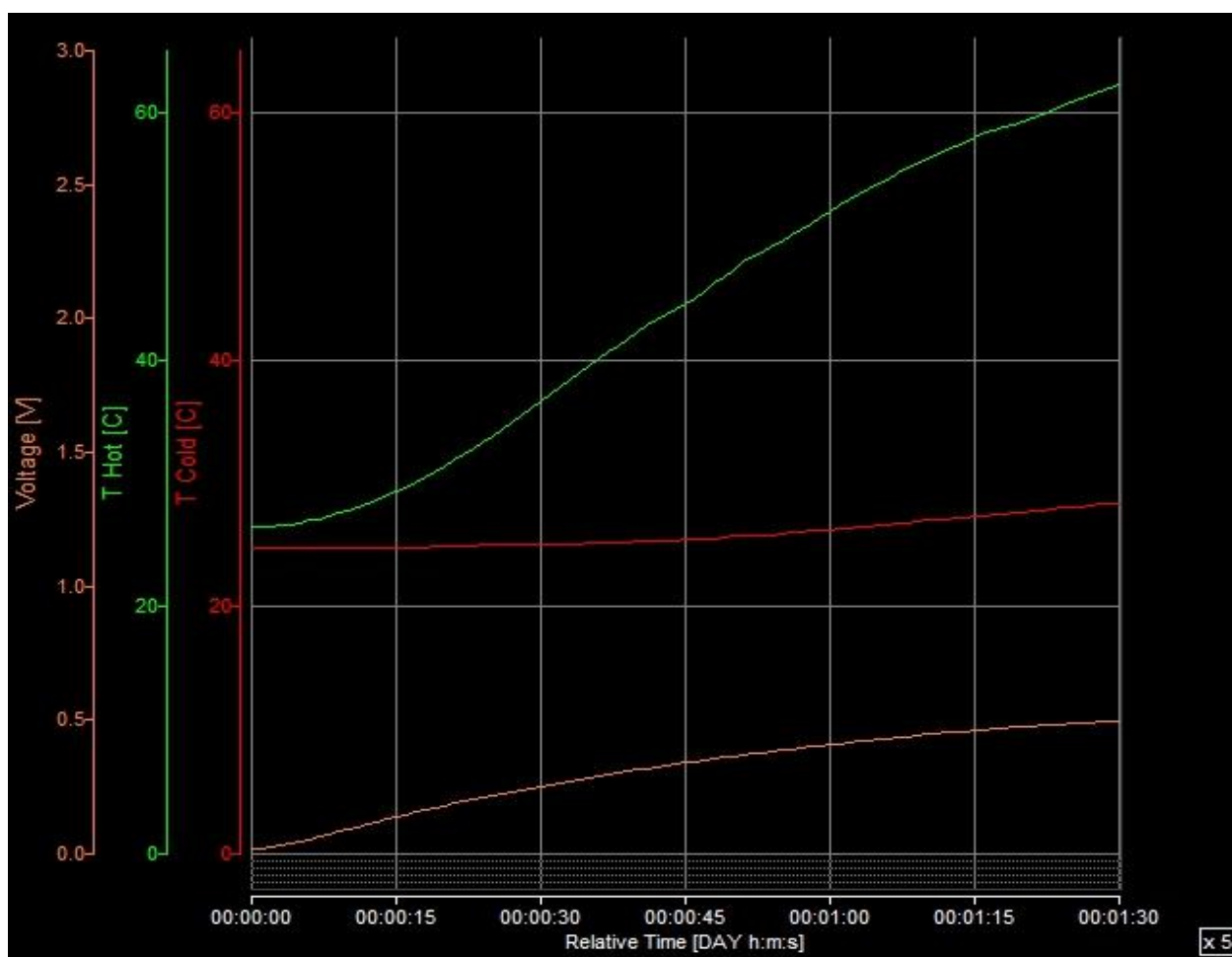
ภาพประกอบ 50 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 0.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเวลาที่ 90 พบว่า อุณหภูมิฝั่งร้อน 57.2 °C อุณหภูมิฝั่งเย็น 29.6 °C ความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น 27.6 °C และแรงดันไฟฟ้า 0.52 V



ภาพประกอบ 50 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยเคลือบ
ยางหนา 0.5 มิลลิเมตร

4.3.3 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบบ โดยเคลือบ ยางหนา 1.0 มิลลิเมตร

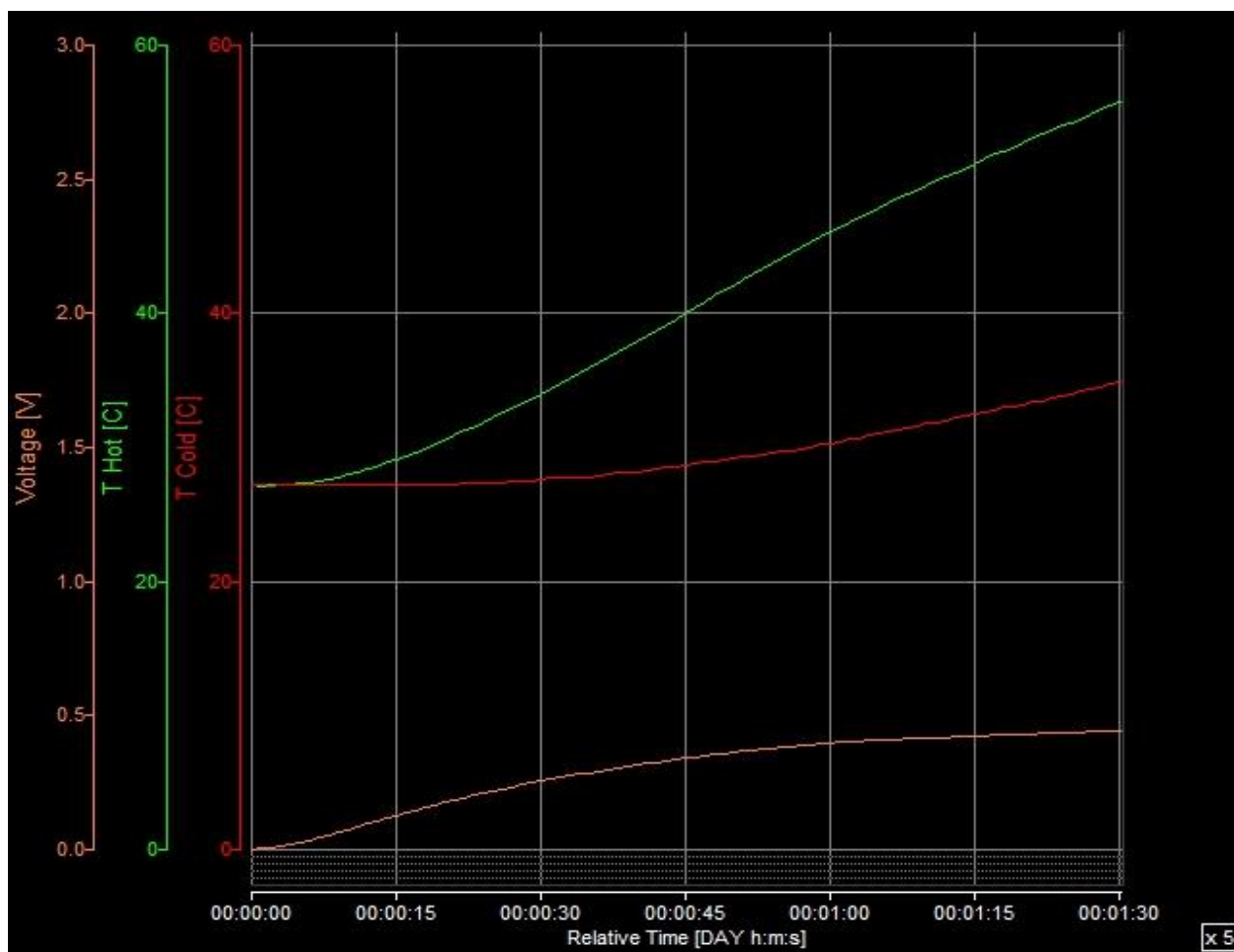
ภาพประกอบ 51 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบบ โดยเคลือบยางหนา 1.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเวลาที่ 90 พบว่า อุณหภูมิฝั่งร้อน 62.3 °C อุณหภูมิฝั่งเย็น 28.3 °C ความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น 34 °C และแรงดันไฟฟ้า 0.51 V



ภาพประกอบ 51 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบบ โดยเคลือบ
ยางหนา 1.0 มิลลิเมตร

4.3.4 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยไม่เคลือบ ยาง

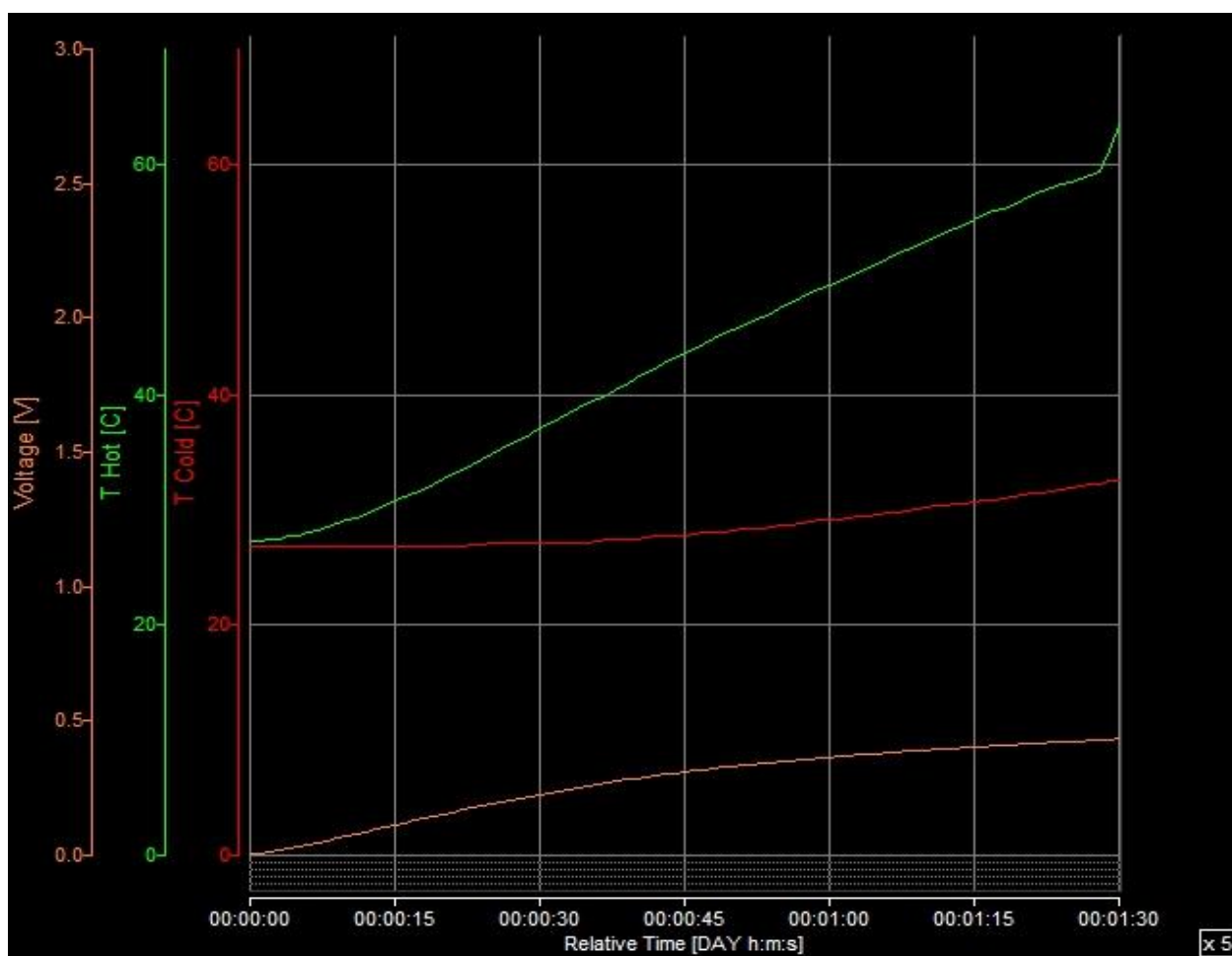
ภาพประกอบ 52 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยไม่เคลือบยาง เมื่อพิจารณาวินาทีที่ 90 พบว่า อุณหภูมิฝั่งร้อน 55.8 °C อุณหภูมิฝั่งเย็น 34.9 °C ความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น 20.9 °C และแรงดันไฟฟ้า 0.43 V



ภาพประกอบ 52 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยไม่เคลือบยาง

4.3.5 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยเคลือบ ยางหนา 0.5 มิลลิเมตร

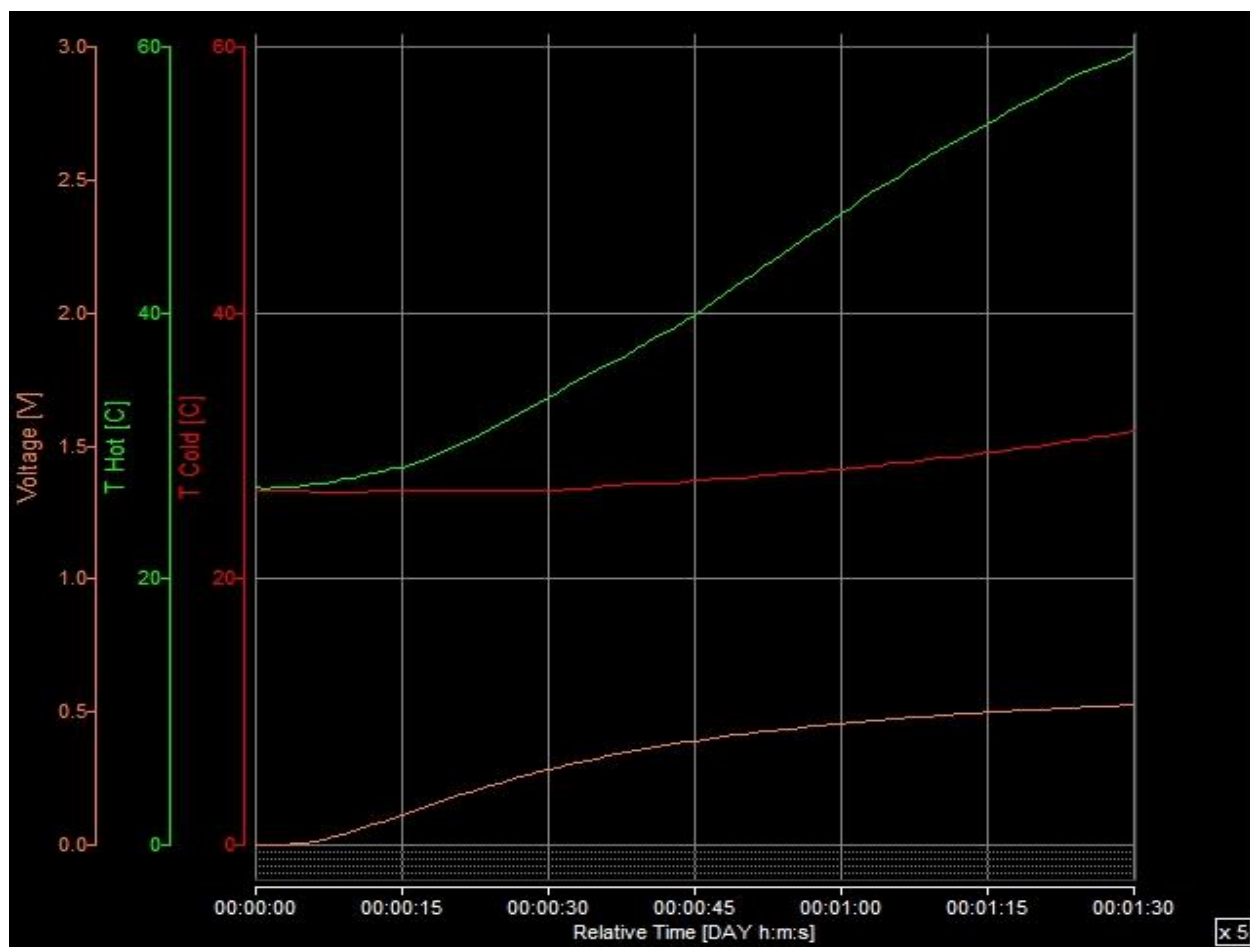
ภาพประกอบ 53 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยเคลือบยางหนา 0.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเวลาที่ 90 พบว่า อุณหภูมิฝั่งร้อน 62.1 °C อุณหภูมิฝั่งเย็น 32.6 °C ความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น 29.5 °C และแรงดันไฟฟ้า 0.45 V



ภาพประกอบ 53 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบบ โดยเคลือบ
ยางหนา 0.5 มิลลิเมตร

4.3.6 ผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยเคลือบ ยางหนา 1.0 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 54 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 1.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาวินาทีที่ 90 พบว่า อุณหภูมิฝั่งร้อน 59.7 °C อุณหภูมิฝั่งเย็น 29.5 °C ความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น 30.2 °C และแรงดันไฟฟ้า 0.53 V



ภาพประกอบ 54 แสดงผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยเคลือบ
ยางหนา 1.0 มิลลิเมตร

ตาราง 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นและแรงดันไฟฟ้าที่เวลา 90 วินาที

| ขนาดของฮีตซิงก์ / ความหนาของยาง | อุณหภูมิ ฝั่งร้อน (°C) | อุณหภูมิฝั่ง เย็น (°C) | ความแตกต่าง อุณหภูมิฝั่งร้อน และเย็น (°C) | แรงดันไฟฟ้า (V) |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|--------------------|
| 40x40x18 มม. / ไม่เคลือบยาง | 49.8 | 31.7 | 18.1 | 0.34 |
| 40x40x18 มม. / เคลือบยาง 0.5 มม. | 57.2 | 29.6 | 27.6 | 0.52 |
| 40x40x18 มม. / เคลือบยาง 1.0 มม. | 62.3 | 28.3 | 34 | 0.51 |
| 40x45x21 มม. / ไม่เคลือบยาง | 55.8 | 34.9 | 20.9 | 0.43 |
| 40x45x21 มม. / เคลือบยาง 0.5 มม. | 62.1 | 32.6 | 29.5 | 0.45 |
| 40x45x21 มม. / เคลือบยาง 1.0 มม. | 59.7 | 29.5 | 30.2 | 0.53 |

จากการผลทดลองเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้ยางเคลือบบนครีบบของฮีตซิงก์ พบว่าเมื่อเริ่มให้ความร้อนจากแผ่นนำความร้อน ความแตกต่างอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของเทอร์โมอิเล็กทริก มีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เวลา 90 วินาที ซึ่งผู้วิจัยจะวิเคราะห์และสรุปผลโดยละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

เนื้อหาบทนี้ ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ 1) วิเคราะห์ผลความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์แต่ละขนาด 2) วิเคราะห์ผลแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์แต่ละขนาด 3) สรุปผลการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยยางธรรมชาติ และ 4) ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

5.1 วิเคราะห์ผลความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์แต่ละขนาด

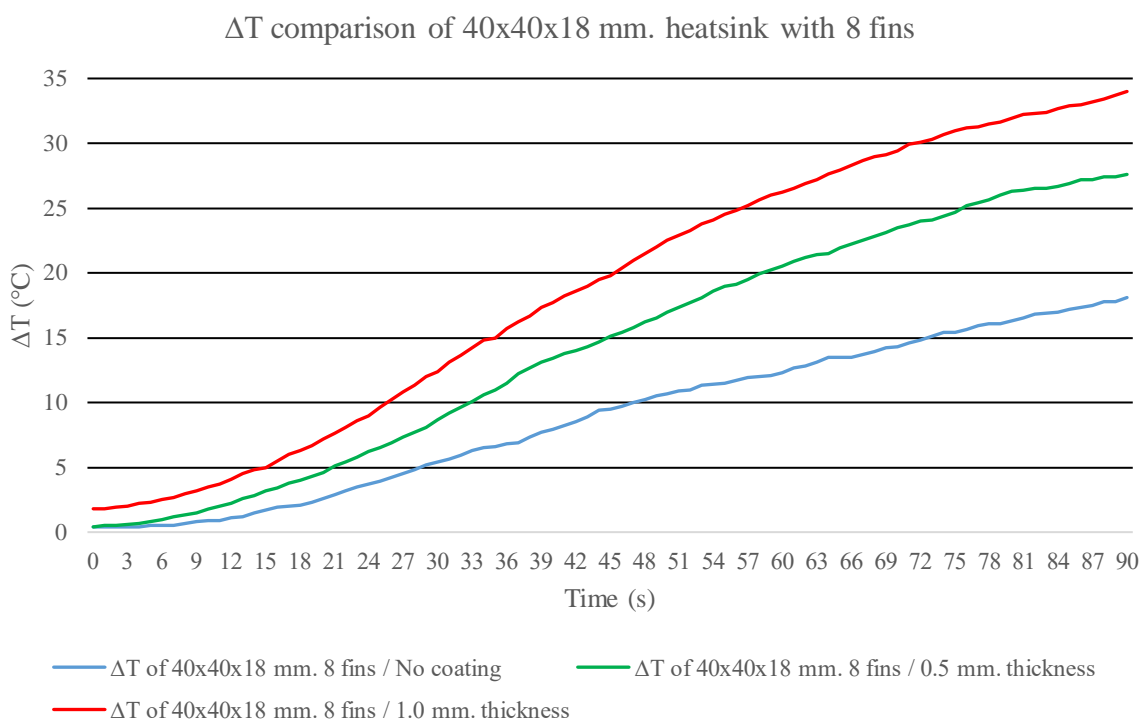
จากผลการทดลองในบทที่ 4 สามารถนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นมาเปรียบเทียบ เพื่อหาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น จำแนกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) เปรียบเทียบฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางที่ความหนาต่างกัน และ 2) เปรียบเทียบฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางที่ความหนาต่างกัน

5.1.1 วิเคราะห์ผลความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ

ภาพประกอบ 55 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร พบว่าที่เวลา 90 วินาที ฮีตซิงก์ที่เคลือบยางสามารถเพิ่มช่องว่างการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า (นำความร้อนได้ดีกว่า) ผลการเปรียบเทียบสามารถอธิบายได้ดังนี้

- เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 9.5 °C
- เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 15.9 °C
- เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ที่เคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตรและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 6.4 °C

จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่าฮีตซิงก์ที่เคลือบยางสามารถเพิ่มช่องว่างการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นสูงสุดเท่ากับ 15.9 °C



ภาพประกอบ 55 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

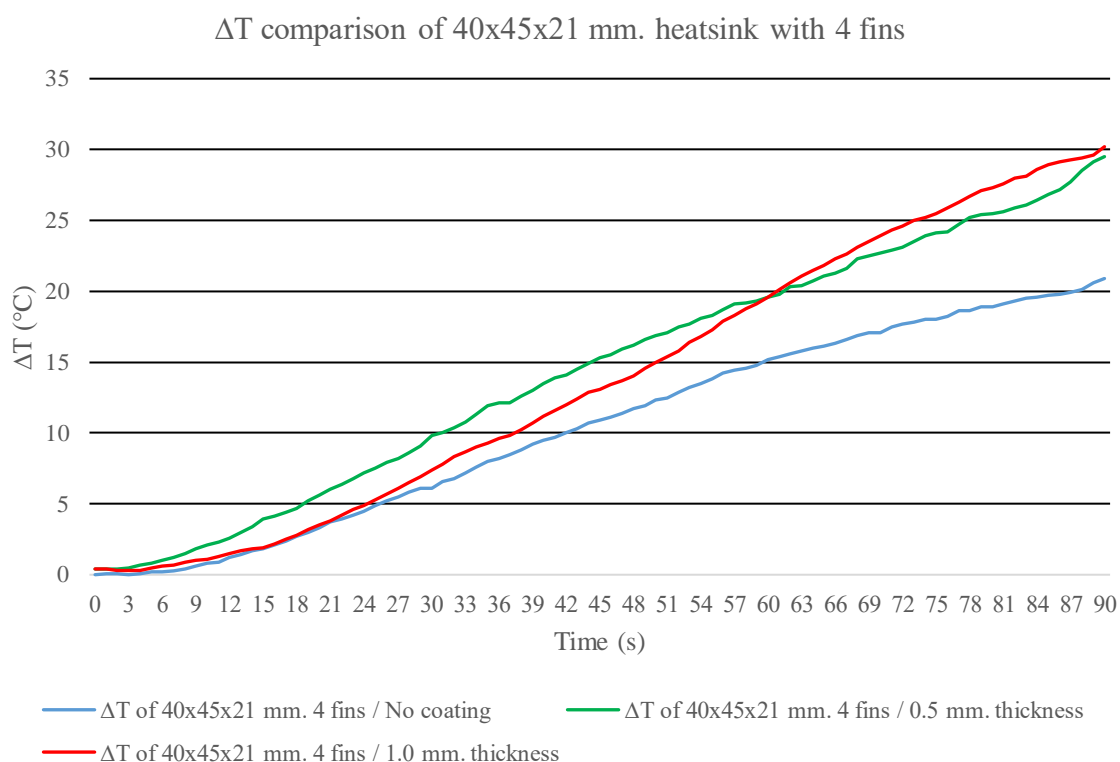
5.1.2 วิเคราะห์ผลความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ

ภาพประกอบ 56 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร พบว่าที่เวลา 90 วินาที ฮีตซิงก์ที่เคลือบยางสามารถเพิ่มช่องว่างการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า (นำความร้อนได้ดีกว่า) ผลการเปรียบเทียบสามารถอธิบายได้ดังนี้

- เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 8.6 °C

- เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 9.3 °C
- เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ที่เคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตรและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 0.7 °C

จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่าฮีตซิงก์ที่เคลือบยางสามารถเพิ่มช่องว่างการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นสูงสุดเท่ากับ 9.3 °C



ภาพประกอบ 56 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็นของฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

5.2 วิเคราะห์ผลแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์แต่ละขนาด

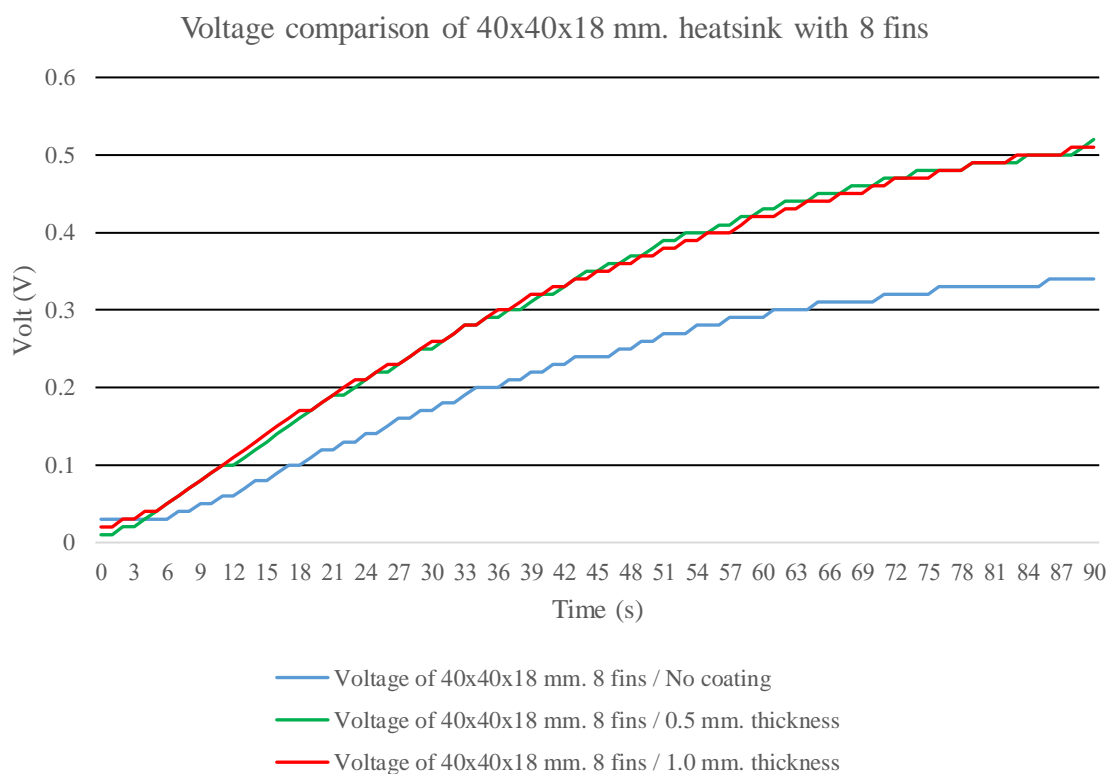
จากผลการทดลองในบทที่ 4 สามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้ามาเปรียบเทียบ เพื่อหาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น จำแนกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) เปรียบเทียบฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางที่ความหนาต่างกัน และ 2) เปรียบเทียบฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางที่ความหนาต่างกัน

5.2.1 วิเคราะห์ผลแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ

ภาพประกอบ 57 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร พบว่าที่เวลา 90 วินาที ฮีตซิงก์ที่เคลือบยางมีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบสามารถอธิบายได้ดังนี้

- เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 0.18 V
- เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 0.17 V
- เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ที่เคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตรและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 0.01 V

จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่าฮีตซิงก์ที่เคลือบยางมีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.18 V



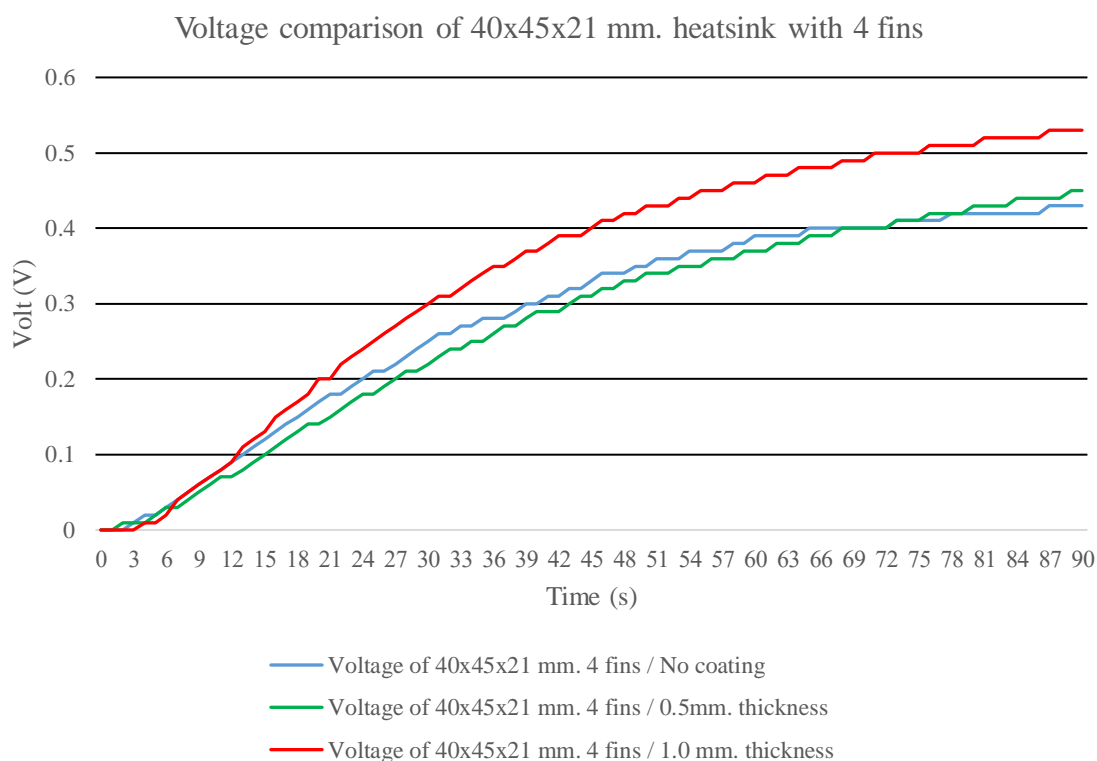
ภาพประกอบ 57 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

5.2.2 วิเคราะห์ผลแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ

ภาพประกอบ 58 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร พบว่าที่เวลา 90 วินาที ฮีตซิงก์ที่เคลือบยางมีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบสามารถอธิบายได้ดังนี้

- เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 0.02 V
- เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ที่ไม่เคลือบยางและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 0.1 V
- เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ที่เคลือบยาง 0.5 มิลลิเมตรและเคลือบยาง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 0.08 V

จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่าฮีตซิงก์ที่เคลือบยางมีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.1 V



ภาพประกอบ 58 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ และเคลือบยางหนา 0 (ไม่เคลือบยาง), 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

5.3 สรุปผลการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยยางธรรมชาติ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสนอเทคนิคเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการตรวจจับความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุระบายความร้อนเคลือบบนครีบบของฮีตซิงก์จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิฝั่งร้อนและเย็น และแรงดันไฟฟ้า มีค่าสูงสุด 15.9 °C และ 0.18 V ตามลำดับ

งานวิจัยนี้สามารถแก้ไขข้อจำกัดของงานวิจัย [12] โดยใช้วัสดุที่อยู่ในธรรมชาติ รวมถึงคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่เป็นฉนวนกันความร้อนจากภายนอก และมีสมบัติการนำความร้อนที่ดีเมื่อนำไปติดตั้งในอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกไร้สาย-ไร้พลังงาน ทำให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้เมื่ออยู่ท่ามกลางอวกาศ เนื่องจากยางจะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนจากภายนอก และสามารถนำความร้อนจากครีบบของฮีตซิงก์ได้ในขณะเดียวกัน

5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

ในอนาคตสามารถนำงานวิจัยพัฒนาต่อในส่วนการหาค่าความหนาที่ที่ดีที่สุดของยางสำหรับการนำความร้อน หรือสามารถนำเทคนิคนี้ประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงการช่วยเหลือเกษตรกรสวนยางในภาวะยางราคาต่ำได้ในปัจจุบัน

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1] ณัฐศักดิ์ บุญมี. พลศาสตร์อวกาศวิทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2560.
- [2] M. Alzhrani, A. Bin Talib, and I. Manarvi, "Design and development of a hybrid fire and heat detector through narrowing of alternatives," Aug. 2018, doi: 10.1109/IEEEGCC.2017.8448120.
- [3] T. Ishiyama and H. Yamada, "Effect of heat pipes to suppress heat leakage for thermoelectric generator of energy harvesting," 2012, doi: 10.1109/ICRERA.2012.6477306.
- [4] M. O. Cernaianu, C. Cirstea, and A. Gontean, "Thermoelectrical energy harvesting system: Modelling, simulation and implementation," in *2012 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications, ISETC 2012 - Conference Proceedings*, 2012, pp. 67–70, doi: 10.1109/ISETC.2012.6408047.
- [5] T. Ilahi, M. Abid, and T. Ilahi, "Design and analysis of thermoelectric material based roof top energy harvesting system for Pakistan," Oct. 2015, doi: 10.1109/PGSRET.2015.7312207.
- [6] H. P. Wong and Z. Dahari, "Human body parts heat energy harvesting using thermoelectric module," in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2015*, 2015, pp. 211–214, doi: 10.1109/CENCON.2015.7409541.
- [7] C. Correa-Betanzo, C. Lopez-Perez, A. Rodriguez, and A. Lopez-Nunez, "Isolated DC-DC converter for thermoelectric energy harvesting based on a piezoelectric transformer," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, May 2019, vol. 2019-March, pp. 3443–3447, doi: 10.1109/APEC.2019.8721959.
- [8] V. S. Oliveira, M. Miranda Camboim, B. A. Silva Guedes De Lima, C. Protasio De Souza, and O. Baiocchi, "A solar-radiation-powered thermoelectric energy

- harvester based on quasicrystal,” in *I2MTC 2020 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings*, May 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128936.
- [9] K. H. Mahmud, S. A. Yudistirani, and A. I. Ramadhan, “Analysis Of Power Characteristics Of Model Thermoelectric Generator (TEG) Small Modular,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 6, no. 04, pp. 161–167, 2017.
- [10] D. Yadav and P. Azad, “Experimental Analysis of Power Generation for Ultra-Low Power Wireless Sensor Nodes Using Various Coatings on Thermoelectric Energy Harvester,” in *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2019*, May 2019, pp. 13–17, doi: 10.1109/SPIN.2019.8711483.
- [11] A. Ağaçayak *et al.*, “The Impact of Different Electric Connection Types in Thermoelectric Generator Modules on Power,” *Int. J. Eng. Res. Sci.*, vol. 3, no. 12, pp. 46–55, 2017.
- [12] Y. Shi *et al.*, “A novel self-powered wireless temperature sensor based on thermoelectric generators,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, pp. 110–116, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.010.
- [13] W. P. M. R. Pathirana, H. M. P. C. Jayaweera, and A. Muhtaroglu, “Low input voltage and high step-up integrated regulator for thermoelectric energy harvesting,” Dec. 2015, doi: 10.1109/ICEAC.2015.7352199.
- [14] S. Y. Zhou, C. Zhuo, Q. Min, and E. P. Li, “Graphene based thermoelectric energy harvesting in 3D ICs,” in *2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, EDAPS 2017*, Jan. 2018, vol. 2018-January, pp. 1–3, doi: 10.1109/EDAPS.2017.8276959.
- [15] N. Wang, C. Gao, Q. Lu, H. Jia, G. Sui, and X. Gao, “Study on the Heat Dissipation System Using Thermoelectric Cooling Based on Energy Harvesting for High-power LED,” Jul. 2019, doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799348.

- [16] Y. Z. Yap, R. T. Naayagi, and W. L. Woo, "Thermoelectric energy harvesting for mobile phone charging application," in *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, Feb. 2017, pp. 3241–3245, doi: 10.1109/TENCON.2016.7848649.
- [17] Q. Brogan, T. O'Connor, and D. S. Ha, "Solar and thermal energy harvesting with a wearable jacket," in *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2014, pp. 1412–1415, doi: 10.1109/ISCAS.2014.6865409.
- [18] N. Wang, Z. Y. Liu, and H. Z. Jia, "Study of the electro-thermal collaborative cooling based on energy harvesting for thermoelectric coolers," in *2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, EDAPS 2017*, Jan. 2018, vol. 2018-January, pp. 1–3, doi: 10.1109/EDAPS.2017.8276906.
- [19] V. I. Kubov, Y. Y. Dymyrov, and R. M. Kubova, "LTspice-model of thermoelectric Peltier-Seebeck element," in *2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2016 - Conference Proceedings*, Jun. 2016, pp. 47–51, doi: 10.1109/ELNANO.2016.7493007.
- [20] J. J. Chen, Y. C. Lien, C. L. Kuo, and W. J. Wu, "Self-powered wireless temperature sensor with piezoelectric energy harvester fabricated with metal-MEMS process," in *2015 IEEE 10th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS 2015*, Jul. 2015, pp. 619–622, doi: 10.1109/NEMS.2015.7147506.
- [21] O. Ando Junior, N. Calderon, and S. de Souza, "Characterization of a Thermoelectric Generator (TEG) System for Waste Heat Recovery," *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1555, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061555.
- [22] Ohlemiller T.J. and P.J. DiNunno, editor. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, MA: National Fire Protection Association; 1995.
- [23] Quintiere J.G. *Principle of Fire Behavior*. Albany, USA: Delmar Publishers; 1997.

- [24] D. Jang, S. J. Yook, and K. S. Lee, "Optimum design of a radial heat sink with a fin-height profile for high-power LED lighting applications," *Appl. Energy*, vol. 116, pp. 260–268, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.11.063.
- [25] Y. He, L. X. Ma, Y. Z. Tang, Z. P. Wang, W. Li, and D. Kukulka, "Thermal conductivity of natural rubber using molecular dynamics simulation," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 15, no. 4, pp. 3244–3248, Apr. 2015, doi: 10.1166/jnn.2015.9640.
- [26] X. Zhang, J. Yi, Y. Yin, Y. Song, and C. Xiong, "Thermal conductivity and electrical insulation properties of h-BN@PDA/silicone rubber composites," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 117, p. 108485, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.diamond.2021.108485.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดลอง

ตารางผลการทดลอง

ตารางผลการทดลองฮีตซิงค์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยไม่เคลือบยาง ใน เวลา 90 วินาที

| 40x40x18 mm. with 8 fins / No coating | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|------------------|---------|----------|
| Time (s) | T hot side (°C) | T cold side (°C) | DT (°C) | Volt (V) |
| 0 | 27.7 | 27.3 | 0.4 | 0.03 |
| 1 | 27.7 | 27.3 | 0.4 | 0.03 |
| 2 | 27.7 | 27.3 | 0.4 | 0.03 |
| 3 | 27.7 | 27.3 | 0.4 | 0.03 |
| 4 | 27.7 | 27.3 | 0.4 | 0.03 |
| 5 | 27.8 | 27.3 | 0.5 | 0.03 |
| 6 | 27.8 | 27.3 | 0.5 | 0.03 |
| 7 | 27.8 | 27.3 | 0.5 | 0.04 |
| 8 | 28 | 27.3 | 0.7 | 0.04 |
| 9 | 28.1 | 27.3 | 0.8 | 0.05 |
| 10 | 28.2 | 27.3 | 0.9 | 0.05 |
| 11 | 28.2 | 27.3 | 0.9 | 0.06 |
| 12 | 28.4 | 27.3 | 1.1 | 0.06 |
| 13 | 28.5 | 27.3 | 1.2 | 0.07 |
| 14 | 28.8 | 27.3 | 1.5 | 0.08 |
| 15 | 29 | 27.3 | 1.7 | 0.08 |
| 16 | 29.2 | 27.3 | 1.9 | 0.09 |
| 17 | 29.3 | 27.3 | 2 | 0.1 |
| 18 | 29.5 | 27.4 | 2.1 | 0.1 |
| 19 | 29.7 | 27.4 | 2.3 | 0.11 |
| 20 | 30 | 27.4 | 2.6 | 0.12 |
| 21 | 30.4 | 27.5 | 2.9 | 0.12 |
| 22 | 30.7 | 27.5 | 3.2 | 0.13 |
| 23 | 31 | 27.5 | 3.5 | 0.13 |
| 24 | 31.3 | 27.6 | 3.7 | 0.14 |
| 25 | 31.6 | 27.7 | 3.9 | 0.14 |
| 26 | 31.9 | 27.7 | 4.2 | 0.15 |
| 27 | 32.3 | 27.8 | 4.5 | 0.16 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 28 | 32.6 | 27.8 | 4.8 | 0.16 |
| 29 | 33 | 27.8 | 5.2 | 0.17 |
| 30 | 33.2 | 27.8 | 5.4 | 0.17 |
| 31 | 33.4 | 27.8 | 5.6 | 0.18 |
| 32 | 33.7 | 27.8 | 5.9 | 0.18 |
| 33 | 34.1 | 27.8 | 6.3 | 0.19 |
| 34 | 34.3 | 27.8 | 6.5 | 0.2 |
| 35 | 34.5 | 27.9 | 6.6 | 0.2 |
| 36 | 34.8 | 28 | 6.8 | 0.2 |
| 37 | 35 | 28.1 | 6.9 | 0.21 |
| 38 | 35.4 | 28.1 | 7.3 | 0.21 |
| 39 | 35.8 | 28.1 | 7.7 | 0.22 |
| 40 | 36.1 | 28.2 | 7.9 | 0.22 |
| 41 | 36.4 | 28.2 | 8.2 | 0.23 |
| 42 | 36.7 | 28.2 | 8.5 | 0.23 |
| 43 | 37.1 | 28.2 | 8.9 | 0.24 |
| 44 | 37.6 | 28.2 | 9.4 | 0.24 |
| 45 | 37.9 | 28.4 | 9.5 | 0.24 |
| 46 | 38.1 | 28.4 | 9.7 | 0.24 |
| 47 | 38.4 | 28.4 | 10 | 0.25 |
| 48 | 38.7 | 28.5 | 10.2 | 0.25 |
| 49 | 39.1 | 28.6 | 10.5 | 0.26 |
| 50 | 39.3 | 28.6 | 10.7 | 0.26 |
| 51 | 39.5 | 28.6 | 10.9 | 0.27 |
| 52 | 39.7 | 28.7 | 11 | 0.27 |
| 53 | 40 | 28.7 | 11.3 | 0.27 |
| 54 | 40.1 | 28.7 | 11.4 | 0.28 |
| 55 | 40.3 | 28.8 | 11.5 | 0.28 |
| 56 | 40.6 | 28.9 | 11.7 | 0.28 |
| 57 | 40.8 | 28.9 | 11.9 | 0.29 |
| 58 | 41 | 29 | 12 | 0.29 |
| 59 | 41.2 | 29.1 | 12.1 | 0.29 |
| 60 | 41.6 | 29.3 | 12.3 | 0.29 |
| 61 | 42 | 29.3 | 12.7 | 0.3 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 62 | 42.2 | 29.4 | 12.8 | 0.3 |
| 63 | 42.5 | 29.4 | 13.1 | 0.3 |
| 64 | 42.9 | 29.4 | 13.5 | 0.3 |
| 65 | 43.1 | 29.6 | 13.5 | 0.31 |
| 66 | 43.2 | 29.7 | 13.5 | 0.31 |
| 67 | 43.4 | 29.7 | 13.7 | 0.31 |
| 68 | 43.7 | 29.8 | 13.9 | 0.31 |
| 69 | 44.1 | 29.9 | 14.2 | 0.31 |
| 70 | 44.4 | 30.1 | 14.3 | 0.31 |
| 71 | 44.8 | 30.2 | 14.6 | 0.32 |
| 72 | 45.1 | 30.3 | 14.8 | 0.32 |
| 73 | 45.4 | 30.3 | 15.1 | 0.32 |
| 74 | 45.7 | 30.3 | 15.4 | 0.32 |
| 75 | 45.9 | 30.5 | 15.4 | 0.32 |
| 76 | 46.2 | 30.6 | 15.6 | 0.33 |
| 77 | 46.6 | 30.7 | 15.9 | 0.33 |
| 78 | 46.8 | 30.7 | 16.1 | 0.33 |
| 79 | 47 | 30.9 | 16.1 | 0.33 |
| 80 | 47.3 | 31 | 16.3 | 0.33 |
| 81 | 47.5 | 31 | 16.5 | 0.33 |
| 82 | 47.8 | 31 | 16.8 | 0.33 |
| 83 | 48 | 31.1 | 16.9 | 0.33 |
| 84 | 48.3 | 31.3 | 17 | 0.33 |
| 85 | 48.6 | 31.4 | 17.2 | 0.33 |
| 86 | 48.8 | 31.5 | 17.3 | 0.34 |
| 87 | 49 | 31.5 | 17.5 | 0.34 |
| 88 | 49.3 | 31.5 | 17.8 | 0.34 |
| 89 | 49.5 | 31.7 | 17.8 | 0.34 |
| 90 | 49.8 | 31.7 | 18.1 | 0.34 |

ตารางผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 0.5 มิลลิเมตร ในเวลา 90 วินาที

| 40x40x18 mm. with 8 fins / 0.5 mm thickness | | | | |
|---|-----------------|------------------|---------|----------|
| Time (s) | T hot side (°C) | T cold side (°C) | DT (°C) | Volt (V) |
| 0 | 25.7 | 25.3 | 0.4 | 0.01 |
| 1 | 25.8 | 25.3 | 0.5 | 0.01 |
| 2 | 25.8 | 25.3 | 0.5 | 0.02 |
| 3 | 25.9 | 25.3 | 0.6 | 0.02 |
| 4 | 26 | 25.3 | 0.7 | 0.03 |
| 5 | 26.1 | 25.3 | 0.8 | 0.04 |
| 6 | 26.3 | 25.3 | 1 | 0.05 |
| 7 | 26.5 | 25.3 | 1.2 | 0.06 |
| 8 | 26.6 | 25.3 | 1.3 | 0.07 |
| 9 | 26.8 | 25.3 | 1.5 | 0.08 |
| 10 | 27.1 | 25.3 | 1.8 | 0.09 |
| 11 | 27.3 | 25.3 | 2 | 0.1 |
| 12 | 27.5 | 25.3 | 2.2 | 0.1 |
| 13 | 27.9 | 25.3 | 2.6 | 0.11 |
| 14 | 28.1 | 25.3 | 2.8 | 0.12 |
| 15 | 28.5 | 25.3 | 3.2 | 0.13 |
| 16 | 28.7 | 25.3 | 3.4 | 0.14 |
| 17 | 29.1 | 25.3 | 3.8 | 0.15 |
| 18 | 29.3 | 25.3 | 4 | 0.16 |
| 19 | 29.6 | 25.3 | 4.3 | 0.17 |
| 20 | 29.9 | 25.3 | 4.6 | 0.18 |
| 21 | 30.4 | 25.3 | 5.1 | 0.19 |
| 22 | 30.7 | 25.3 | 5.4 | 0.19 |
| 23 | 31.1 | 25.3 | 5.8 | 0.2 |
| 24 | 31.6 | 25.4 | 6.2 | 0.21 |
| 25 | 32 | 25.5 | 6.5 | 0.22 |
| 26 | 32.4 | 25.5 | 6.9 | 0.22 |
| 27 | 32.8 | 25.5 | 7.3 | 0.23 |
| 28 | 33.2 | 25.5 | 7.7 | 0.24 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 29 | 33.6 | 25.5 | 8.1 | 0.25 |
| 30 | 34.2 | 25.5 | 8.7 | 0.25 |
| 31 | 34.7 | 25.5 | 9.2 | 0.26 |
| 32 | 35.2 | 25.6 | 9.6 | 0.27 |
| 33 | 35.7 | 25.6 | 10.1 | 0.28 |
| 34 | 36.3 | 25.7 | 10.6 | 0.28 |
| 35 | 36.7 | 25.7 | 11 | 0.29 |
| 36 | 37.2 | 25.7 | 11.5 | 0.29 |
| 37 | 37.9 | 25.7 | 12.2 | 0.3 |
| 38 | 38.5 | 25.8 | 12.7 | 0.3 |
| 39 | 38.9 | 25.8 | 13.1 | 0.31 |
| 40 | 39.2 | 25.8 | 13.4 | 0.32 |
| 41 | 39.6 | 25.8 | 13.8 | 0.32 |
| 42 | 40 | 26 | 14 | 0.33 |
| 43 | 40.3 | 26 | 14.3 | 0.34 |
| 44 | 40.7 | 26 | 14.7 | 0.35 |
| 45 | 41.2 | 26.1 | 15.1 | 0.35 |
| 46 | 41.6 | 26.2 | 15.4 | 0.36 |
| 47 | 42 | 26.2 | 15.8 | 0.36 |
| 48 | 42.4 | 26.2 | 16.2 | 0.37 |
| 49 | 42.9 | 26.4 | 16.5 | 0.37 |
| 50 | 43.4 | 26.4 | 17 | 0.38 |
| 51 | 43.8 | 26.5 | 17.3 | 0.39 |
| 52 | 44.3 | 26.6 | 17.7 | 0.39 |
| 53 | 44.7 | 26.6 | 18.1 | 0.4 |
| 54 | 45.2 | 26.6 | 18.6 | 0.4 |
| 55 | 45.6 | 26.6 | 19 | 0.4 |
| 56 | 45.8 | 26.7 | 19.1 | 0.41 |
| 57 | 46.3 | 26.8 | 19.5 | 0.41 |
| 58 | 46.8 | 26.9 | 19.9 | 0.42 |
| 59 | 47.2 | 27 | 20.2 | 0.42 |
| 60 | 47.6 | 27.1 | 20.5 | 0.43 |
| 61 | 48 | 27.1 | 20.9 | 0.43 |
| 62 | 48.4 | 27.2 | 21.2 | 0.44 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 63 | 48.7 | 27.3 | 21.4 | 0.44 |
| 64 | 48.9 | 27.4 | 21.5 | 0.44 |
| 65 | 49.3 | 27.4 | 21.9 | 0.45 |
| 66 | 49.7 | 27.5 | 22.2 | 0.45 |
| 67 | 50.1 | 27.6 | 22.5 | 0.45 |
| 68 | 50.5 | 27.7 | 22.8 | 0.46 |
| 69 | 50.9 | 27.8 | 23.1 | 0.46 |
| 70 | 51.3 | 27.8 | 23.5 | 0.46 |
| 71 | 51.6 | 27.9 | 23.7 | 0.47 |
| 72 | 51.9 | 27.9 | 24 | 0.47 |
| 73 | 52.2 | 28.1 | 24.1 | 0.47 |
| 74 | 52.5 | 28.1 | 24.4 | 0.48 |
| 75 | 52.9 | 28.2 | 24.7 | 0.48 |
| 76 | 53.4 | 28.2 | 25.2 | 0.48 |
| 77 | 53.8 | 28.4 | 25.4 | 0.48 |
| 78 | 54.1 | 28.5 | 25.6 | 0.48 |
| 79 | 54.6 | 28.6 | 26 | 0.49 |
| 80 | 54.9 | 28.6 | 26.3 | 0.49 |
| 81 | 55.1 | 28.7 | 26.4 | 0.49 |
| 82 | 55.4 | 28.9 | 26.5 | 0.49 |
| 83 | 55.6 | 29.1 | 26.5 | 0.49 |
| 84 | 55.8 | 29.1 | 26.7 | 0.5 |
| 85 | 56.1 | 29.2 | 26.9 | 0.5 |
| 86 | 56.4 | 29.2 | 27.2 | 0.5 |
| 87 | 56.6 | 29.4 | 27.2 | 0.5 |
| 88 | 56.8 | 29.4 | 27.4 | 0.5 |
| 89 | 56.9 | 29.5 | 27.4 | 0.51 |
| 90 | 57.2 | 29.6 | 27.6 | 0.52 |

ตารางผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x40x18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 1.0 มิลลิเมตร ในเวลา 90 วินาที

| 40x40x18 mm. with 8 fins / 1.0 mm thickness | | | | |
|---|-----------------|------------------|---------|----------|
| Time (s) | T hot side (°C) | T cold side (°C) | DT (°C) | Volt (V) |
| 0 | 26.5 | 24.7 | 1.8 | 0.02 |
| 1 | 26.5 | 24.7 | 1.8 | 0.02 |
| 2 | 26.6 | 24.7 | 1.9 | 0.03 |
| 3 | 26.7 | 24.7 | 2 | 0.03 |
| 4 | 26.9 | 24.7 | 2.2 | 0.04 |
| 5 | 27 | 24.7 | 2.3 | 0.04 |
| 6 | 27.2 | 24.7 | 2.5 | 0.05 |
| 7 | 27.4 | 24.7 | 2.7 | 0.06 |
| 8 | 27.7 | 24.7 | 3 | 0.07 |
| 9 | 27.9 | 24.7 | 3.2 | 0.08 |
| 10 | 28.2 | 24.7 | 3.5 | 0.09 |
| 11 | 28.4 | 24.7 | 3.7 | 0.1 |
| 12 | 28.8 | 24.7 | 4.1 | 0.11 |
| 13 | 29.2 | 24.7 | 4.5 | 0.12 |
| 14 | 29.5 | 24.7 | 4.8 | 0.13 |
| 15 | 29.8 | 24.8 | 5 | 0.14 |
| 16 | 30.2 | 24.7 | 5.5 | 0.15 |
| 17 | 30.7 | 24.7 | 6 | 0.16 |
| 18 | 31.1 | 24.8 | 6.3 | 0.17 |
| 19 | 31.6 | 24.9 | 6.7 | 0.17 |
| 20 | 32.1 | 24.9 | 7.2 | 0.18 |
| 21 | 32.5 | 24.9 | 7.6 | 0.19 |
| 22 | 33 | 24.9 | 8.1 | 0.2 |
| 23 | 33.5 | 24.9 | 8.6 | 0.21 |
| 24 | 34 | 25 | 9 | 0.21 |
| 25 | 34.6 | 25 | 9.6 | 0.22 |
| 26 | 35.2 | 25 | 10.2 | 0.23 |
| 27 | 35.8 | 25 | 10.8 | 0.23 |
| 28 | 36.3 | 25 | 11.3 | 0.24 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 29 | 37 | 25 | 12 | 0.25 |
| 30 | 37.5 | 25.1 | 12.4 | 0.26 |
| 31 | 38.1 | 25 | 13.1 | 0.26 |
| 32 | 38.6 | 25 | 13.6 | 0.27 |
| 33 | 39.2 | 25 | 14.2 | 0.28 |
| 34 | 39.9 | 25.1 | 14.8 | 0.28 |
| 35 | 40.2 | 25.2 | 15 | 0.29 |
| 36 | 40.9 | 25.2 | 15.7 | 0.3 |
| 37 | 41.4 | 25.2 | 16.2 | 0.3 |
| 38 | 41.9 | 25.2 | 16.7 | 0.31 |
| 39 | 42.5 | 25.2 | 17.3 | 0.32 |
| 40 | 43 | 25.3 | 17.7 | 0.32 |
| 41 | 43.5 | 25.3 | 18.2 | 0.33 |
| 42 | 43.9 | 25.3 | 18.6 | 0.33 |
| 43 | 44.3 | 25.3 | 19 | 0.34 |
| 44 | 44.9 | 25.4 | 19.5 | 0.34 |
| 45 | 45.3 | 25.5 | 19.8 | 0.35 |
| 46 | 45.9 | 25.5 | 20.4 | 0.35 |
| 47 | 46.5 | 25.5 | 21 | 0.36 |
| 48 | 47 | 25.5 | 21.5 | 0.36 |
| 49 | 47.6 | 25.6 | 22 | 0.37 |
| 50 | 48.2 | 25.7 | 22.5 | 0.37 |
| 51 | 48.6 | 25.7 | 22.9 | 0.38 |
| 52 | 49 | 25.7 | 23.3 | 0.38 |
| 53 | 49.5 | 25.7 | 23.8 | 0.39 |
| 54 | 49.9 | 25.8 | 24.1 | 0.39 |
| 55 | 50.4 | 25.9 | 24.5 | 0.4 |
| 56 | 50.8 | 26 | 24.8 | 0.4 |
| 57 | 51.3 | 26.1 | 25.2 | 0.4 |
| 58 | 51.8 | 26.2 | 25.6 | 0.41 |
| 59 | 52.2 | 26.2 | 26 | 0.42 |
| 60 | 52.5 | 26.3 | 26.2 | 0.42 |
| 61 | 52.8 | 26.3 | 26.5 | 0.42 |
| 62 | 53.3 | 26.4 | 26.9 | 0.43 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 63 | 53.7 | 26.5 | 27.2 | 0.43 |
| 64 | 54.1 | 26.5 | 27.6 | 0.44 |
| 65 | 54.5 | 26.6 | 27.9 | 0.44 |
| 66 | 54.9 | 26.6 | 28.3 | 0.44 |
| 67 | 55.4 | 26.7 | 28.7 | 0.45 |
| 68 | 55.8 | 26.8 | 29 | 0.45 |
| 69 | 56.1 | 27 | 29.1 | 0.45 |
| 70 | 56.5 | 27.1 | 29.4 | 0.46 |
| 71 | 56.9 | 27 | 29.9 | 0.46 |
| 72 | 57.2 | 27.1 | 30.1 | 0.47 |
| 73 | 57.5 | 27.2 | 30.3 | 0.47 |
| 74 | 57.9 | 27.2 | 30.7 | 0.47 |
| 75 | 58.4 | 27.4 | 31 | 0.47 |
| 76 | 58.6 | 27.4 | 31.2 | 0.48 |
| 77 | 58.8 | 27.5 | 31.3 | 0.48 |
| 78 | 59 | 27.5 | 31.5 | 0.48 |
| 79 | 59.2 | 27.6 | 31.6 | 0.49 |
| 80 | 59.6 | 27.7 | 31.9 | 0.49 |
| 81 | 60 | 27.8 | 32.2 | 0.49 |
| 82 | 60.1 | 27.8 | 32.3 | 0.49 |
| 83 | 60.4 | 28 | 32.4 | 0.5 |
| 84 | 60.7 | 28 | 32.7 | 0.5 |
| 85 | 60.9 | 28 | 32.9 | 0.5 |
| 86 | 61.1 | 28.1 | 33 | 0.5 |
| 87 | 61.4 | 28.2 | 33.2 | 0.5 |
| 88 | 61.7 | 28.3 | 33.4 | 0.51 |
| 89 | 62 | 28.3 | 33.7 | 0.51 |
| 90 | 62.3 | 28.3 | 34 | 0.51 |

ตารางผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยไม่เคลือบยาง ในเวลา 90 วินาที

| 40x45x21 mm. with 4 fins / No coating | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|------------------|---------|----------|
| Time (s) | T hot side (°C) | T cold side (°C) | DT (°C) | Volt (V) |
| 0 | 27.2 | 27.2 | 0 | 0 |
| 1 | 27.3 | 27.2 | 0.1 | 0 |
| 2 | 27.3 | 27.2 | 0.1 | 0 |
| 3 | 27.3 | 27.3 | 0 | 0.01 |
| 4 | 27.4 | 27.3 | 0.1 | 0.02 |
| 5 | 27.4 | 27.2 | 0.2 | 0.02 |
| 6 | 27.4 | 27.2 | 0.2 | 0.03 |
| 7 | 27.5 | 27.2 | 0.3 | 0.04 |
| 8 | 27.7 | 27.3 | 0.4 | 0.05 |
| 9 | 27.9 | 27.3 | 0.6 | 0.06 |
| 10 | 28.1 | 27.3 | 0.8 | 0.07 |
| 11 | 28.2 | 27.3 | 0.9 | 0.08 |
| 12 | 28.5 | 27.3 | 1.2 | 0.09 |
| 13 | 28.7 | 27.3 | 1.4 | 0.1 |
| 14 | 29 | 27.3 | 1.7 | 0.11 |
| 15 | 29.1 | 27.3 | 1.8 | 0.12 |
| 16 | 29.4 | 27.3 | 2.1 | 0.13 |
| 17 | 29.7 | 27.3 | 2.4 | 0.14 |
| 18 | 30 | 27.3 | 2.7 | 0.15 |
| 19 | 30.3 | 27.3 | 3 | 0.16 |
| 20 | 30.6 | 27.3 | 3.3 | 0.17 |
| 21 | 31 | 27.3 | 3.7 | 0.18 |
| 22 | 31.3 | 27.4 | 3.9 | 0.18 |
| 23 | 31.6 | 27.4 | 4.2 | 0.19 |
| 24 | 31.9 | 27.4 | 4.5 | 0.2 |
| 25 | 32.3 | 27.4 | 4.9 | 0.21 |
| 26 | 32.7 | 27.5 | 5.2 | 0.21 |
| 27 | 33 | 27.5 | 5.5 | 0.22 |
| 28 | 33.3 | 27.5 | 5.8 | 0.23 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 29 | 33.7 | 27.6 | 6.1 | 0.24 |
| 30 | 33.9 | 27.8 | 6.1 | 0.25 |
| 31 | 34.4 | 27.8 | 6.6 | 0.26 |
| 32 | 34.6 | 27.8 | 6.8 | 0.26 |
| 33 | 35 | 27.8 | 7.2 | 0.27 |
| 34 | 35.4 | 27.8 | 7.6 | 0.27 |
| 35 | 35.8 | 27.8 | 8 | 0.28 |
| 36 | 36.2 | 28 | 8.2 | 0.28 |
| 37 | 36.6 | 28.1 | 8.5 | 0.28 |
| 38 | 37 | 28.2 | 8.8 | 0.29 |
| 39 | 37.4 | 28.2 | 9.2 | 0.3 |
| 40 | 37.7 | 28.2 | 9.5 | 0.3 |
| 41 | 38.1 | 28.4 | 9.7 | 0.31 |
| 42 | 38.5 | 28.5 | 10 | 0.31 |
| 43 | 38.9 | 28.6 | 10.3 | 0.32 |
| 44 | 39.3 | 28.6 | 10.7 | 0.32 |
| 45 | 39.7 | 28.8 | 10.9 | 0.33 |
| 46 | 40 | 28.9 | 11.1 | 0.34 |
| 47 | 40.4 | 29 | 11.4 | 0.34 |
| 48 | 40.7 | 29 | 11.7 | 0.34 |
| 49 | 41.1 | 29.2 | 11.9 | 0.35 |
| 50 | 41.6 | 29.3 | 12.3 | 0.35 |
| 51 | 41.9 | 29.4 | 12.5 | 0.36 |
| 52 | 42.3 | 29.4 | 12.9 | 0.36 |
| 53 | 42.8 | 29.6 | 13.2 | 0.36 |
| 54 | 43.2 | 29.7 | 13.5 | 0.37 |
| 55 | 43.6 | 29.8 | 13.8 | 0.37 |
| 56 | 44 | 29.8 | 14.2 | 0.37 |
| 57 | 44.3 | 29.9 | 14.4 | 0.37 |
| 58 | 44.7 | 30.1 | 14.6 | 0.38 |
| 59 | 45.1 | 30.3 | 14.8 | 0.38 |
| 60 | 45.5 | 30.3 | 15.2 | 0.39 |
| 61 | 45.9 | 30.5 | 15.4 | 0.39 |
| 62 | 46.3 | 30.7 | 15.6 | 0.39 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 63 | 46.6 | 30.8 | 15.8 | 0.39 |
| 64 | 47 | 31 | 16 | 0.39 |
| 65 | 47.3 | 31.2 | 16.1 | 0.4 |
| 66 | 47.6 | 31.3 | 16.3 | 0.4 |
| 67 | 48 | 31.4 | 16.6 | 0.4 |
| 68 | 48.4 | 31.5 | 16.9 | 0.4 |
| 69 | 48.8 | 31.7 | 17.1 | 0.4 |
| 70 | 49 | 31.9 | 17.1 | 0.4 |
| 71 | 49.4 | 31.9 | 17.5 | 0.4 |
| 72 | 49.8 | 32.1 | 17.7 | 0.4 |
| 73 | 50.1 | 32.3 | 17.8 | 0.41 |
| 74 | 50.4 | 32.4 | 18 | 0.41 |
| 75 | 50.6 | 32.6 | 18 | 0.41 |
| 76 | 50.9 | 32.7 | 18.2 | 0.41 |
| 77 | 51.5 | 32.9 | 18.6 | 0.41 |
| 78 | 51.7 | 33.1 | 18.6 | 0.42 |
| 79 | 52 | 33.1 | 18.9 | 0.42 |
| 80 | 52.2 | 33.3 | 18.9 | 0.42 |
| 81 | 52.5 | 33.4 | 19.1 | 0.42 |
| 82 | 52.9 | 33.6 | 19.3 | 0.42 |
| 83 | 53.3 | 33.8 | 19.5 | 0.42 |
| 84 | 53.5 | 33.9 | 19.6 | 0.42 |
| 85 | 53.8 | 34.1 | 19.7 | 0.42 |
| 86 | 54.1 | 34.3 | 19.8 | 0.42 |
| 87 | 54.3 | 34.4 | 19.9 | 0.43 |
| 88 | 54.6 | 34.5 | 20.1 | 0.43 |
| 89 | 55.4 | 34.8 | 20.6 | 0.43 |
| 90 | 55.8 | 34.9 | 20.9 | 0.43 |

ตารางผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 0.5 มิลลิเมตร ในเวลา 90 วินาที

| 40x45x21 mm. with 4 fins / 0.5 mm thickness | | | | |
|---|-----------------|------------------|---------|----------|
| Time (s) | T hot side (°C) | T cold side (°C) | DT (°C) | Volt (V) |
| 0 | 27.1 | 26.7 | 0.4 | 0 |
| 1 | 27.1 | 26.7 | 0.4 | 0 |
| 2 | 27.2 | 26.8 | 0.4 | 0.01 |
| 3 | 27.3 | 26.8 | 0.5 | 0.01 |
| 4 | 27.5 | 26.8 | 0.7 | 0.01 |
| 5 | 27.6 | 26.8 | 0.8 | 0.02 |
| 6 | 27.8 | 26.8 | 1 | 0.03 |
| 7 | 28 | 26.8 | 1.2 | 0.03 |
| 8 | 28.3 | 26.8 | 1.5 | 0.04 |
| 9 | 28.6 | 26.8 | 1.8 | 0.05 |
| 10 | 28.9 | 26.8 | 2.1 | 0.06 |
| 11 | 29.1 | 26.8 | 2.3 | 0.07 |
| 12 | 29.4 | 26.8 | 2.6 | 0.07 |
| 13 | 29.8 | 26.8 | 3 | 0.08 |
| 14 | 30.2 | 26.8 | 3.4 | 0.09 |
| 15 | 30.7 | 26.8 | 3.9 | 0.1 |
| 16 | 30.9 | 26.8 | 4.1 | 0.11 |
| 17 | 31.2 | 26.8 | 4.4 | 0.12 |
| 18 | 31.5 | 26.8 | 4.7 | 0.13 |
| 19 | 32 | 26.8 | 5.2 | 0.14 |
| 20 | 32.4 | 26.8 | 5.6 | 0.14 |
| 21 | 32.8 | 26.8 | 6 | 0.15 |
| 22 | 33.2 | 26.8 | 6.4 | 0.16 |
| 23 | 33.6 | 26.8 | 6.8 | 0.17 |
| 24 | 34.1 | 26.9 | 7.2 | 0.18 |
| 25 | 34.5 | 27 | 7.5 | 0.18 |
| 26 | 35 | 27.1 | 7.9 | 0.19 |
| 27 | 35.3 | 27.1 | 8.2 | 0.2 |
| 28 | 35.7 | 27.1 | 8.6 | 0.21 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 29 | 36.2 | 27.1 | 9.1 | 0.21 |
| 30 | 36.8 | 27 | 9.8 | 0.22 |
| 31 | 37.1 | 27.1 | 10 | 0.23 |
| 32 | 37.5 | 27.1 | 10.4 | 0.24 |
| 33 | 37.9 | 27.1 | 10.8 | 0.24 |
| 34 | 38.4 | 27.1 | 11.3 | 0.25 |
| 35 | 39 | 27.1 | 11.9 | 0.25 |
| 36 | 39.2 | 27.1 | 12.1 | 0.26 |
| 37 | 39.4 | 27.3 | 12.1 | 0.27 |
| 38 | 40 | 27.4 | 12.6 | 0.27 |
| 39 | 40.4 | 27.4 | 13 | 0.28 |
| 40 | 40.9 | 27.4 | 13.5 | 0.29 |
| 41 | 41.3 | 27.4 | 13.9 | 0.29 |
| 42 | 41.7 | 27.6 | 14.1 | 0.29 |
| 43 | 42.2 | 27.7 | 14.5 | 0.3 |
| 44 | 42.6 | 27.7 | 14.9 | 0.31 |
| 45 | 43 | 27.7 | 15.3 | 0.31 |
| 46 | 43.3 | 27.8 | 15.5 | 0.32 |
| 47 | 43.8 | 27.9 | 15.9 | 0.32 |
| 48 | 44.2 | 28 | 16.2 | 0.33 |
| 49 | 44.6 | 28 | 16.6 | 0.33 |
| 50 | 44.9 | 28 | 16.9 | 0.34 |
| 51 | 45.3 | 28.2 | 17.1 | 0.34 |
| 52 | 45.7 | 28.2 | 17.5 | 0.34 |
| 53 | 46 | 28.3 | 17.7 | 0.35 |
| 54 | 46.4 | 28.3 | 18.1 | 0.35 |
| 55 | 46.8 | 28.5 | 18.3 | 0.35 |
| 56 | 47.2 | 28.5 | 18.7 | 0.36 |
| 57 | 47.7 | 28.6 | 19.1 | 0.36 |
| 58 | 48 | 28.8 | 19.2 | 0.36 |
| 59 | 48.3 | 29 | 19.3 | 0.37 |
| 60 | 48.7 | 29.1 | 19.6 | 0.37 |
| 61 | 49 | 29.2 | 19.8 | 0.37 |
| 62 | 49.4 | 29.1 | 20.3 | 0.38 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 63 | 49.7 | 29.3 | 20.4 | 0.38 |
| 64 | 50.1 | 29.4 | 20.7 | 0.38 |
| 65 | 50.5 | 29.4 | 21.1 | 0.39 |
| 66 | 50.9 | 29.6 | 21.3 | 0.39 |
| 67 | 51.3 | 29.7 | 21.6 | 0.39 |
| 68 | 52 | 29.7 | 22.3 | 0.4 |
| 69 | 52.4 | 29.9 | 22.5 | 0.4 |
| 70 | 52.7 | 30 | 22.7 | 0.4 |
| 71 | 53.1 | 30.2 | 22.9 | 0.4 |
| 72 | 53.4 | 30.3 | 23.1 | 0.4 |
| 73 | 53.8 | 30.3 | 23.5 | 0.41 |
| 74 | 54.3 | 30.4 | 23.9 | 0.41 |
| 75 | 54.6 | 30.5 | 24.1 | 0.41 |
| 76 | 54.9 | 30.7 | 24.2 | 0.42 |
| 77 | 55.4 | 30.7 | 24.7 | 0.42 |
| 78 | 55.9 | 30.7 | 25.2 | 0.42 |
| 79 | 56.3 | 30.9 | 25.4 | 0.42 |
| 80 | 56.6 | 31.1 | 25.5 | 0.43 |
| 81 | 56.9 | 31.3 | 25.6 | 0.43 |
| 82 | 57.3 | 31.4 | 25.9 | 0.43 |
| 83 | 57.6 | 31.5 | 26.1 | 0.43 |
| 84 | 58 | 31.6 | 26.4 | 0.44 |
| 85 | 58.5 | 31.7 | 26.8 | 0.44 |
| 86 | 59.1 | 31.9 | 27.2 | 0.44 |
| 87 | 59.7 | 32 | 27.7 | 0.44 |
| 88 | 60.6 | 32.1 | 28.5 | 0.44 |
| 89 | 61.4 | 32.3 | 29.1 | 0.45 |
| 90 | 62.1 | 32.6 | 29.5 | 0.45 |

ตารางผลการทดลองฮีตซิงก์ขนาด 40x45x21 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครีบ โดยเคลือบยางหนา 1.0 มิลลิเมตร ในเวลา 90 วินาที

| 40x45x21 mm. with 4 fins / 1.0 mm thickness | | | | |
|---|-----------------|------------------|---------|----------|
| Time (s) | T hot side (°C) | T cold side (°C) | DT (°C) | Volt (V) |
| 0 | 25.9 | 25.5 | 0.4 | 0 |
| 1 | 25.9 | 25.5 | 0.4 | 0 |
| 2 | 25.8 | 25.5 | 0.3 | 0 |
| 3 | 25.8 | 25.5 | 0.3 | 0 |
| 4 | 25.8 | 25.5 | 0.3 | 0.01 |
| 5 | 26.1 | 25.6 | 0.5 | 0.01 |
| 6 | 26.2 | 25.6 | 0.6 | 0.02 |
| 7 | 26.3 | 25.6 | 0.7 | 0.04 |
| 8 | 26.5 | 25.6 | 0.9 | 0.05 |
| 9 | 26.6 | 25.6 | 1 | 0.06 |
| 10 | 26.7 | 25.6 | 1.1 | 0.07 |
| 11 | 26.9 | 25.6 | 1.3 | 0.08 |
| 12 | 27.1 | 25.6 | 1.5 | 0.09 |
| 13 | 27.3 | 25.6 | 1.7 | 0.11 |
| 14 | 27.4 | 25.6 | 1.8 | 0.12 |
| 15 | 27.5 | 25.6 | 1.9 | 0.13 |
| 16 | 27.8 | 25.6 | 2.2 | 0.15 |
| 17 | 28.1 | 25.6 | 2.5 | 0.16 |
| 18 | 28.4 | 25.6 | 2.8 | 0.17 |
| 19 | 28.8 | 25.6 | 3.2 | 0.18 |
| 20 | 29.1 | 25.6 | 3.5 | 0.2 |
| 21 | 29.4 | 25.6 | 3.8 | 0.2 |
| 22 | 29.8 | 25.6 | 4.2 | 0.22 |
| 23 | 30.2 | 25.6 | 4.6 | 0.23 |
| 24 | 30.6 | 25.7 | 4.9 | 0.24 |
| 25 | 31 | 25.7 | 5.3 | 0.25 |
| 26 | 31.4 | 25.7 | 5.7 | 0.26 |
| 27 | 31.8 | 25.7 | 6.1 | 0.27 |
| 28 | 32.2 | 25.7 | 6.5 | 0.28 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 29 | 32.6 | 25.7 | 6.9 | 0.29 |
| 30 | 33.1 | 25.7 | 7.4 | 0.3 |
| 31 | 33.5 | 25.7 | 7.8 | 0.31 |
| 32 | 34 | 25.7 | 8.3 | 0.31 |
| 33 | 34.4 | 25.7 | 8.7 | 0.32 |
| 34 | 34.8 | 25.8 | 9 | 0.33 |
| 35 | 35.2 | 25.9 | 9.3 | 0.34 |
| 36 | 35.6 | 26 | 9.6 | 0.35 |
| 37 | 35.9 | 26.1 | 9.8 | 0.35 |
| 38 | 36.3 | 26.1 | 10.2 | 0.36 |
| 39 | 36.8 | 26.1 | 10.7 | 0.37 |
| 40 | 37.3 | 26.1 | 11.2 | 0.37 |
| 41 | 37.7 | 26.1 | 11.6 | 0.38 |
| 42 | 38.1 | 26.1 | 12 | 0.39 |
| 43 | 38.5 | 26.1 | 12.4 | 0.39 |
| 44 | 39.1 | 26.2 | 12.9 | 0.39 |
| 45 | 39.4 | 26.3 | 13.1 | 0.4 |
| 46 | 39.8 | 26.4 | 13.4 | 0.41 |
| 47 | 40.1 | 26.4 | 13.7 | 0.41 |
| 48 | 40.4 | 26.4 | 14 | 0.42 |
| 49 | 41 | 26.4 | 14.6 | 0.42 |
| 50 | 41.5 | 26.5 | 15 | 0.43 |
| 51 | 42 | 26.6 | 15.4 | 0.43 |
| 52 | 42.5 | 26.7 | 15.8 | 0.43 |
| 53 | 43.1 | 26.7 | 16.4 | 0.44 |
| 54 | 43.6 | 26.8 | 16.8 | 0.44 |
| 55 | 44.1 | 26.8 | 17.3 | 0.45 |
| 56 | 44.7 | 26.8 | 17.9 | 0.45 |
| 57 | 45.2 | 26.9 | 18.3 | 0.45 |
| 58 | 45.7 | 26.9 | 18.8 | 0.46 |
| 59 | 46.1 | 27 | 19.1 | 0.46 |
| 60 | 46.7 | 27.1 | 19.6 | 0.46 |
| 61 | 47.2 | 27.1 | 20.1 | 0.47 |
| 62 | 47.7 | 27.1 | 20.6 | 0.47 |

| | | | | |
|----|------|------|------|------|
| 63 | 48.3 | 27.2 | 21.1 | 0.47 |
| 64 | 48.8 | 27.3 | 21.5 | 0.48 |
| 65 | 49.2 | 27.4 | 21.8 | 0.48 |
| 66 | 49.7 | 27.4 | 22.3 | 0.48 |
| 67 | 50.1 | 27.5 | 22.6 | 0.48 |
| 68 | 50.7 | 27.6 | 23.1 | 0.49 |
| 69 | 51.2 | 27.7 | 23.5 | 0.49 |
| 70 | 51.7 | 27.8 | 23.9 | 0.49 |
| 71 | 52.1 | 27.8 | 24.3 | 0.5 |
| 72 | 52.5 | 27.9 | 24.6 | 0.5 |
| 73 | 52.9 | 27.9 | 25 | 0.5 |
| 74 | 53.3 | 28.1 | 25.2 | 0.5 |
| 75 | 53.7 | 28.2 | 25.5 | 0.5 |
| 76 | 54.1 | 28.2 | 25.9 | 0.51 |
| 77 | 54.6 | 28.3 | 26.3 | 0.51 |
| 78 | 55.1 | 28.4 | 26.7 | 0.51 |
| 79 | 55.5 | 28.4 | 27.1 | 0.51 |
| 80 | 55.8 | 28.5 | 27.3 | 0.51 |
| 81 | 56.2 | 28.6 | 27.6 | 0.52 |
| 82 | 56.7 | 28.7 | 28 | 0.52 |
| 83 | 57 | 28.9 | 28.1 | 0.52 |
| 84 | 57.5 | 28.9 | 28.6 | 0.52 |
| 85 | 57.9 | 29 | 28.9 | 0.52 |
| 86 | 58.2 | 29.1 | 29.1 | 0.52 |
| 87 | 58.5 | 29.2 | 29.3 | 0.53 |
| 88 | 58.7 | 29.3 | 29.4 | 0.53 |
| 89 | 59 | 29.4 | 29.6 | 0.53 |
| 90 | 59.7 | 29.5 | 30.2 | 0.53 |

ประวัติผู้เขียน

| | |
|----------------------|--|
| ชื่อ | นายกฤตานน ประเทพา |
| วันเกิด | 12 เมษายน 2534 |
| สถานที่เกิด | อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน | เลขที่ 101 หมู่ 11 ตำบลเหนือเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด 45000 |
| ตำแหน่งหน้าที่การงาน | อาจารย์ |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ. 2556 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2560 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |