



การทดลองผลกระทบจากแผ่นดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสีต่อการผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

พันจ่าอากาศเอกฐิติวัฒน์ กล้าหาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การทดลองผลกระทบจากแผ่นดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสีต่อการผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

The seal of Rajabhat Nakhon Phanom University is a circular emblem. It features a central five-tiered stupa (chedi) with a flame-like flame emerging from its top. This central stupa is flanked by two smaller, three-tiered stupas. The entire central composition is surrounded by a decorative border of stylized floral and flame motifs. The outermost ring of the seal contains the university's name in Thai script: "มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ" (Mahavithayalai Technonoi Phra Chomklao Phra Nakhon Nuea).

พันจ่าอากาศเอกฐิติวัฒน์ กล้าหาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การทดลองผลกระทบจากแผ่นดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสีต่อการผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

โดย พันจ่าอากาศเอกฐิติวัฒน์ กล้าหาญ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลกาญจน์ วงศ์ก่อ
ทรัพย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชัยยศ ดำรงกิจโกศล)

..... กรรมการภายนอก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ติกะ บุญนาค)

ชื่อ	: พันจ่าอากาศเอกฐิติวัฒน์ กล้าหาญ
ชื่อวิทยานิพนธ์	: การทดลองผลกระทบจากแผ่นดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสีต่อการผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก
สาขาวิชา	: เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	: รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์
ปีการศึกษา	: 2568

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นศึกษาทดลองเกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนร่วมกับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกผ่านกระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี (radiation heat transfer) โดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนทำจากอะลูมิเนียมและทองแดงการทดลองนี้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการโดยสร้างชุดอุปกรณ์ขนาดเล็กขึ้นมา ช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นให้ความร้อนและแผ่นดูดซับความร้อนถูกกำหนดคงที่ที่ระยะ 1 cm กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นให้ความร้อนถูกปรับเปลี่ยนที่ค่าต่าง ๆ ได้แก่ 1000, 1100, 1200, 1300 และ 1400 W ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิผิวที่ 320, 385, 436, 487 และ 550 °C ตามลำดับ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกำลังความร้อนโดยเมื่อใช้แผ่นดูดซับความร้อนอะลูมิเนียมและทองแดง ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.1085 W และ 0.061 W ตามลำดับ ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างด้านร้อนและเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 89.59 °C และ 39.59 °C ที่ $T_{\text{su}} = 550$ °C ตามลำดับ และให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.74% และ 0.13% ตามลำดับแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำที่สามารถจ่ายให้ LED ติดสว่างได้คือ 1.7 V ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการถึงแรงดัน 1.7 V จะลดลง แต่ในกรณีของทองแดงไม่สามารถทำให้เกิดแรงดันนี้ได้เลยในทุกเงื่อนไขผลการทดลองยืนยันว่า การใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นตัวกลางดูดซับและถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีไปยังโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าแผ่นดูดซับความร้อนที่ทำจากทองแดง

(มีจำนวนทั้งสิ้น 75 หน้า)

คำสำคัญ : เทอร์โมอิเล็กทริก; การดูดซับความร้อน; กำลังไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



Name : Fs.1 Thitiwat Klahan

Thesis Title : Experimental on the effect of radiation heat absorber
on thermoelectric power generation.

Major Field : Energy Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok

Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Dusit Ngamrunroj

Co-Advisor : Associate Professor Dr. Preeda Chantawong

Academic Year : 2025

ABSTRACT

This thesis experimental study heat absorber to generating electricity by thermoelectric modules from radiation. It explores the principle of heat transfer through radiation using an aluminum and copper heat absorber plate. The experiment was conducted by constructing a small-scale apparatus in a laboratory setting. The air gap between the heating plate and the heat absorber plate was fixed at 1 cm. The electrical power supplied to the heating plate was varied 1000 1100 1200 1300 1400W, it temperature on surface (T_{su}) with: 320, 385, 436, 487, and 550 °C respective. The results showed that the electrical output increased with higher power input. The maximum electric power when using aluminium and copper absorber was 0.1085 W, 0.061 W, and the highest temperature difference between the hot and cold sides of the thermoelectric modules was 89.59°C and 39.59°C at T_{su} =550 °C respectively, and maximum efficiency are 0.74%, 0.13% respectively. Therefore, the voltage minimum for on LED at 1.7 V. As observed that with an increase in T_{su} , the time to attain 1.7 V was reduced, but copper did not occur at all time. this experiment confirmed that using aluminum sheets as a medium to absorb radiation heat and transfer heat to the thermoelectric module can produce electrical energy better than Copper absorber.

(Total 75 Pages)

Keywords: : thermoelectric, heat absorber, electrical power

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีและสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าไว้ได้ เนื่องจากการอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ คำปรึกษา ข้อคิดเห็นต่าง ๆ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ แท่นทอง ที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ คอยติดตามความคืบหน้าและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นประธานกรรมการและกรรมการในการสอบ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ทำให้ข้าพเจ้าสามารถพัฒนาผลงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูลในครั้งนี้ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายที่สุดนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยผลักดันให้กำลังใจมา โดยตลอดและคอยให้คำแนะนำที่ดีเสมอมาเป็นสิ่งที่มีคุณค่าอย่างมาก ตลอดจนผู้เขียนหนังสือ งานวิจัยและบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้จัดทำจนสามารถให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ฐิติวัฒน์ กล้าหาญ

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 สมมติฐาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 วิธีการศึกษาและดำเนินงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	6
2.2 หลักการผลิตไฟฟ้าและความเย็นจากเทอร์โมอิเล็กทริก	7
2.3 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วย เทอร์โมอิเล็กทริก	8
2.4 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง	10
2.5 รูปแบบของการถ่ายเทความร้อน	11
2.6 กฎของโอห์ม	14
2.7 กำลังไฟฟ้า	14
2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว	15
2.9 การประยุกต์และการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	16

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	หน้า
	18
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	20
3.2 วิธีการดำเนินงาน	20
3.3 ดำเนินการทดลอง	26
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	29
4.1 ผลการทดลอง	29
4.2 เปรียบเทียบผลการทดลอง	33
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการทดลอง	50
5.2 อภิปรายผลการทดลอง	51
5.3 ข้อเสนอแนะ	52
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	56
ภาคผนวก ข. แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ	63

สารบัญตาราง (ถ้ามี)

หน้า

ตารางที่	หน้า
1-1 อุณหภูมิจากแผ่นทำความร้อนในการทดลองแทนประเภทแหล่งความร้อน เหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม	3
1-2 แผนการดำเนินงาน	5
2-1 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง	10
2-2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง	11
2-3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ	11
3-1 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก TEC1-12710	21
3-2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	24
3-3 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็ก- ทริก	24
4-21 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน	47
4-22 สรุปผลการวิเคราะห์โมเดล	48
4-23 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ โดยใช้วิธีของ Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	48
5-1 ผลการทดลองภายใต้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	51
ก-1 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W	57
ก-2 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,100 W	58
ก-3 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,200 W	59
ก-4 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,300 W	60
ก-5 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,400 W	61
ก-6 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้า	62

สารบัญตาราง(ต่อ)

ข-1 ข้อมูลผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้า แผ่นดูดซับความร้อนที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	64
ข-2 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังแผ่นดูดซับความร้อนที่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	65
ข-3 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	66
ข-4 กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	67
ข-5 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	68
ข-6 ค่าความร้อนการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นทำความร้อนถึงแผ่นดูดซับ ความร้อนที่กำลังไฟฟ้า 5 ระดับ	69
ข-7 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่กำลังไฟฟ้า 5 ระดับ	70

สารบัญรูปภาพ (ถ้ามี)

ภาพที่	หน้า
1-1 ความร้อนสูญเสียจากกระบวนการผลิตไอน้ำ	2
1-2 กระบวนการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า	2
2-1 แผนภาพการทดลองของ Thomas Seebeck	6
2-2 ปรัชญาการค้นพบ Peltie	7
2-3 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก	8
2-4 วงจรจ่ายไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก	8
3-1 ผังระเบียบวิธีการดำเนินการทดลอง	19
3-2 เทอร์โมอิเล็กทริก	20
3-3 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ภายในชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก	21
3-4 แผ่นอะลูมิเนียมรับความร้อนและถ่ายเทความร้อน	22
3-5 ฉนวนกันความร้อนชนิดเส้นใยเซรามิก	22
3-6 อุปกรณ์สำหรับระบายความร้อนที่ลดอุณหภูมิผิวด้านเย็น	22
3-7 แผ่นทำความร้อนและหม้อแปลงปรับแรงดัน	22
3-8 เครื่องบันทึกข้อมูลและมัลติมิเตอร์	23
3-9 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	23
3-10 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ	24
3-11 การทดลองในห้องปฏิบัติการ (1)	26
3-12 การทดลองในห้องปฏิบัติการ (2)	27
3-13 หมุนหม้อแปลงปรับแรงดันที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แผ่นทำความร้อน	27
3-14 จอแสดงผล	28
4-1 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง	32
4-2 การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้าแผ่นดูดซับความร้อนเทียบกับเวลา	34
4-3 การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังแผ่นดูดซับความร้อน เทียบกับเวลา	34
4-4 การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเวลา	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

4-5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา	38
4-6 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา	38
4-7 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา	39
4-8 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนแบบการแผ่รังสี ความร้อนจากแผ่นทำความร้อนถึงแผ่นดูดซับความร้อนเทียบกับเวลา	41
4-9 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับเวลา	44
4-10 กราฟเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็ก- ทริกสำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	44
4-11 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะ คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	45
4-12 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะ คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	45
4-13 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะ คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	46
4-14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะ คงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	46
4-15 กราฟช่วงความเชื่อมั่น 95% ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้	48
4-16 กราฟความน่าจะเป็นปกติจากข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

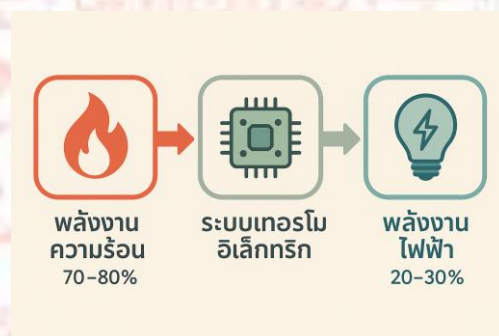
ในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ทุกวันนี้มีความจำเป็นจะต้องใช้พลังงานในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การติดต่อสื่อสาร การคมนาคมขนส่ง การทำอาหาร การสร้างความบันเทิงและพักผ่อน เป็นต้น ซึ่งพลังงานเหล่านี้นั้นมาจากหลากหลายแหล่ง เช่น น้ำมัน ไฟฟ้า แสงอาทิตย์และพลังงานหมุนเวียนต่าง ๆ ในอนาคตพลังงานไฟฟ้าจะเป็นพลังงานที่สำคัญมากเป็นอันดับหนึ่งมาจาก แหล่งพลังงาน เช่น น้ำมัน มีการคาดการณ์ว่าจะมีราคาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และอีกไม่นานพลังงานเหล่านี้ก็จะหมดไป เนื่องจากการผลิตอุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันไฟฟ้าถูกผลิตมาจากแหล่งเชื้อเพลิงที่หลากหลาย เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ พลังงานน้ำ ลม ความร้อนใต้พิภพ นิวเคลียร์ แสงอาทิตย์ และชีวมวล เป็นต้น เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่นำมาผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันล้วนแล้วแต่เป็นเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และมีราคาค่อนข้างสูง

จากการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง พบว่าในประเทศไทยมีพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งความร้อนต่าง ๆ จำนวนมากประมาณ 25% [1] ที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก โดยในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานที่มีการใช้พลังงานความร้อนสูง เช่น โรงงานที่มีระบบหม้อไอน้ำ (Boiler System) หรือเตาเผาอุตสาหกรรม มักเกิดความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) ที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ หากสามารถนำกลับมาใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานโดยรวม ลดการสูญเสียพลังงานและลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานรูปแบบอื่น ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีผู้วิจัยได้ให้ความสนใจที่จะนำแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมาผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนที่เหลือทิ้งเช่น จากไอความร้อนไอเสีย ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ความร้อนที่เหลือทิ้งจากขั้นตอนการผลิตไฟฟ้า ความร้อนที่สูญเสียจากกระบวนการผลิตไอน้ำ ดังแสดงในภาพ 1-1



ภาพที่ 1-1 ความร้อนสูญเสียจากกระบวนการผลิตไอน้ำ [2]

จากปัญหาดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำพลังงานร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Waste Heat Recovery) จากกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงานและเรื่องเทคโนโลยีวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) ที่สามารถนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงน่าจะตอบโจทย์นี้ได้ หลักการของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) จะเป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าใช้หลักของซีเบ็ค (Seebeck effect) [3]



ภาพที่ 1-2 กระบวนการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

โดยในการทดลอง ได้เลือกใช้แผ่นทำความร้อนที่สามารถจ่ายพลังงานได้ในช่วง 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W เพื่อจำลองลักษณะของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยพลังงานในช่วงนี้สามารถให้ความร้อนที่ผิวแผ่นทำความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 320–550 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิของความร้อนเกรดปานกลาง (medium-grade waste heat) ที่พบได้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ใช้ในการทดลองเพื่อแทนความร้อนเหลือทิ้งที่พบได้ในโรงงานอุตสาหกรรม [4]

ตารางที่ 1-1 อุณหภูมิจากแผ่นทำความร้อนในการทดลองแทนประเภทแหล่งความร้อนเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม

กำลังไฟฟ้า (W)	ประเภทแหล่งความร้อน
1,000	เตาอบแห้งและอบขนม
1,100	ท่อไอเสียกังหันก๊าซ
1,200	เตาเผาการอบชุบ
1,300	ท่อไอเสียเครื่องยนต์ลูบสูบ
1,400	ท่อไอเสียหม้อน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาแนวคิดในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลางจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนเป็นตัวถ่ายเทความร้อนไปยังโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ

1.2.1 ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้แผ่นโลหะ 2 ชนิด เช่น อะลูมิเนียม และทองแดง เป็นตัวดูดซับความร้อน

1.2.2 เปรียบเทียบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้แหล่งกำเนิดความร้อนที่ระดับ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W

1.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่ระดับ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ออกแบบการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมและทองแดงเป็นแผ่นดูดซับความร้อน มีขนาดความยาว 10 cm ความกว้าง 10 cm ความหนา 3 mm และมีช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นทำความร้อนกับแผ่นดูดซับความร้อนห่างกัน 1, 3, 5 cm

1.3.2 ทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนที่ระดับ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อน

1.3.3 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่ระดับ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

1.4 สมมติฐาน

1.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งที่สามารถใช้การทดลองได้จริง

1.4.2 สมมติฐานทางสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริก โดยกำหนดปัจจัยกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ระดับ คือ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W

$$\text{เมื่อ } H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5 \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

μ_1 เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกที่ กำลังไฟฟ้า 1,000 W

μ_2 เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกที่ กำลังไฟฟ้า 1,100 W

μ_3 เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกที่ กำลังไฟฟ้า 1,200 W

μ_4 เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกที่ กำลังไฟฟ้า 1,300 W

μ_5 เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกที่ กำลังไฟฟ้า 1,400 W

โดย ยอมรับสมมติฐาน H_0 เมื่อค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกโดยจะมีปัจจัย คือ กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ระดับ (1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W) ไม่แตกต่างกัน

โดย ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 เมื่อค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกโดยจะมีปัจจัย คือ กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ระดับ (1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W) แตกต่างกัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.5.2 ได้แนวคิดในการแปลงความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งความร้อนต่าง ๆ เช่น เตาเผา ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ท่อไอเสียหรือแหล่งความร้อนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวดูดซับความร้อนเป็นตัวส่งผ่านความร้อนไปยังตัวโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

1.5.3 ได้แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้ผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการใช้พลังงานพร้อมช่วยลดมลพิษทางอากาศ

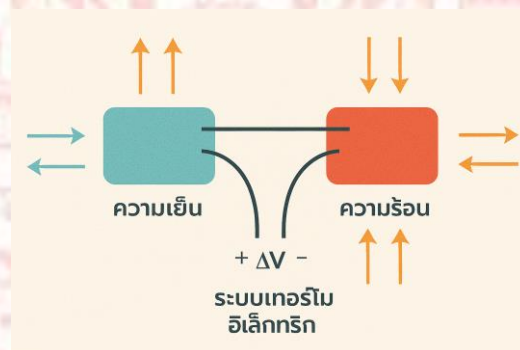
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

2.1.1 ทฤษฎีเทอร์โมอิเล็กทริก [5,6]

ปีค.ศ. 1821 Thomas Johann Seebeck พบว่าถ้าให้ความร้อนที่รอยต่อของโลหะ 2 ชนิด ทำให้เกิดความต่างศักย์ที่ปลายโลหะทั้งสอง มีผลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากด้านร้อนไปสู่ด้านเย็นได้เร็วกว่า เนื่องจากด้านร้อนอิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงกว่าด้านเย็นจึงทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดกระแสไฟในโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ซีเบ็ค (Seebeck effect)



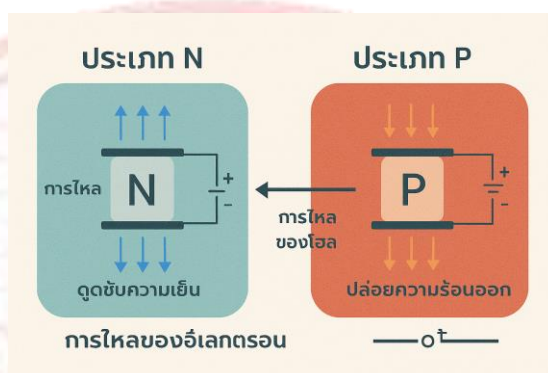
ภาพที่ 2-1 แผนภาพการทดลองของ Thomas Seebeck [5]

ความแตกต่างของโวลต์ที่วัดได้เทอร์โมอิเล็กทริกเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นไปตามเรียกปรากฏการณ์ของซีเบ็คเมื่อค่า α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ ซีเบ็ค

$$V = \alpha (T_h - T_c) \quad (2-1)$$

ต่อมา ค.ศ. 1834 Jean Peltier ได้ทำการทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโลหะทองแดงและโลหะบิสมัทที่เชื่อมต่อกัน ทำให้ที่รอยต่อระหว่างทองแดงและบิสมัทร้อนขึ้นส่วนอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง

เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านโลหะด้านหนึ่งจะปลดปล่อยความร้อน (Heat evolved) และอีกด้านหนึ่งอีกด้านหนึ่งจะดูดกลืนความร้อน (Heat absorbed) ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “เพลเทียร์ (Peltier effect)” ดังภาพที่ 2-2 ซึ่งมีลักษณะเป็นกระบวนการย้อนกลับของปรากฏการณ์ซีเบ็ค



ภาพที่ 2-2 ปรากฏการณ์ Peltie [6]

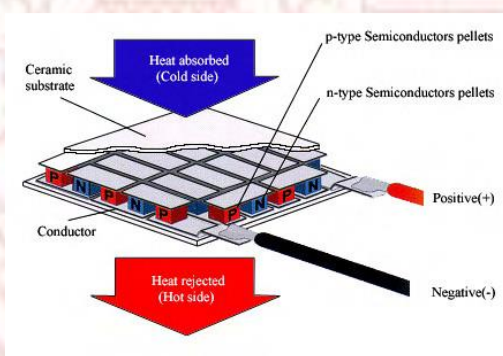
ทั้งปรากฏการณ์ Seebeck effect และ Peltier effect ได้มีการนำหลักการทั้งสองมาพัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ทำงานตามกระบวนการอุณหพลศาสตร์มี 2 รูปแบบ คือ กลจักรความร้อน (Heat engine) และกลจักรสูบน้ำร้อน (Heat pump) โดยมีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์แยกชนิดดังนี้

- อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าจากความร้อน (ตามปรากฏการณ์ Seebeck effect) เรียกว่า Thermoelectric Generator (TEG)
- อุปกรณ์ผลิตความเย็น (ตามปรากฏการณ์ Peltier effect) เรียกว่า Thermoelectric Cooler (TEC) หรือ Peltier cooler

2.2 หลักการผลิตไฟฟ้าและความเย็นจากเทอร์โมอิเล็กทริก [6]

เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานเป็นแหล่งพลังงานได้เรียกว่า “โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module)” ดังรูป 2-3 เริ่มต้นจากการนำเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น (N type) และชนิดพี (P type) ชิ้นเล็ก ๆ นำมาต่อกันเป็นคู่ ๆ โดยวางสลับกัน และมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้า ตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวสุดท้ายเมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (Load) หากมีกระแสไฟฟ้าไหลก็จะครบวงจรพอดี ที่ด้านบนและด้านล่างถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิค ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โมดูลผลิตได้เนื่องจากความต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นด้านบนและด้านล่างขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของ เอ็น-พี ในโมดูลนั้น การทำงานของโมดูล

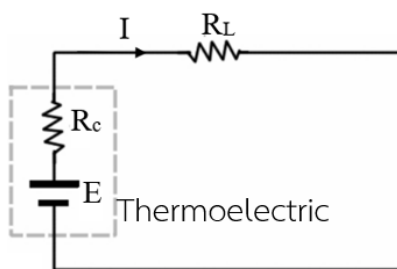
เทอร์โมอิเล็กทริก แบ่งเป็น 2 แบบดังนี้ แบบแรกโหมดผลิตไฟฟ้า (Generator mode) โดยให้เกิดความต่างของอุณหภูมิบนแผ่นเซรามิคด้านบนและด้านล่างทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล เนื่องจากพาหะเอ็นและพีในสารกึ่งตัวนำเหล่านั้นพบในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งมีพาหะ ข้างมากเป็นอิเล็กตรอน (Electron) หรือประจุลบ เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง การไหลของความร้อนจะทำให้เกิดการไหลของพาหะข้างมากเหล่านั้นและอิเล็กตรอนจะไหลจากผิวด้านบนไปสู่ด้านล่าง ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีพาหะข้างมากเป็นโฮล (Hole) หรือประจุบวก เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง โฮลก็จะไหลจากผิวด้านบนไปด้านล่างเช่นเดียวกัน ดังนั้นทิศทางของกระแสไฟฟ้าในโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจึงไหลตามกันไปทิศทางเดียวกัน ส่วน การทำงานอีกแบบหนึ่งในทางกลับกัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่าง เรียกว่า “โหมดผลิตความเย็นด้วยไฟฟ้า (Refrigerator mode)” เมื่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกโดยอาศัยการดูดกลืนความร้อนผ่านด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก และนำไปปลดปล่อยที่ด้านร้อนทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิโดยมีผลทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นมีอุณหภูมิลดลงจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าและการระบายความร้อนที่รอยต่อด้านร้อนออกไป



ภาพที่ 2-3 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก [6]

2.3 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก [7,8]

กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น การวิเคราะห์ปริมาณไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยสมการดังนี้



ภาพที่ 2-4 วงจรจ่ายไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก [7]

จากภาพที่ 2-4 ในกรณีไม่มีโหลดเป็นวงจรเปิด ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ ดังสมการ

$$V = S \times \Delta T \quad (2-2)$$

เมื่อ V คือ ค่าความต่างศักย์ (V)

S คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (V/K)

ΔT คือ ค่าผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (K)

กรณีที่ใส่โหลดให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก ค่าความต่างศักย์จะเป็นไปตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยเกิดภาวะการแบ่งแรงดันไฟฟ้าระหว่างความต้านทานภายในและโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่า

$$I = \frac{S \times \Delta T}{R_C + R_L} \quad (2-3)$$

เมื่อ I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

R_C คือ ค่าเฉลี่ยความต้านทานภายในของเซลล์ความร้อน (Ω)

R_L คือ ค่าความต้านทานโหลด (Ω)

ดังนั้น พบว่าเทอร์โมอิเล็กทริกจะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อค่าความต้านทานโหลดเท่ากับค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริก โดยแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

$$Q_h = (S \times T_h \times I) - (0.5 \times I^2 \times R_C) + K_C \times \Delta T \quad (2-4)$$

เมื่อ Q_h คือ ค่าความร้อนที่รับเข้า (W)

K_c คือ ค่าการนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก (W/K)

T_h คือ อุณหภูมิด้านร้อนของเซลล์ความร้อน (K)

ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (η_g) หาได้จากสมการ

$$\eta_g = \frac{V \times I}{Q_h} \times 100 \quad (2-5)$$

สำหรับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงจะต้องใช้เทอร์โมอิเล็กทริกมากกว่าหนึ่งตัวมาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและต่อขนานกันในการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ

$$V_0 = S_m \times \Delta T = I \times (R_m + R_L) \quad (2-6)$$

เมื่อ V_0 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น (V)

S_m คือ ค่าเฉลี่ยโมดูลสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (V/K)

R_m คือ ค่าเฉลี่ยโมดูลความต้านทาน (Ω)

กำลังไฟฟ้า (P_o) ที่ได้จากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหาได้จากสมการ

$$P_o = R_L \left[\frac{S_m \times \Delta T}{R_m + R_L} \right] \quad (2-7)$$

2.4 แหล่งความร้อนเหลือทิ้ง [9]

ความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat) เป็นความร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อนออกจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมออกทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของจักรกล เช่น การเผาไหม้ การผลิตไอน้ำ การหลอมวัสดุและการแปรรูปวัสดุ เป็นต้น ความร้อนเหลือทิ้งโดยทั่วไปจะแบ่งตามเกรดเป็น 3 ช่วง คือ ความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูงมีอุณหภูมิระหว่าง 600-1,600 °C ความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลางมีอุณหภูมิระหว่าง 200-500 °C และความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำอุณหภูมิระหว่าง 60-150 °C [4] โดยประมาณที่แสดงดังตาราง 2-1, 2-2 และ 2-3 ซึ่ง ความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวสามารถนำกลับคืนมาใช้ได้ แทนที่จะทิ้งไปกับระบบระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยเปล่าประโยชน์ อีกประการหนึ่งลักษณะของแหล่งความร้อนนี้เป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก จึงสามารถนำมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วย

โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อคืนกลับพลังงานเหลือทิ้งมาเป็นพลังงานไฟฟ้า อันจะช่วยให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าเสริมตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน

ตารางที่ 2-1 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูง

ประเภทของแหล่งความร้อน	อุณหภูมิ (°C)
เตาถ่านนิเกิล	1,371-1,649
เตาถ่านอะลูมิเนียม	649-760
เตาถ่านสังกะสี	760-1,093
เตาถ่านทองแดง	760-816
เตาหลอมเหล็ก	927-1,038
เตาหลอมแก้ว	982-1,538
เตาเผาขยะมูลฝอย	649-982

ตารางที่ 2-2 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลาง

ประเภทของแหล่งความร้อน	อุณหภูมิ (°C)
ท่อไอเสียหม้อน้ำ	232-482
ท่อไอเสียกังหันก๊าซ	371-538
ท่อไอเสียเครื่องยนต์ลูกสูบ	316-593
เตาเผาการอบชุบ	427-649
เตาอบแห้งและอบขนม	232-593

ตารางที่ 2-3 ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ

ประเภทของแหล่งความร้อน	อุณหภูมิ (°C)
กระบวนการ Steam Condensate	54-88
น้ำหล่อเย็นจากประตูดเตาหลอม	32-54
ต้กลูกปืน	32-88
เครื่องเชื่อม	32-88
เครื่องฉีดพลาสติก	32-88
เครื่องอัดอากาศ	27-49
เครื่องยนต์สันดาปภายใน	66-121
คอยล์ร้อนเครื่องปรับอากาศและตู้เย็น	32-43

2.5 รูปแบบของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิสามารถแบ่งตามลักษณะการส่งถ่ายความร้อนผ่านตัวกลางต่าง ๆ ได้ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน [10]

2.5.1 การนำความร้อน (Heat Conduction) คือ เป็นการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณผิวสัมผัสที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยผ่านตัวกลางส่วนมากตัวกลางจะเป็นวัสดุจำพวกโลหะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกจากด้านร้อนและการระบายความร้อนออกสู่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ดังสมการ

$$q = \frac{Q}{A} = k \Delta T / \Delta X \quad (2-8)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ (W/m^2)

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อน (WK/m)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน (m^2)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

ΔX คือ ระยะห่างระหว่างสองบริเวณที่อุณหภูมิต่างกัน (m)

2.5.2 การพาความร้อน (Heat Convection) คือ การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยมีตัวกลางเป็นตัวกลางพาความร้อนไปตัวกลางจะมีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซดังสมการ

$$q = \frac{Q}{A} = h(T_1 - T_2) \quad (2-9)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ (W/m^2)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน (m^2)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)

T_1 คือ อุณหภูมิสูง (K)

T_2 คือ อุณหภูมิต่ำ (K)

2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) คือการถ่ายเทความร้อนโดยไม่มีวัสดุตัวกลางมาช่วยในการถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบคลื่นความร้อนไปกระทบกับวัตถุนั้นๆ ดังนั้นเราพบว่าการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งสำหรับวัตถุดำ $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$ ดังนั้น $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$ สามารถแสดงได้ทางคณิตศาสตร์ในสมการ

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \sigma A_1 F_{1 \rightarrow 2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-10)$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟานโบลต์ซมัน, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

A_1 คือ พื้นที่ของวัตถุที่แผ่รังสี 1 (m^2)

$F_{1 \rightarrow 2}$ คือ วิวแฟกเตอร์จากพื้นผิว 1 ไปยังพื้นผิว 2

T_1 คือ อุณหภูมิของพื้นผิว 1 (K)

T_2 คือ อุณหภูมิของพื้นผิว 2 (K)

สำหรับวัตถุนี้อาจมีพื้นผิวเพียงสองพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนจะเท่ากับ [11]

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow 2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}} \quad (2-11)$$

เมื่อ ϵ_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิว 1

ϵ_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิว 2

A_1 คือ พื้นที่ของวัตถุที่แผ่รังสี 1 (m^2)

A_2 คือ พื้นที่ของวัตถุที่แผ่รังสี 2 (m^2)

$F_{1 \rightarrow 2}$ คือ วิวแฟกเตอร์จากพื้นผิว 1 ไปยังพื้นผิว 2

T_1 คือ อุณหภูมิของพื้นผิว 1 (K)

T_2 คือ อุณหภูมิของพื้นผิว 2 (K)

วิวแฟกเตอร์ (F_{12}) คือ สัดส่วนของพลังงานที่แผ่ออกจากพื้นผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ (isothermal), ทึบแสง (opaque), และแผ่รังสีแบบแพร่กระจาย (diffuse) จากพื้นผิวที่ 1 (ไม่ว่าจะเป็นการแผ่รังสีหรือการสะท้อน) ซึ่งตกกระทบโดยตรงบนพื้นผิวที่ 2 (เพื่อที่จะถูกดูดกลืน สะท้อน หรือทะลุผ่านไป) แฟกเตอร์การมองเห็นขึ้นอยู่กับ *เฉพาะรูปทรงเรขาคณิต* เท่านั้น

แฟกเตอร์การมองเห็นบางค่า ที่สามารถเขียนในรูปสมการเชิงวิเคราะห์ได้ จะถูกรวบรวมไว้ด้านล่างนี้ เราจะใช้ดัชนีย่อยใน F_{12} โดยไม่ต้องมีตัวคั่น เมื่อกล่าวถึงแฟกเตอร์การมองเห็นเพียงไม่กี่ค่าเท่านั้น แม้ว่าในบางกรณีอาจใช้รูปแบบที่ชัดเจนกว่า เช่น $F_{1,2}$ หรือที่ดีกว่า คือ $F_{1 \rightarrow 2}$

จึงคำนวณได้จากสมการ (2-12)

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{X}{L}, \quad \bar{Y} = \frac{Y}{L} \\ F_{12} &= \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[\frac{(1+\bar{X}^2)(1+\bar{Y}^2)}{1+\bar{X}^2+\bar{Y}^2} \right]^{1/2} \right. \\ &\quad + \bar{X}(1+\bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1+\bar{Y}^2)^{1/2}} \\ &\quad + \bar{Y}(1+\bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1+\bar{X}^2)^{1/2}} \\ &\quad \left. - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\} \end{aligned} \quad (2-12)$$

เมื่อ X คือ ความยาวของแผ่นซับความร้อน (mm)

Y คือ ความกว้างของแผ่นซับความร้อน (mm)

L คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นทำความร้อนกับแผ่นดูดซับความร้อน (mm)

ประสิทธิภาพ คือ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก หาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้า (P) ต่อความร้อนที่ถ่ายเทจากแหล่งความร้อนไปยังระบบผลิตไฟฟ้า [11] ดังสมการ

$$\eta = \frac{P}{Q_{1 \rightarrow 2}} \quad (2-13)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

$Q_{1 \rightarrow 2}$ คือ การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่ง (W)

2.6 กฎของโอห์ม [13]

ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากับความต้านทาน กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำใด ๆ แปรผันโดยตรงกับความต่างศักย์ (แรงดันไฟฟ้า หรือแรงดันตกคร่อม คือ กระแสมีค่ามากหรือน้อยตามความต่างศักย์นั้น) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I \propto V \quad (2-14)$$

และกระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความต้านทานระหว่างสองจุดนั้น (คือถ้าความต้านทานมากจะทำให้กระแสไหลผ่านน้อย, ถ้าความต้านทานน้อยจะทำให้มีกระแสมาก) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I \propto \frac{1}{R} \quad (2-15)$$

นำสูตรสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสองมารวมกัน, เขียนได้ดังนี้

$$I = \frac{V}{R} \quad (2-16)$$

เมื่อ V คือ ค่าความต่างศักย์ (V)

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

R คือ ค่าความต้านทานในวงจร (Ω)

2.7 กำลังไฟฟ้า [14]

กำลังไฟฟ้า คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 นาที มีหน่วยเป็นวัตต์หรือจูลต่อวินาที เครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิดจะใช้พลังงานไฟฟ้าต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งทราบได้จากตัวเลขที่กำกับไว้บนเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ระบุทั้งค่าความต่างศักย์และกำลังไฟฟ้า

$$P = VI \quad (2-17)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

V คือ ค่าความต่างศักย์ (V)

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

โดยทั่วไปนิยมวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นหน่วยที่ใหญ่กว่าหน่วยจูล โดยวัดกำลังไฟฟ้าเป็นกิโลวัตต์ และคิดช่วงเวลาเป็นชั่วโมง ดังนั้น พลังงานไฟฟ้าจึงวัดได้เป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมงหรือเรียกว่าหน่วยหรือยูนิท

2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว [15]

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis of Variance: One-way ANOVA) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไป เพื่อพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยจะมีปัจจัยต้นเพียงปัจจัยเดียว (หนึ่งตัวแปรอิสระ) ที่แบ่งกลุ่ม เช่น ระดับของพลังงาน ความเร็ว หรือปริมาณสารเคมี การทดสอบจะพิจารณาความแปรปรวนของข้อมูลภายในกลุ่ม (ภายในแต่ละระดับของปัจจัย) เปรียบเทียบกับความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัย) ผ่านการคำนวณค่าสถิติ F (F-ratio) ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนของความแปรปรวนระหว่างกลุ่มต่อภายในกลุ่ม ในการทดสอบทางสถิตินี้ จะตั้งสมมติฐานดังนี้ โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติ H_0 คือค่าเฉลี่ยของประชากรของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไปมีค่าเท่ากัน และ H_1 คือค่าเฉลี่ยอย่างน้อยหนึ่งกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน ดังนี้

$$\text{เมื่อ } H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \dots \neq \mu_k \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

โดยการตัดสินใจรับหรือปฏิเสธสมมติฐานจะอิงตามค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ หาก $P\text{-value} < 0.05$ (หรือระดับนัยสำคัญ 95%) ถือว่ามีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ และจะปฏิเสธ H_0

การใช้ One-way ANOVA มีข้อกำหนดเบื้องต้น ได้แก่ (1) ข้อมูลในแต่ละกลุ่มต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (normality), (2) ความแปรปรวนในแต่ละกลุ่มต้องมีความใกล้เคียงกัน (homogeneity of variance), และ (3) กลุ่มตัวอย่างต้องเป็นอิสระจากกัน (independence)

ในงานวิจัยนี้ One-way ANOVA ถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้ระดับกำลังไฟฟ้าต่างกัน (1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 วัตต์) เพื่อพิจารณาว่าระดับของพลังงานความร้อนมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้หรือไม่อย่างมีนัยสำคัญ

2.10 การประยุกต์และการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

นักวิทยาศาสตร์ทางด้านพลังงานได้มีการศึกษาหาแนวคิดและเทคนิคต่างๆ เพื่อรวบรวมพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากแหล่งความร้อนจากแหล่งต่าง ๆ เช่น แหล่งความร้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อนำความร้อนเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นเราพบว่า ประสิทธิภาพ

ของแผ่นดูดซับความร้อนเป็นสิ่งสำคัญมากที่เกี่ยวข้องอย่างมากกับการกระจายความร้อนผ่านแผ่นดูดซับความร้อน ดังนั้น ถ้าเราสามารถศึกษาถึงคุณสมบัติของแผ่นดูดซับความร้อนจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งที่จะนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกได้กลายเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่มีแนวโน้มที่ดีเนื่องจากมีข้อได้เปรียบที่ชัดเจน การนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นทางเลือกนี้ไปใช้ในการแปลงพลังงานความร้อนโดยตรงเป็นพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียนและการใช้ความร้อนเหลือทิ้งมาผลิตไฟฟ้าเป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงตามหลักการของซีเบ็ค เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีข้อดีมากมาย เช่น ความน่าเชื่อถือสูง ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว บำรุงรักษาง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [16]

การกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage: TES) คือเทคโนโลยีที่ทำการเก็บพลังงานความร้อนไว้โดยการให้ความร้อนหรือความเย็นแก่ตัวกลางเก็บพลังงาน เพื่อให้สามารถนำพลังงานที่เก็บไว้มานำใช้งานในภายหลังสำหรับการทำความร้อน การทำความเย็น และการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระบบ TES ถูกนำมาใช้เป็นพิเศษในอาคารและกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ

เทคโนโลยี TES ที่ช่วยเพิ่มมูลค่าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และลดความต้องการใช้พลังงานในอาคาร โดยได้อิทธิพลหลักการของวิธีการกักเก็บพลังงานหลายรูปแบบ รวมถึงการคำนวณความจุในการเก็บพลังงาน

เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานแบบรู้สึกได้ (Sensible Heat Storage) ซึ่งรวมถึงถังเก็บน้ำ การกักเก็บใต้ดิน และระบบกองวัสดุบรรจุ (packed-bed) ได้รับการทบทวนโดยสังเขป นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงระบบกักเก็บพลังงานแบบแฝง (Latent Heat Storage) ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase-Change Materials: PCM) สำหรับการใช้ในระบบทำความร้อน/ความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบปั๊มความร้อน และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (Concentrating Solar Power Plants) รวมถึงการกักเก็บแบบเคมีความร้อน (Thermo Chemical Storage)

ในการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกมีนักวิจัยได้มีการศึกษาในเรื่องนี้มีดังนี้

Hsiao และคณะ เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมการประยุกต์ใช้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์มาผลิตกระแสไฟฟ้าได้และ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 51.13 mV/cm^2 เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ของ ด้านร้อนและเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [17]

D. Champier และคณะ ได้นำความร้อนเหลือทิ้งจากเตาชีวมวลสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 6 W [18]

Maneewan และคณะ ได้ทำการทดลองและตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ตัวเก็บความร้อนเป็นรูปจานทรงกลมที่ติดบนหลังคาเพื่อรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ พบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1.2 W ภายใต้ความเข้มของรังสีดวงจากอาทิตย์ประมาณ 800 W/cm² ที่อุณหภูมิแวดล้อมระหว่าง 30 ถึง 35°C ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของระบบนี้อยู่ที่ประมาณ 1-4% [19]

Labaiyusoh และคณะ ได้ทำการทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าบนหลังคาโลหะที่ทำด้วยสีกาแฟพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก อยู่ที่ประมาณ 16°C และแรงดันไฟฟ้าได้ 0.12 V [20]

Watcharaudom และคณะ ได้ทำการทดลองและยืนยันว่าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่รังสี พบว่าช่องว่างของอากาศมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยพบว่าการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิต 0.3132 W และช่องว่างของอากาศ 0.5 cm และความแตกต่างของอุณหภูมิ 35 °C [11]

Pisut Thanthong และคณะได้ทำการทดลองและยืนยันว่าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งโดยใช้ครีبدูดซับแวนอนและอากาศเพื่อระบายความร้อน [21] แทนน้ำที่พัฒนามาจาก Watcharaudom โดยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่รังสี ผลการวิจัยนี้ตีพิมพ์ในงานวิจัยของ Thanthong et al

แนวคิดในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการเก็บรวบรวมความร้อนเหลือทิ้งจากขบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการแผ่รังสี ในงานวิจัยของ Watcharaudom และคณะแสดงให้เห็นว่าช่องว่างของอากาศมีผลกระทบต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อนพบว่าใช้ระบบเปิดจึงใช้ปริมาณน้ำเป็นจำนวนมากในการระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในระบบจริง และงานวิจัยของ Pisut Thanthong และคณะแสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นดูดซับความร้อนที่มีครีบบีผลกระทบต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แผ่นอะลูมิเนียมชนิดไม่มีครีเป็นวัสดุสำหรับการดูดซับพลังงานซึ่งจะถูกนำมาศึกษาผลกระทบต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งนี้ได้กำหนดให้ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนในระดับ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W และใช้อากาศร่วมกับพัดลมเป็นระบบในการระบายความร้อน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากขบวนการต่าง ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริก” จึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติของ เทอร์โมอิเล็กทริกมาเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบและทดสอบระบบการผลิตไฟฟ้าจากโมดูล-เทอร์โมอิเล็กทริก วิทยานิพนธ์นี้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 วิธีการดำเนินงาน
- 3.3 ดำเนินการทดลอง





ภาพที่ 3-1 ผังระเบียบวิธีการดำเนินการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

แผ่นทำความร้อน (Heater) ขนาด 134x200 mm	1 แผ่น
แผ่นวัสดุดูดซับความร้อนหนา 3 mm ขนาด 127x127 mm	1 แผ่น
ฉนวนกันความร้อนเส้นใยเซรามิก	1 ผืน
เทอร์โมอิเล็กทริก ขนาด 40x40 mm รุ่น TEC1-12710	4 แผ่น
แผ่นฮีตซิงค์ระบายความร้อน ขนาด 119x200 mm	1 แผ่น
พัดลมแรงดัน 12 V ขนาด 80x80 mm	2 ตัว
สายเทอร์โมคัปเปิล Type K	9 เส้น
เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) รุ่น Keithly DAQ 6510	1 เครื่อง
หม้อแปลงปรับแรงดัน (Regulator) INPUT 0-220 V/50-60 Hz, OUTPUT 0-250 V	1 เครื่อง
เครื่องมัลติมิเตอร์ วัดกระแสไฟฟ้า DC 50 μ A-10A, ค่าความแม่นยำ 0.5%	1 เครื่อง
ซิลิโคนคอมเพาต์ HTK-002-U1	1 หลอด
ตัวต้านทาน 1 โอห์ม	1 ตัว
หลอดไฟ LED	1 หลอด

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 ออกแบบการทดลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเลือกใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น (TEC1-12710) ดังภาพที่ 3-2 มีคุณสมบัติดังตาราง 3-1

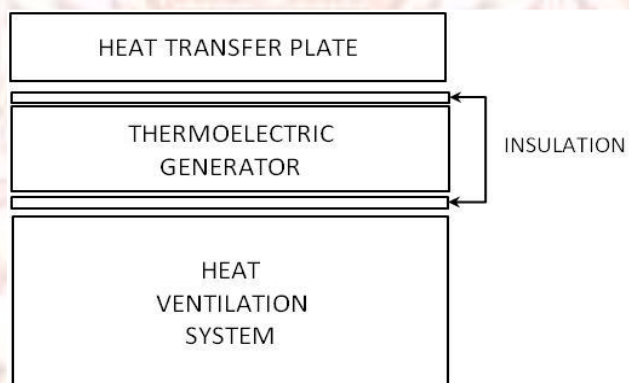


ภาพที่ 3-2 เทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก TEC1-12710 [22]

อุณหภูมิด้านร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	25 $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$
ปริมาณความร้อนสูงสุด (W)	85	96
ความแตกต่างสูงสุดของอุณหภูมิที่สร้างขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)	66	75
กระแสไฟฟ้าเข้าสูงสุด (A)	10.5	10.5
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)	15.2	17.4
ความต้านทานของโมดูล (Ω)	1.06	1.24

หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก คือ เมื่อผิวทั้งสองด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิแตกต่างกันจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังนั้น โครงสร้างของชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ถูกออกแบบให้ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วน ดังภาพที่ 3-3 ได้แก่ อุปกรณ์รับและถ่ายเทพลังงานความร้อน (Heat transfer plate) ทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้แก่ผิวด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์แปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (Thermoelectric generator) และอุปกรณ์ระบายความร้อน (Heat ventilation system) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากผิวด้านเย็น อุปกรณ์ทั้ง 3 ส่วนถูกประกอบเข้าด้วยกันเป็นโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 3-3 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ภายในชุดผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

อุปกรณ์ในการรับความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้แก่เทอร์โมอิเล็กทริกดังภาพที่ 3-4 ทำจากแผ่นดูดซับความร้อนหนา 3 mm ขนาด 127x127 mm และระบบระบายความร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกใช้ค้ำระบายความร้อนอะลูมิเนียม (Heat sink) พร้อมพัดลมและด้านข้างของแผ่นดูดซับความร้อนหุ้มด้วยฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทความร้อนไปในส่วนที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3-4 แผ่นรับความร้อน



ภาพที่ 3-5 ฉนวนกันความร้อนชนิดเส้นใยเซรามิก



(ก) แผ่นฮีตซิงค์



(ข) พัดลม



(ค) แผ่นฮีตซิงค์พร้อมพัดลม

ภาพที่ 3-6 อุปกรณ์สำหรับระบายความร้อนที่ลดอุณหภูมิผิวด้านเย็น

3.2.2 แหล่งพลังงานความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ โดยใช้แผ่นทำความร้อน (Heater) และใช้หม้อแปลงปรับแรงดันในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อนในภาพที่ 3-7



(ก) แผ่นทำความร้อน



(ข) หม้อแปลงปรับแรงดัน

ภาพที่ 3-7 แผ่นทำความร้อนและหม้อแปลงปรับแรงดัน

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ, วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้เครื่องบันทึกข้อมูล (Keithly DAQ 6510 data acquisition) และเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานต่ออนุกรมขนาด 1 โอห์ม สำหรับทดสอบ



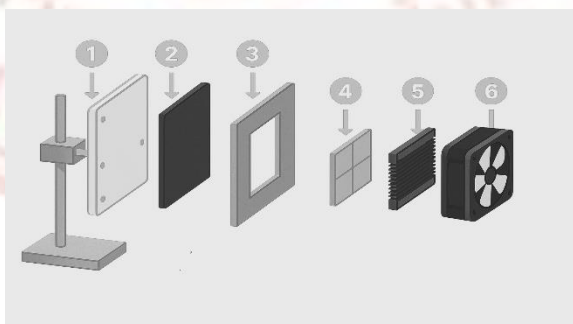
(ก) เครื่องบันทึกข้อมูล



(ข) มัลติมิเตอร์

ภาพที่ 3-8 เครื่องบันทึกข้อมูลและมัลติมิเตอร์

3.2.4 ประกอบอุปกรณ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ออกแบบและประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีและใช้แผ่นอะลูมิเนียมและทองแดงเป็นแผ่นดูดซับความร้อนประกอบไปด้วยแผ่นทำความร้อนชนิดสเตนเลสขนาด 130x250 mm กำลังไฟฟ้า 2,200 W แรงดัน 220 V แผ่รังสีมายังแผ่นดูดซับความร้อนที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 127x127 mm การถ่ายเทความร้อนไปยังโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 40x40 mm (TEC1-12710) ที่ด้านหลังของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก มีครีบบระบายความร้อนทำจากแผ่นอะลูมิเนียม ความกว้าง 119 mm และยาว 200 mm ร่วมกับพัดลมกระแสตรงจำนวน 2 ตัว ตามที่แสดงในภาพที่ 3-9

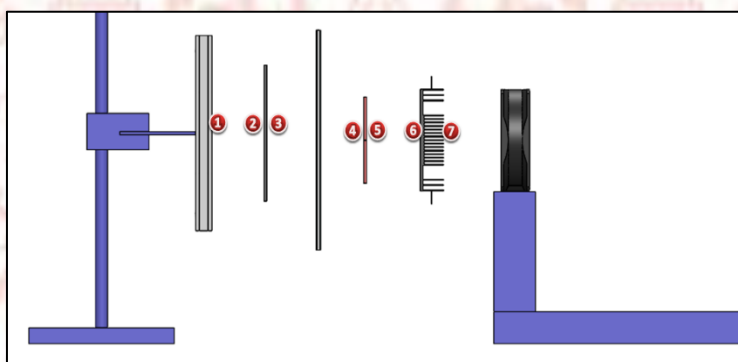


ภาพที่ 3-9 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ 3-2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ลำดับ	อุปกรณ์
1	แผ่นทำความร้อน
2	แผ่นอะลูมิเนียมดูดซับความร้อน
3	ฉนวนกันความร้อน
4	เทอร์โมอิเล็กทริก
5	แผงระบายความร้อนแบบครีป
6	พัดลม

3.2.5 ติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิและปริมาณทางไฟฟ้า โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Keithly DAQ 6510 data acquisition) ใช้วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ และศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ดังภาพที่ 3-10



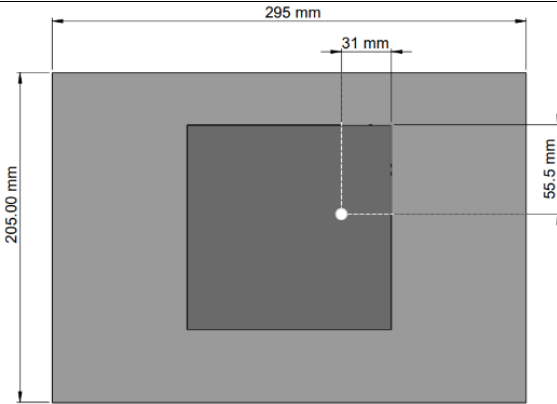
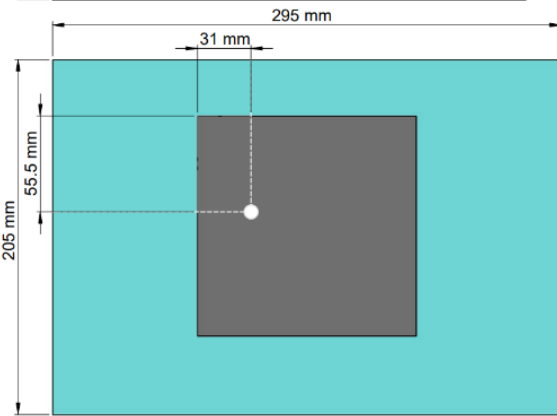
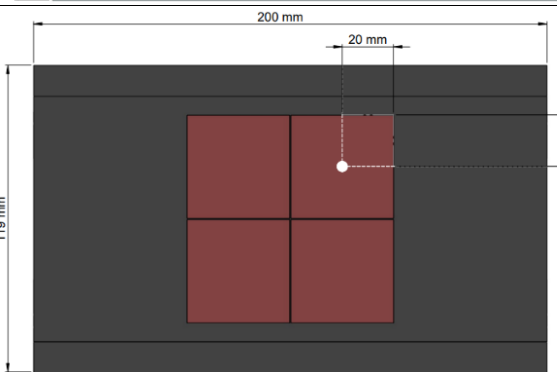
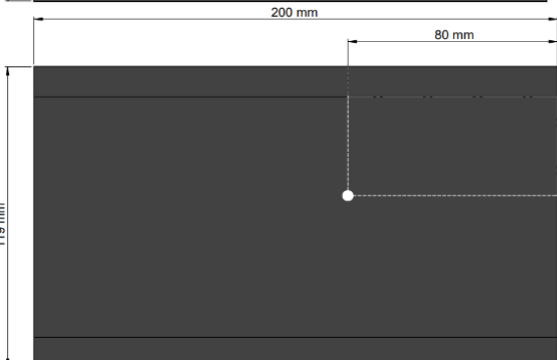
ภาพที่ 3-10 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ

3.2.6 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

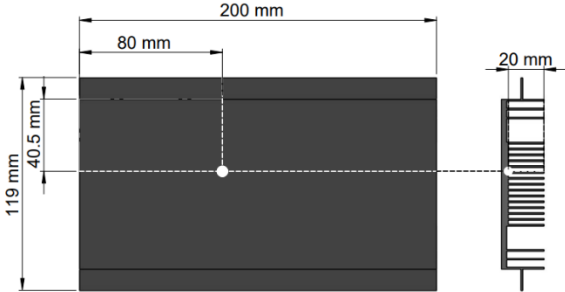
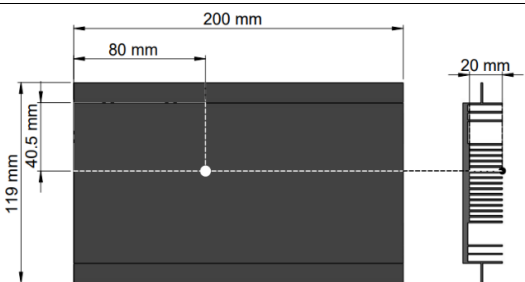
ตารางที่ 3-3 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ลำดับ	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	ชื่อตำแหน่ง
1		ด้านหน้า แผ่นทำ ความร้อน

ตารางที่ 3-3(ต่อ) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ลำดับ	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	ชื่อตำแหน่ง
2		ด้านหน้า แผ่นดูดซับ ความร้อน
3		ด้านหลัง แผ่นดูดซับ ความร้อน
4		ด้านร้อน โมดูลเทอร์- โมอิเล็กทริก
5		ด้านเย็น โมดูลเทอร์- โมอิเล็กทริก

ตารางที่ 3-3 (ต่อ) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

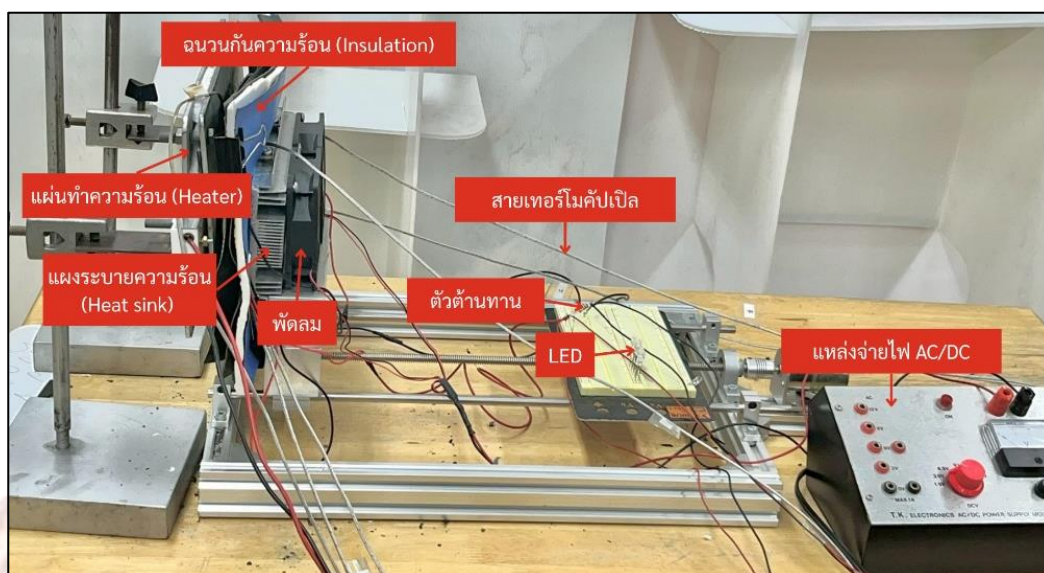
ลำดับ	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	ชื่อตำแหน่ง
6		ด้านบนของ แผงระบาย ความร้อน แบบครีป
7		ด้านปลาย ของแผง ระบาย ความร้อน แบบครีป

3.3 ดำเนินการทดลอง

3.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองและสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล



ภาพที่ 3-11 การทดลองในห้องปฏิบัติการ (1)



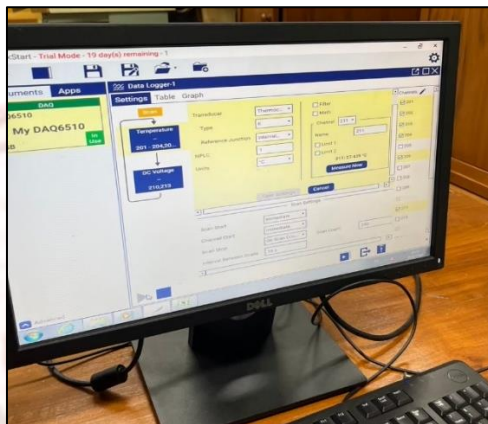
ภาพที่ 3-12 การทดลองในห้องปฏิบัติการ (2)

3.3.2 เริ่มการทดลองโดยเริ่มจากปรับหม้อแปลงปรับแรงดันจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 1,000 W ให้กับแผ่นทำความร้อน ไปจนถึงกำลังไฟฟ้าที่ 1,400 W



ภาพที่ 3-13 หมุนหม้อแปลงปรับแรงดันที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แผ่นทำความร้อน

3.3.3 บันทึกผลและเก็บข้อมูล



ภาพที่ 3-14 จอแสดงผล

การใช้โปรแกรม Keithley KickStart ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมและจัดการข้อมูลจาก DAQ6510 ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยเชื่อมต่อเครื่องผ่านพอร์ต USB หรือ LAN โปรแกรมจะตรวจพบอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ จากนั้นผู้ทดลองสามารถตั้งค่าการวัดได้อย่างละเอียด เช่น เลือกชนิดสัญญาณ ช่องวัด ความถี่ในการบันทึก และแสดงผลการวัดแบบเรียลไทม์เป็นกราฟพร้อมตารางข้อมูล KickStart สามารถบันทึกผลในรูปแบบ .CSV หรือ .XLSX เพื่อใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์ภายนอกได้อย่างสะดวก เหมาะสำหรับงานทดลองที่ต้องดูพฤติกรรมของสัญญาณต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

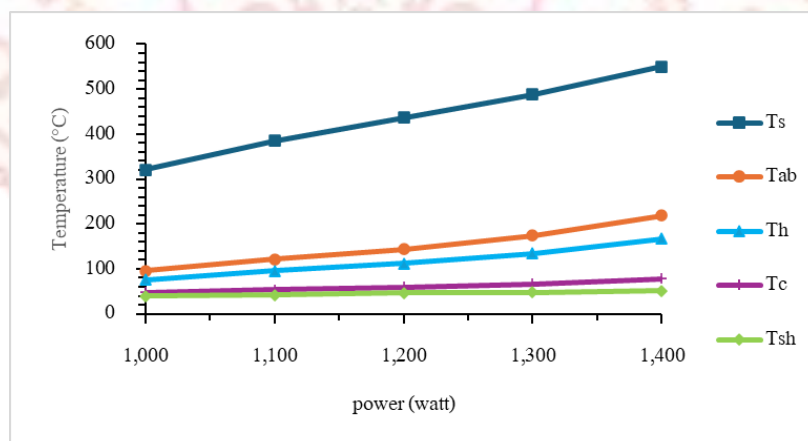
วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบการทดลองผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยทำการเปลี่ยนแปลงการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่แผ่นทำความร้อน 5 ระดับ ได้แก่ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W แทนความร้อนเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 600°C และช่องว่างระหว่างแผ่นทำความร้อนกับแผ่นดูดซับความร้อน 3 cm ผลการดำเนินงานสามารถรายงานเป็นลำดับดังนี้

4.1 ผลการทดลอง

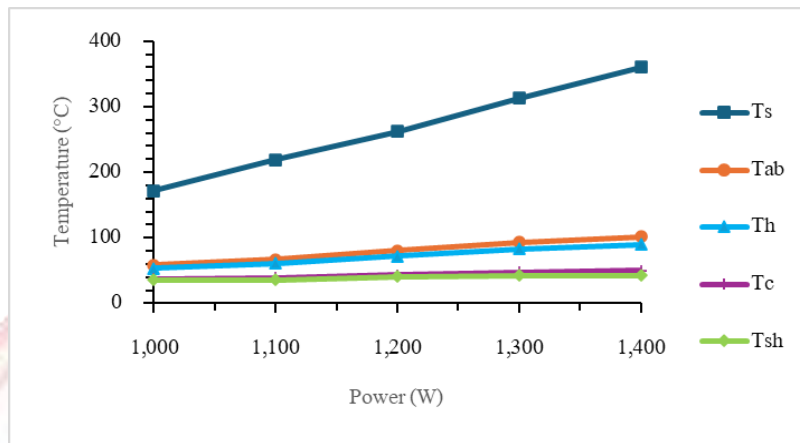
4.2 เปรียบเทียบผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

จากภาพที่ 4-1 แสดงผลของอุณหภูมิที่วัดด้านหน้าแผ่นทำความร้อน (T_1), ด้านหน้าแผ่นดูดซับความร้อน (T_2), ด้านหลังแผ่นดูดซับความร้อน (T_3), ด้านร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (T_4), ด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (T_5), ด้านบนของแผ่นระบายความร้อน (T_6) และด้านปลายของแผ่นระบายความร้อน (T_7) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก โดยให้ ภาพ(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของอุณหภูมินิยม (ข) ของทองแดง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-1 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง (ก) อลูมิเนียม (ข) ทองแดง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (1,000–1,400 W) กับค่าอุณหภูมิขององค์ประกอบต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิทุกตำแหน่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิผิวแผ่นทำความร้อน (T_s) มีค่าสูงที่สุด และเพิ่มขึ้นจากประมาณ 300 °C จนถึง 500 °C สะท้อนถึงการรับพลังงานความร้อนโดยตรงจากแหล่งกำเนิด ขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณแผ่นดูดซับ (Tab) มีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่าและอยู่ในช่วง 100–200 °C แสดงถึงการถ่ายเทพลังงานจากแผ่นทำความร้อนมายังแผ่นดูดซับที่ไม่สมบูรณ์เต็มที่สำหรับอุณหภูมิด้านร้อน (T_h) และด้านเย็น (T_c) ของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า Tab อย่างมาก โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าแต่ในอัตราที่ช้ากว่า ส่วนอุณหภูมิของฮีทซิงค์ (T_{sh}) มีค่าต่ำที่สุดและเกือบคงที่ตลอดการทดสอบ แสดงถึงประสิทธิภาพในการระบายความร้อนที่ดีของระบบ

จากผลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์อุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator: TEG) ทั้งนี้ การกระจายอุณหภูมิจาก T_s ไป T_{sh} สะท้อนกลไกการถ่ายเทความร้อนที่ค่อย ๆ ลดทอนลงตามลำดับ จึงเป็นข้อมูลสำคัญต่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบให้สามารถเพิ่มความต่างอุณหภูมิระหว่างสองด้านของโมดูลได้มากที่สุดเพื่อยกระดับสมรรถนะของการแปลงพลังงานในงานวิจัยต่อไป.

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่แสดงในกราฟทั้งสองรูป พบความแตกต่างที่สำคัญในด้านการกระจายอุณหภูมิและศักยภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบ โดยในกราฟแรก อุณหภูมิสูงสุดที่ผิวแผ่นทำความร้อน (T_s) มีค่าสูงกว่า 500 °C เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้า 1,400 W ในขณะที่กราฟที่สองมีค่า T_s สูงสุดเพียงประมาณ 300 °C แสดงให้เห็นว่าวัสดุหรือระบบในกราฟแรกสามารถดูดซับและสะสมพลังงานความร้อนได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดความต่างอุณหภูมิระหว่างจุดต่าง ๆ ภายในระบบสูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างด้านร้อน (T_h) และด้านเย็น (T_c) ของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า

นอกจากนี้ การกระจายอุณหภูมิของกราฟ(ก) มีช่วงที่กว้างกว่า กล่าวคือ T_s ไป T_{sh} มีความแตกต่างชัดเจน ในขณะที่กราฟที่สองมีการกระจายอุณหภูมิที่แคบกว่า ทำให้ค่า ΔT ระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกต่ำกว่า แม้ว่าฮีทซิงค์ (T_{sh}) ในทั้งสองกรณีจะคงค่าต่ำที่สุดและสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการระบายความร้อนที่ดี แต่ระบบในกราฟแรกต้องรองรับภาระการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ระบบตามกราฟแรกมีศักยภาพสูงกว่าในการสร้างความต่างอุณหภูมิและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มุ่งเน้น

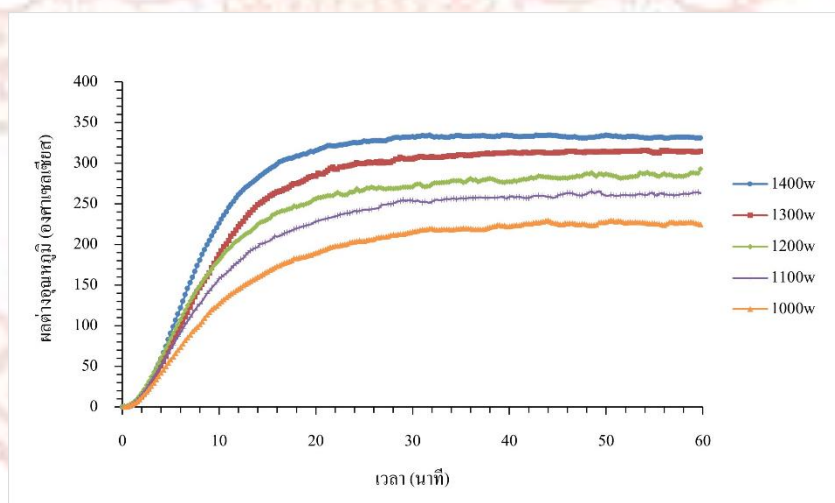
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ในขณะที่ระบบในกราฟที่สอง แม้มีระดับอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่า แต่ให้ความเสถียรและความปลอดภัยที่มากกว่า จึงเหมาะสมสำหรับงานวิจัยหรือการใช้งานที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอและลดความเสี่ยงจากความร้อนสูงเกินไป.

4.2 เปรียบเทียบผลการทดลอง

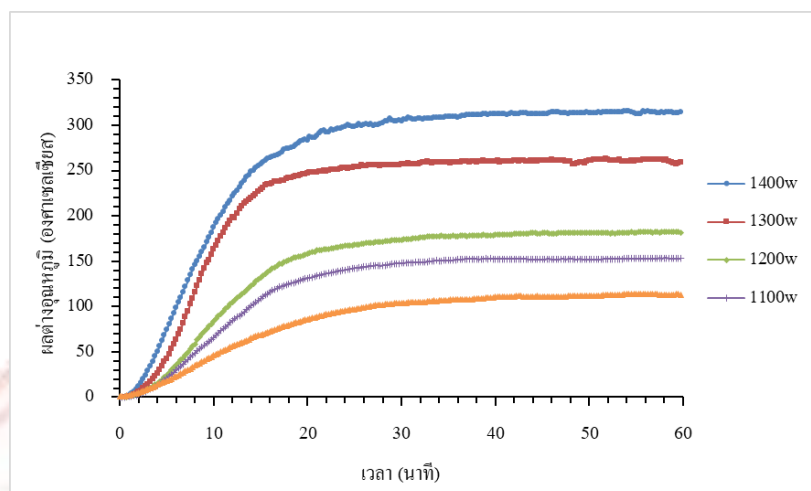
4.2.1 ผลต่างของอุณหภูมิต่อเครื่องผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นดูดซับความร้อน

พลังงานไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนที่ช่องว่างอากาศ 1 cm จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงไปถึงสภาวะที่ค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่า ถ้าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนยิ่งมากขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิก็จะมากขึ้น และใช้เวลานานขึ้นจนถึงสภาวะคงที่พบว่า ผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้าแผ่นดูดซับความร้อนจนถึงสภาวะที่ค่อนข้างคงที่ภายใน 25-30 นาที (ภาพที่ 4-2) โดย (ก) อลูมิเนียม (ข) ทองแดง



ภาพที่ 4-2 (ก) การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้าแผ่นดูดซับความร้อนอลูมิเนียมเทียบกับเวลา

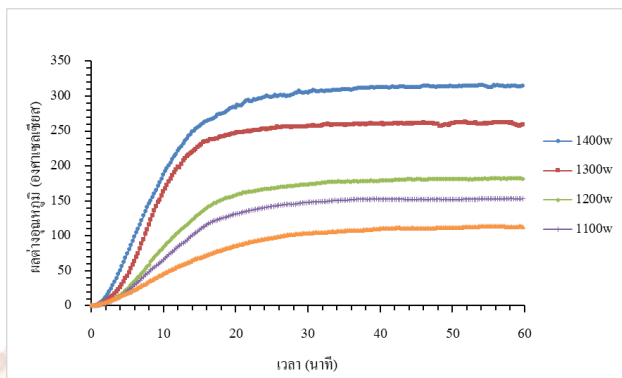


ภาพที่ 4-2 (ข) การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้าแผ่นดูดซับความร้อนทองแดงเทียบกับเวลา

ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างหน้าหลังผิวแผ่นดูดซับความร้อน

จากผลการทดลองที่แสดงภาพ 4-3 (ก) พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นดูดซับความร้อนมีค่าค่อนข้างสูงและมีความผันผวน โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 50–55 °C เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่แผ่นทำความร้อน ความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและค่อย ๆ เข้าสู่สภาวะกึ่งคงตัว ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ พบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มสูงขึ้น และใช้เวลานานขึ้นในการเข้าสู่สมดุล โดยใช้เวลาประมาณ 40–50 นาที พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นร่วมกันทั้งการแผ่รังสี การพาความร้อน และการนำความร้อนภายในแผ่นดูดกลืน

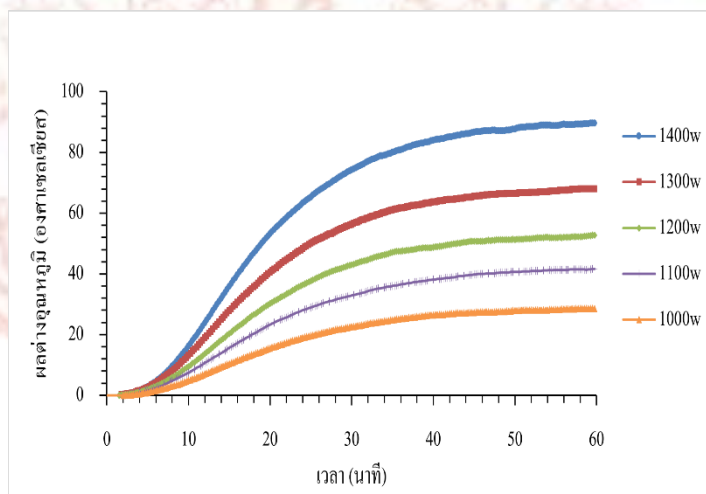
ในส่วนของ กราฟ (ข) แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของทองแดง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอย่างชัดเจน โดยมีค่าสูงสุดเพียง 12–13 °C แม้ว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นจะใกล้เคียงกับกราฟ (A) แต่พบว่าความผันผวนมีค่าน้อยกว่า และระบบมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวในเวลาประมาณ 40–50 นาที ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่โมดูลที่ถูกครอบงำด้วยการนำความร้อนโดยตรงจากผิวด้านหลังของแผ่นดูดซับความร้อน ส่งผลให้อิทธิพลของการแผ่รังสีและการพาความร้อนลดลง



ภาพที่ 4-2 (ข) การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้าแผ่นดูดซับความร้อนทองแดงเทียบกับเวลา

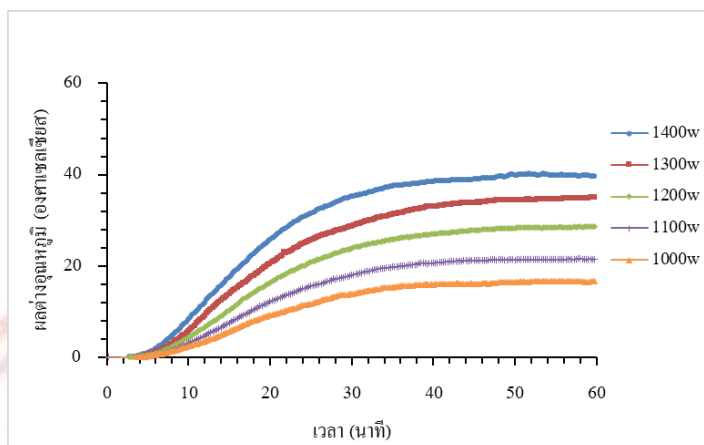
ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก

จากผลการทดลองที่แสดงในกราฟ 4-3(ก)และ(ข) พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกอะลูมิเนียมมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 90–95 °C เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่แผ่นทำความร้อนที่ 1400 W กราฟทุกเส้นแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องก่อนที่จะค่อย ๆ เข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาประมาณ 40–50 นาที นอกจากนี้ การเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบยังส่งผลให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการเข้าสู่สมดุล ความร้อนที่สะสมอยู่ในแผ่นดูดกลืนรังสีว่ามีกลไกการถ่ายเทความร้อนหลายรูปแบบเกิดขึ้นพร้อมกัน ได้แก่ การแผ่รังสี การพาความร้อน และการนำความร้อน



ภาพที่ 4-4 (ก) การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกของอลูมิเนียมเทียบกับเวลา

ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกทองแดง



ภาพที่ 4-4 (ก) การเปลี่ยนแปลงของผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกทองแดงเทียบกับเวลา

ผลความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ทองแดง โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 45–50 °C ภายใต้กำลังไฟฟ้า 1400 W ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากราฟ (C) อย่างชัดเจน แม้ว่าลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน กล่าวคือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 40–50 นาที แต่ค่าที่ได้ยังคงอยู่ในระดับต่ำกว่าตลอดการทดลอง

การวิเคราะห์เปรียบเทียบและสรุปผล

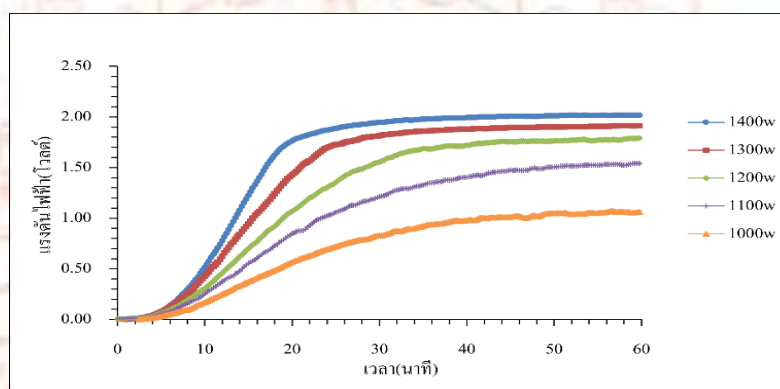
โดยสรุป แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงกว่า (90–95 °C) ซึ่งสะท้อนถึงการสะสมความร้อนที่ผิวแผ่นดูกลืนจากกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นร่วมกันหลายรูปแบบ ขณะที่ แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (45–50 °C) โดยภาพรวม ระบบต้องใช้เวลาประมาณ 40–50 นาทีในการเข้าสู่สมดุลความร้อน และเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จะทำให้เกิดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงขึ้นพร้อมทั้งใช้เวลานานขึ้นในการเข้าสู่สภาวะคงตัว

การวิเคราะห์เปรียบเทียบและสรุปผล

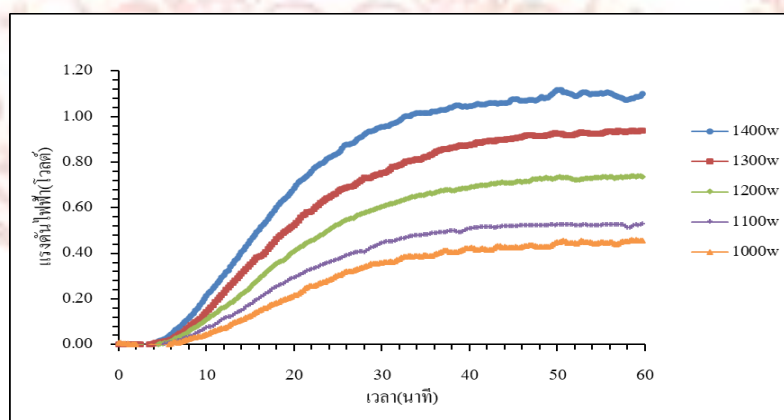
โดยสรุป กราฟ (A) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีความชัดเจนและซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากเกิดจากการทำงานร่วมกันของหลายกลไกการถ่ายเทความร้อน ในขณะที่กราฟ (B) แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีค่าต่ำกว่าแต่มีเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากกลไกการนำความร้อนมีบทบาทหลักต่อการถ่ายเทพลังงานเข้าสู่โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยภาพรวม ระบบต้องใช้เวลาประมาณ 30–50 นาทีในการเข้าสู่สมดุลความร้อน และเมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งเพิ่มระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวด้วย

4.2.2 แรงดันไฟฟ้า(V) กระแสไฟฟ้า(A) และกำลังไฟฟ้า(W)

จากในตารางที่ 4-6 ถึง 4-10 แสดงผลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก นำไปเขียนกราฟดังภาพที่ 4-5 ถึง 4-7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่สร้างได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเวลา สำหรับกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อน จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง โดยเฉพาะในช่วง 0-20 นาทีแรก (ภาพที่ 4-5) และเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) โดยใช้เวลาประมาณ 35-40 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ของอลูมิเนียมมีค่าระหว่าง 1.06-2.01 V ในส่วนของทองแดงมีค่าระหว่าง 0.40-1.06 V



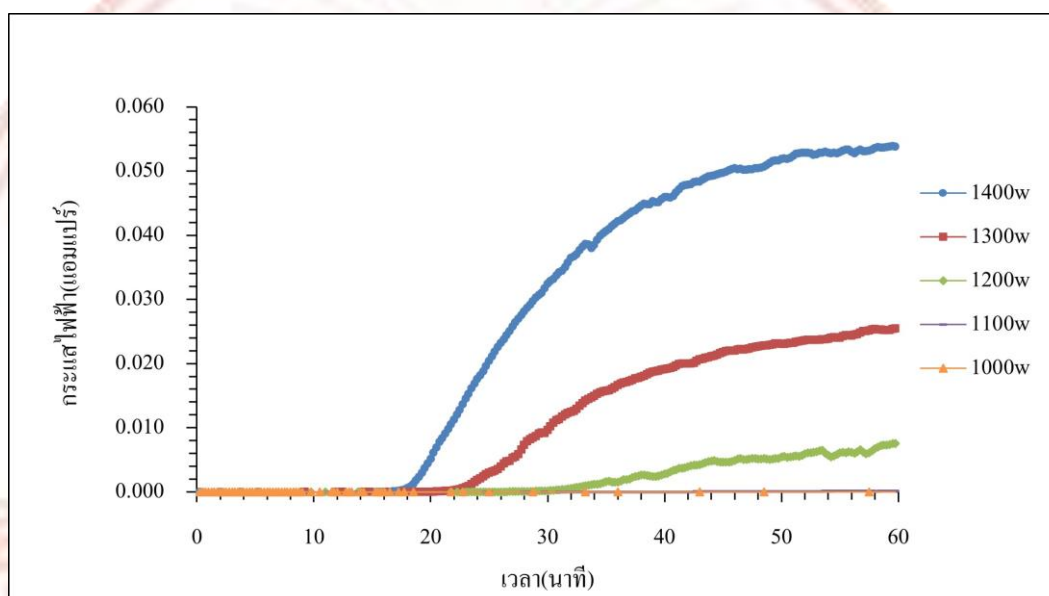
ภาพที่ 4-5 (ก) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลาของอลูมิเนียม



ภาพที่ 4-5 (ข) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลาของทองแดง

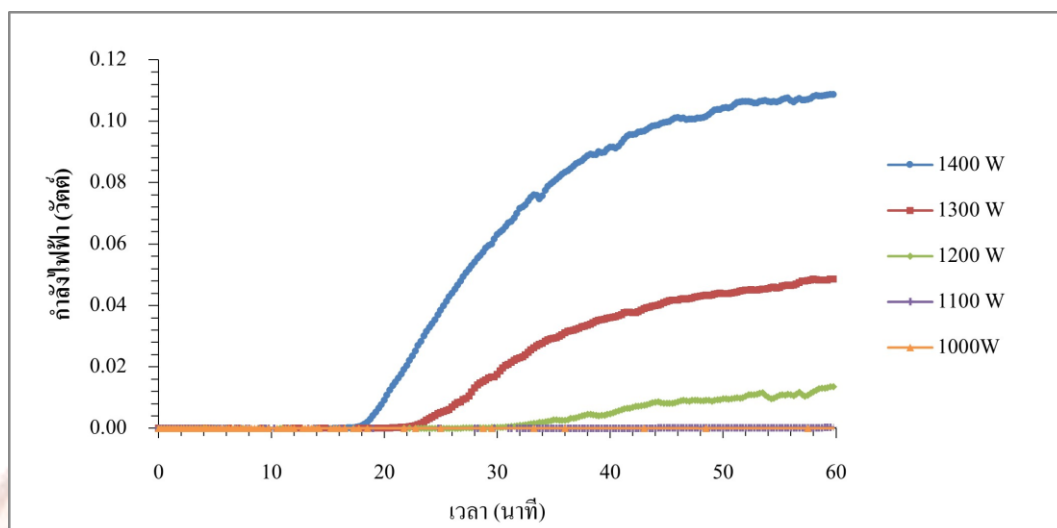
กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (ภาพที่ 4.6) พบว่ากำลังไฟฟ้า 1,000-1,100 W ที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อนไม่เกิดกระแสขึ้นเลยหรือเกิดขึ้นน้อยมากเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกน้อยเกินไปจึงมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มมีผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นมากพอที่ทำให้หลอด LED เริ่มสว่างที่กำลังไฟฟ้า 1,200 W ใช้เวลาประมาณ 30 นาที 1,300 W ใช้เวลาประมาณ 20 นาที และ 1,400 W ใช้เวลาประมาณ 18 นาที

ภาพที่ 4-5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา



ภาพที่ 4-6 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา

โดยกระแสที่ผลิตได้อยู่ระหว่าง 0.007-0.05 A จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ถ้ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อนยิ่งมากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกก็จะใช้เวลาน้อยลงในการทำให้หลอด LED เริ่มสว่างและกำลังไฟฟ้าที่สร้างได้ (ภาพที่ 4-7) จะสอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 0.01-0.1 W



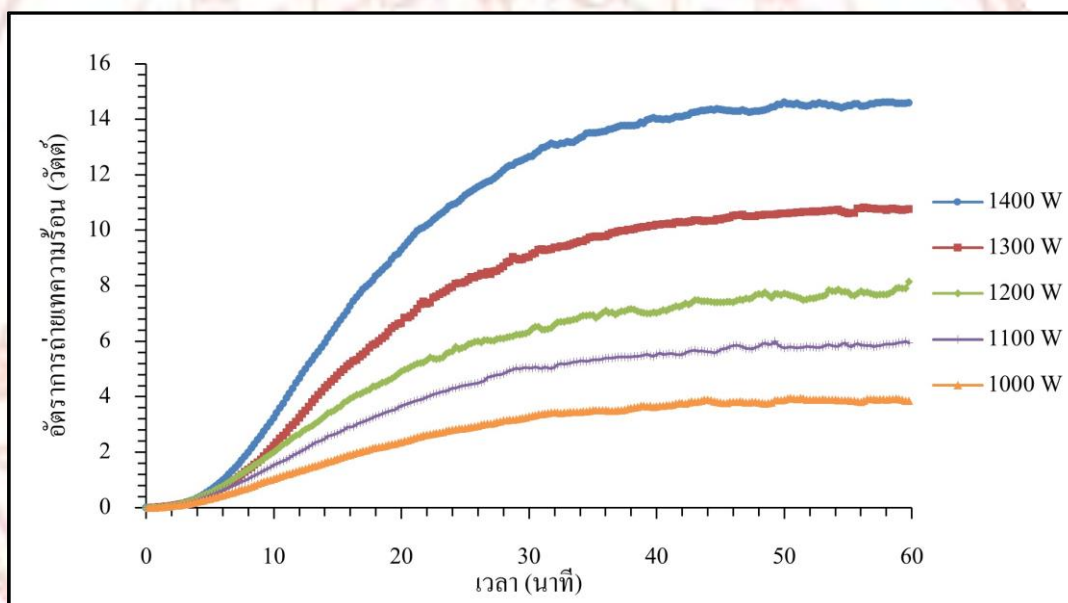
ภาพที่ 4-7 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลาของอุณหภูมิ



4.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

ตารางที่ ข-6 แสดงค่าความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นทำความร้อนถึงแผ่นดูดซับความร้อน ($Q_1 \rightarrow_2$)

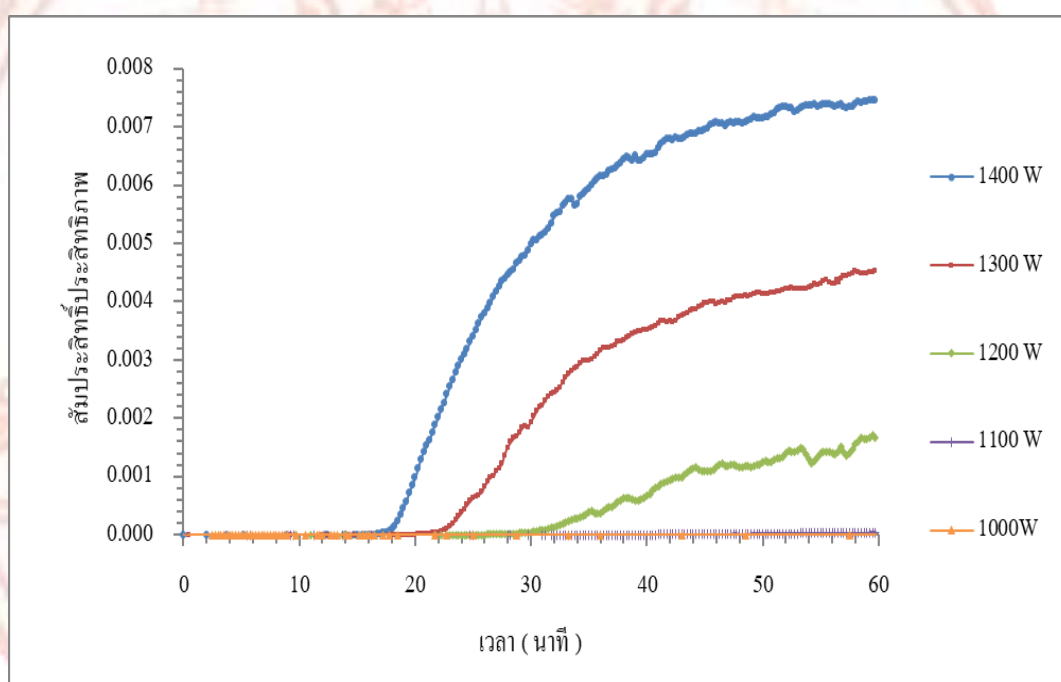
การแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นทำความร้อนถึงแผ่นดูดซับความร้อน ($Q_1 \rightarrow_2$) นำไปเขียนกราฟดังภาพที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากแผ่นทำความร้อนมาถึงแผ่นดูดซับความร้อน เทียบกับเวลา พบว่าในช่วงต้นของการทดลอง 0-30 นาทีแรก อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าค่อนข้างสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงเวลา 30-40 นาที จึงแสดงให้เห็นว่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อนยิ่งสูงทำให้แผ่นดูดซับความร้อนได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้นและใช้เวลานานขึ้นจึงจะเข้าสู่สภาวะคงที่



ภาพที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นทำความร้อนถึงแผ่นดูดซับความร้อนเทียบกับเวลา

4.2.4 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

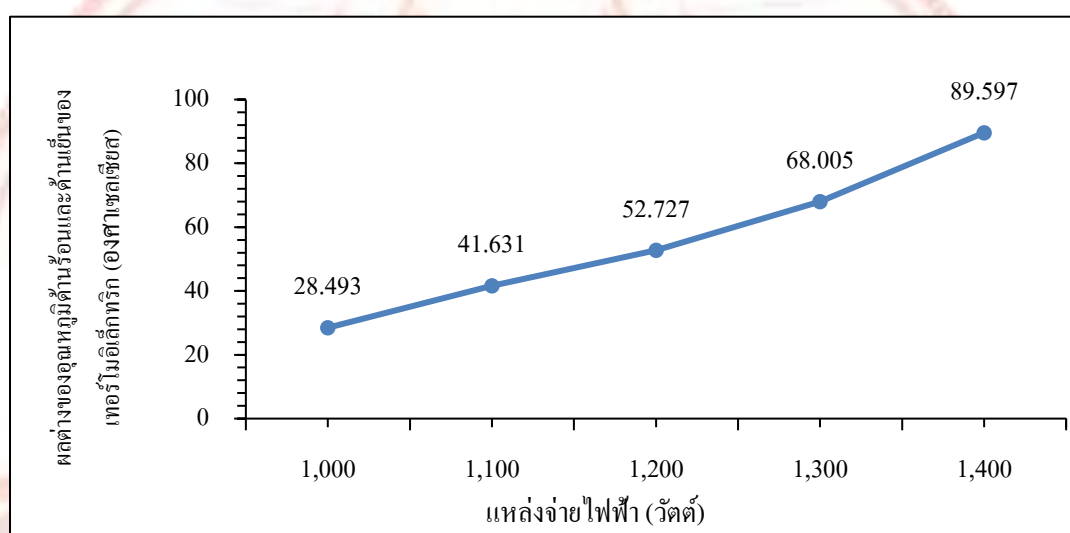
จากในตารางที่ ข-7 แสดงค่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำไปเขียนกราฟจากภาพที่ 4-9 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้แผ่นทำความร้อน ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น และใช้เวลาน้อยลง โดยที่ระดับ 1,400 W เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 0.7% และพบว่าประสิทธิภาพของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกในการทดลองนี้ยังค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงแผ่นดูดซับความร้อนหรือปรับขนาดช่องว่างอากาศเพื่อรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกที่เลือกใช้



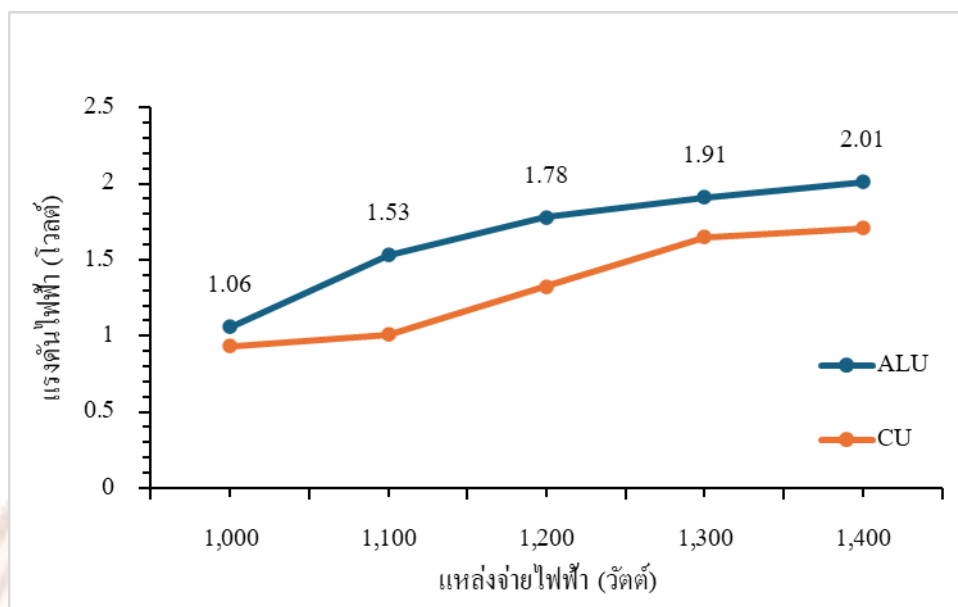
ภาพที่ 4-9 สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับเวลา

4.2.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระดับต่าง ๆ

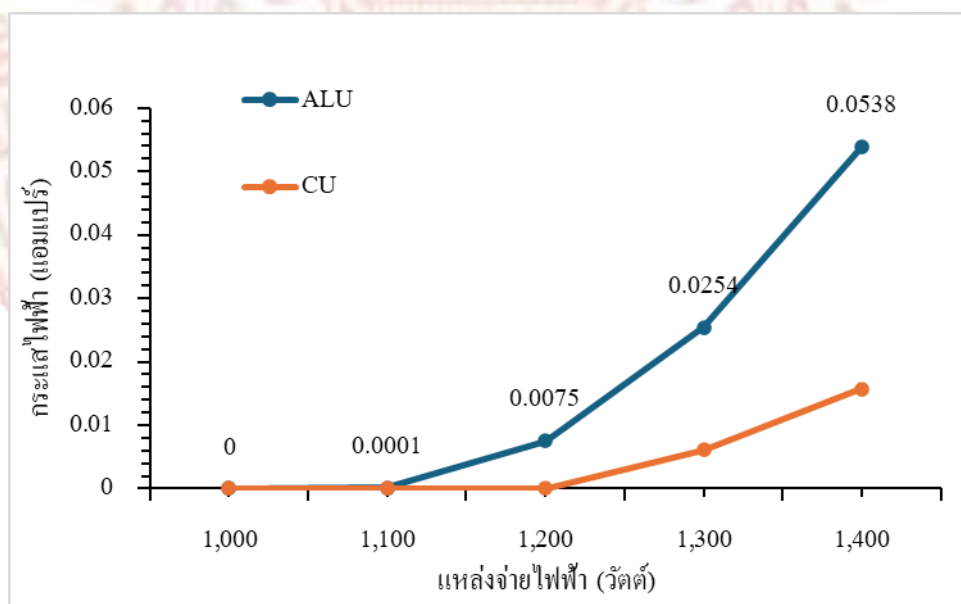
จากภาพที่ 4-10 ถึง 4-14 แสดงการเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก จะเห็นได้ เมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายให้แผ่นทำความร้อนมากขึ้น มีผลทำให้ผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสูงขึ้นตาม



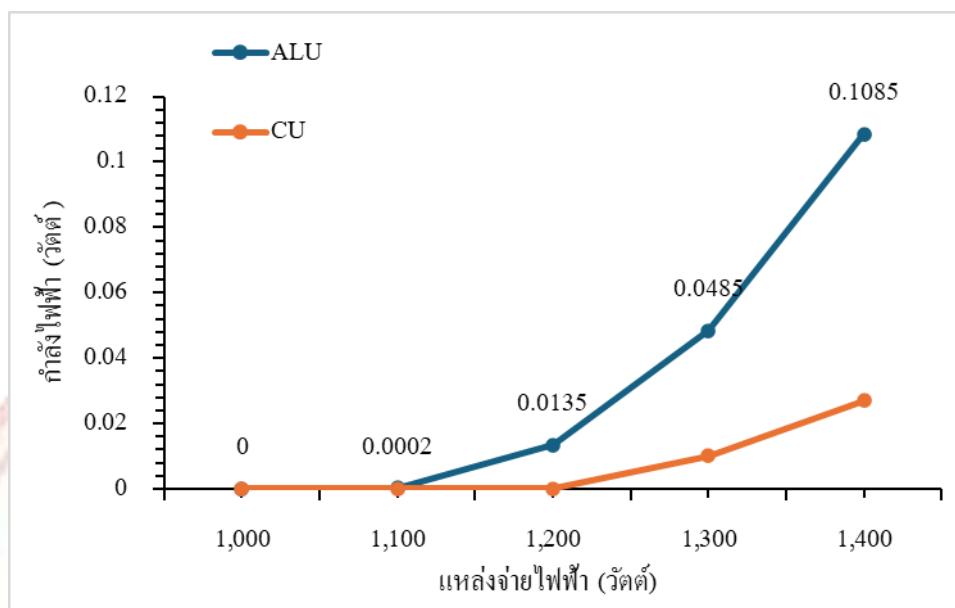
ภาพที่ 4-10 กราฟเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก



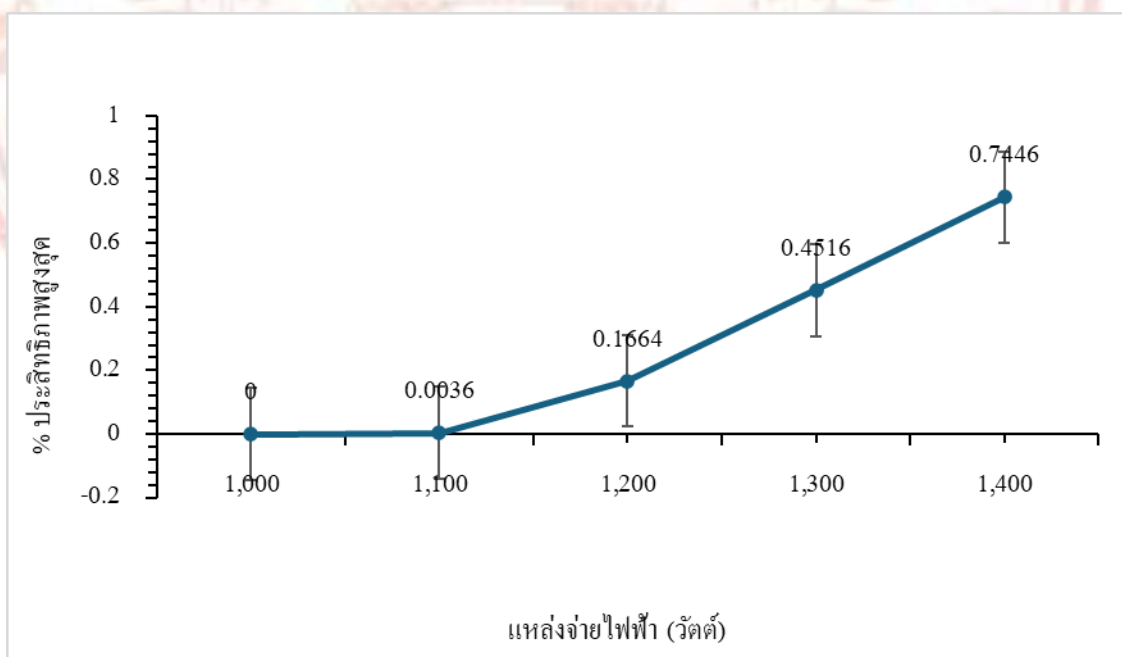
ภาพที่ 4-11 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่ของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพที่ 4-12 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่ของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพที่ 4-13 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่ของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก



ภาพที่ 4-14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่ของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

4.2.6 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยมีปัจจัยการจ่ายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 5 ระดับ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 วัตต์ โดยการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้า (Power) ที่ผลิตได้จากค่าการทดลอง โดยใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA) อิทธิพลตัวแปรความหนาแน่นมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4-1 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temp	4	0.019976	0.004994	145.77	0.000
Time	2	0.000278	0.000139	4.06	0.061
Error	8	0.000274	0.000034		
Total	14	0.020528			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ตัวแปรอุณหภูมิให้ค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ที่ 0.05 จึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ (H_0) และยอมรับสมมติฐานทางเลือก (H_1) ได้ กล่าวคือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อนมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางกลับกัน ตัวแปรเวลาให้ค่า P-value เท่ากับ 0.061 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ (H_0) ได้ กล่าวคือ ระดับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อนไม่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในเชิงสถิติ

ตารางที่ 4-2 สรุปผลการวิเคราะห์โมเดล

Model Summary

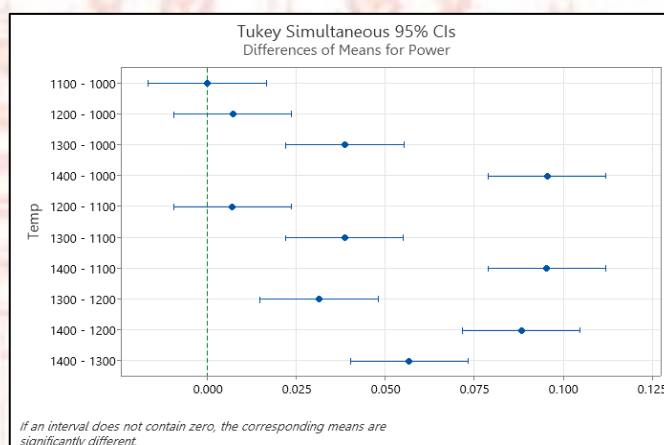
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0058531	98.66%	97.66%	95.31%

จากตารางที่ 4-22 (Model Summary) พบว่าโมเดลมีค่า R-squared เท่ากับ 98.66% แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดีมาก โดยมีค่า Adjusted R-squared เท่ากับ 97.66% ซึ่งยังอยู่ในระดับสูง แม้คำนึงถึงจำนวนตัวแปรในโมเดลแล้วก็ตาม นอกจากนี้ค่า Predicted R-squared เท่ากับ 95.31% สะท้อนว่าโมเดลมีความสามารถในการทำนายข้อมูลใหม่ได้อย่างแม่นยำ และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (S) อยู่ที่ 0.0058531 ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ แสดงถึงความเหมาะสมของโมเดลโดยรวม

ตารางที่ 4-3 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่าง โดยใช้วิธีของ Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

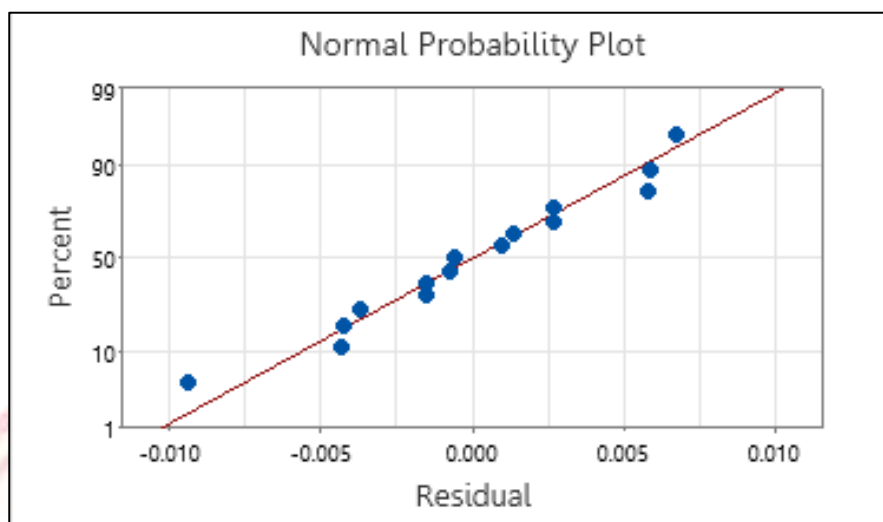
Temp	N	Mean	Grouping
1400	3	0.0954	A
1300	3	0.0386	B
1200	3	0.0072	C
1100	3	0	C
1000	3	0	C

Means that do not share a letter are significantly different



ภาพที่ 4-15 กราฟช่วงความเชื่อมั่น 95% ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

ในการทดลองนี้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแผ่นทำความร้อนในระดับ 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W โดยค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกคือ 0, 0, 0.0072, 0.0386 และ 0.0954 W ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรมทางสถิติ พบว่าระดับ 1,000, 1,100 และ 1,200 W ได้รับตัวอักษร C เหมือนกัน ซึ่งหมายความว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ระดับ 1,300 และ 1,400 W ให้ค่าที่สูงขึ้นและอยู่คนละกลุ่มกับกลุ่มก่อนหน้า ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณากราฟแสดงช่วงความเชื่อมั่นแบบ Tukey Simultaneous 95% Confidence Intervals (CIs) จะเห็นได้ว่าค่าช่วงความเชื่อมั่นของระดับ 1,300 และ 1,400 W ไม่ทับกับเส้นค่า 0 จึงยืนยันได้ว่าทั้งสองระดับนี้แตกต่างจากกลุ่มที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4-16 กราฟความน่าจะเป็นปกติจากข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

จากกราฟในภาพที่ 4-16 จุดข้อมูลเรียงตัวใกล้เคียงเส้นทแยงมุมอย่างเหมาะสม บ่งชี้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงใกล้เคียงปกติ สามารถใช้ ANOVA ใช้ได้อย่างถูกต้อง

โดยสรุปได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระดับที่สูงขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีและใช้แผ่นอะลูมิเนียมและทองแดงเป็นตัวดูดซับความร้อน ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างชุดทดลองขนาดเล็กสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วยแผ่นทำความร้อน แผ่นดูดซับความร้อน โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก และแผงระบาย ความร้อนด้วยอากาศพร้อมพัดลม DC สองตัว ได้ทำการทดลองโดยใช้ช่องอากาศ 1 cm และพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 5 ระดับ (1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W) ที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อน ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 5.1 สรุปผลการทดลอง
- 5.2 อภิปรายผลการทดลอง
- 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำงานในระดับห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกแบบอาศัยการแผ่รังสี (radiative-based thermoelectric power generator) ซึ่งใช้แผ่นดูดซับความร้อนทำจากอะลูมิเนียมและทองแดง การทดลองดำเนินการที่ช่องอากาศคงที่ขนาด 1 cm โดยใช้กำลังความร้อนระหว่าง 1000–1400 W ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิผิวอยู่ในช่วง 320–550 °C

ผลการทดลองพบว่า แผ่นดูดซับความร้อนอะลูมิเนียมให้ประสิทธิภาพสูงกว่า โดยสามารถเริ่มต้นการผลิตไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 436 °C และให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด 0.74% เมื่อเทียบกับทองแดง 0.43% ที่กำลัง 1400 W ระบบที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุด 89.59 °C ระหว่างด้านร้อนและเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 0.108 W ในขณะที่ทองแดงไม่สามารถให้แรงดันไฟฟ้าถึงระดับที่เพียงพอสำหรับจ่ายให้ LED (1.7 V) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของอะลูมิเนียมเกิดจากความจุความร้อนจำเพาะที่สูงกว่าและความสามารถในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดมากกว่าทองแดง แม้ว่าความนำความร้อนจะต่ำกว่า นอกจากนี้ ความขรุขระของผิวและสีของอะลูมิเนียมยังช่วยเพิ่มการดูดกลืนรังสีอีกด้วย โดยอะลูมิเนียมสะท้อนรังสีอินฟราเรดเพียง 88% ในขณะที่ทองแดงสะท้อนถึง 98% ผลลัพธ์เหล่านี้

ชี้ให้เห็นว่า แผ่นอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพดีกว่าสำหรับการดูดซับและถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีไปยังโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้ในระบบแปลงพลังงานความร้อนเหลือทิ้งให้เป็นพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ



5.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มระดับของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นทำความร้อน ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของ Seebeck Effect ที่ระบุว่า แรงดันไฟฟ้าจะเกิดขึ้น เมื่อมีความต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อให้เห็นภาพรวมของผลการทดลอง อย่างชัดเจน จึงได้จัดทำตารางผลการทดลองค่าต่าง ๆ ในสภาวะคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของด้านร้อนและด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพของระบบของ อลูมิเนียม โดยรายละเอียดดังตารางที่ 5-1 และ 5-2 ที่เป็นของทองแดง

ตารางที่ 5-1 ผลการทดลองภายใต้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของอลูมิเนียม

แหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้า(W)	V_{DC} (V)	I (A)	P (W)	T_h (°C)	T_c (°C)	D_T (°C)	Efficiency (%)
1,000	1.06	0.000	0.000	76.225	47.731	28.493	0
1,100	1.53	0.0001	0.0002	95.150	53.518	41.631	0.0036
1,200	1.78	0.0075	0.0135	112.266	59.539	52.727	0.1664
1,300	1.91	0.0254	0.0485	134.284	66.279	68.005	0.4516
1,400	2.01	0.0538	0.1085	167.379	77.782	89.597	0.7446

ตารางที่ 5-2 ผลการทดลองภายใต้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของทองแดง

แหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้า(W)	V_{DC} (V)	I (A)	P (W)	T_h (°C)	T_c (°C)	D_T (°C)	Efficiency (%)
1,000	0.45	0.000	0.0000	53.816	47.731	28.493	0
1,100	0.52	0.000	0.0000	60.670	53.518	41.631	0
1,200	0.73	0.000	0.0000	72.266	43.589	28.727	0
1,300	0.93	0.000	0.0000	82.846	47.669	35.065	0
1,400	1.09	0.002	0.0001	89.780	50.782	39.597	0

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way Anova) เพื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ภายใต้ระดับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000, 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 W พบว่า ระดับกำลังไฟฟ้าในช่วง 1,000 ถึง 1,200 W ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม C มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลลัพธ์ของแต่ละระดับอยู่

ในช่วงค่าต่ำและมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในช่วง 1,000 และ 1,200 W ยังไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างชัดเจน ในขณะที่ระดับแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้าที่ 1,300 W (กลุ่ม B) และ 1,400 W (กลุ่ม A) พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม C ($p < 0.05$) โดยเฉพาะที่ระดับ 1,400 W ให้ ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด แสดงถึงความสามารถในการแปลงพลังงานความร้อนเหลือทิ้งได้อย่างมี ประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากกว่า 1,300 W ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ระดับต่ำกว่านั้น ยังไม่เพียงพอในการผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นผลการทดลองในหัวข้อนี้เราสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ท่อไอเสียกังหันก๊าซ เตาอบ และท่อไอเสียเครื่องยนต์ เป็นต้น นำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการศึกษาครั้งถัดไป ควรมีการปรับเปลี่ยนระบายความร้อนของแผ่นให้ความร้อนกับวัสดุ ดูดซับความร้อนให้มีหลากหลายรูปแบบเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความ ร้อนไปยังวัสดุดูดซับ และต่อเนื่องไปยังแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณา ประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติในการปรับค่าระยะห่างแบบต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ ซึ่งจะช่วยให้ สามารถเก็บข้อมูลได้แม่นยำยิ่งขึ้น และนำไปสู่การค้นหาค่าระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการ ถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพและการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เสถียรและตรงตามความต้องการใน แต่ละสถานการณ์การใช้งาน

5.3.2 อีกหนึ่งแนวทางที่น่าสนใจในการศึกษาเพิ่มเติม คือการทดลองใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน วัสดุเหล่านี้สามารถนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิต ไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน การศึกษานี้จะช่วยเสริมสร้างความเข้าใจถึงผลกระทบของคุณสมบัติวัสดุต่อ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า และช่วยในการคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุดทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความ คุ่มค่า และความสามารถในการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บรรณานุกรม

- [1] P. Yodovard, J. Khedari, J. Hirunlabh. The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants. Energy Sources. Vol.23. 213-224. 2001.
- [2] iEnergyGuru. (2015). Heat Losses in Steam Generation System. Available: <https://ienergyguru.com/2016/01/heat-losses-in-steam-system/>
- [3] Seebeck effect. (2012). Thomas Johann Seebeck. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Johann_Seebeck.
- [4] สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ปละคณะ. (2006) รายงานฉบับสมบูรณ์ งานศึกษาวิเคราะห์ศักยภาพทางเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนเหลือทิ้งขนาด 100 วัตต์. ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] Rowe, D.M. (1995). CRC Handbook of Thermo electrics. CRC press LLC, pp. 595-683.
- [6] See Ioffe, A.F. (1957). Semiconductor Thermo elements and Thermoelectric Cooling, Infosearch Limited, London.
- [7] Yodovard, P. (2000). Thermoelectric power generation. Doctor of engineering thesis, Energy technology program, King Mongkut University of Thonburi, 133p.
- [8] FerroTec. (2004). Thermoelectric Technical Reference. Available: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref02>.
- [9] The Research Institute for Ubiquitous Energy Devices. (2005). Electric Power Generated from Waste Heat. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan.
- [10] กษิติส ห้าวหาญ, นราเทพ นามอรรณ. (2006). “การศึกษาและพัฒนาการถ่ายเทความร้อนจากซีพียู โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก”. ปรินูญานิพนธ์ปรินูญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

- [11] N. Watcharodom, W. Puangsombut, J. Khedari, N. Vatcharasathien, J. Hirunlabh. (2014). “Experimental investigation of thermoelectric power generation using radiative heat exchange”, *Adv. Materials Research*, Vol. 1025-1026, pp. 1125-1133.
- [12] Martinez, I. “Radiative View Factors”. 1995. Available online <http://imartinez.etsiae.upm.es/isidoro/tc3/Radiation%20View%20factors.pdf> (accessed on 25 April 2022).
- [12] Eric A. Silk. (2020). “Common View Factor Tables.” *Introduction to Spacecraft Thermal Design*, pp. 341. Cambridge University Press.
- [13] กฎของโอห์ม. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/กฎของโอห์ม>.
- [14] กำลังไฟฟ้า. Available: https://www.unitis.co.th/?page=event_list&list=Fk8vQT9A6xY.
- [15] จักรพงษ์ แผ่นทอง. (2020). “One Way ANOVA”. KruJakkrapong 's Blog.
- [16] D.M. Rowe. (1999). “Thermoelectric: an environmentally friendly source of electrical power”. *Renewable Energy*, Vol. 16, pp. 1251–1256.
- [17] Y. Hsiao, W.C. Chang, S.L. Chen. (2019). “A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine”, *Energy*, Vol. 35, pp. 1447–1454.
- [18] D. Champier, J. P. Bedecarrats, M. Rivaletto, F. Strub. (2010). “Thermoelectric power generation from biomass cook stoves”, *Energy*, Vol. 35, pp. 935–942.
- [19] Maneewan S., Khedari J., Zeghamati B., Hirunlabh J. and Eakburanawat J. (2004). “Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector”, *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 743–752.
- [20] Labaiyusoh S., Visitsak S., Khedari J., Vatcharasathien N. (2013). “Generatiing Power on Metallic Roof by Thermoelectric”, *Journal of the Faculty of Architecture King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*, Vol.16, pp. 43-54.
- [21] Pisut Thanthong, Preeda Chantawong, Joseph Khedari. (2022). “Radiation-Based Thermoelectric Power Generation with Finned Heat Absorber.”, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.12, pp. 231-238.
- [22] ไพบุลย์ โกวิทเจริญกุล. (2014). การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [23] International Renewable Energy Agency (IRENA). *The Energy Technology Systems Analysis Programmes(ETSAP): Technology Brief E17*; International Energy Agency: Paris, France, 2013. Available online:<http://www.irena.org/Publications> (accessed on 8 July 2015).
- [24] Joseph, A.; Kabbara, M.; Groulx, D.; Allred, P.; White, M.A. Characterization and real-time testing of phase-change materials for solar thermal energy storage. *Int. J. Energy Res.* **2016**, *40*, 61–70.
- [25] Al-Abidi, A.A.; Bin Mat, S.; Sopian, K.; Sulaiman, M.Y.; Mohammed, A.T. CFD applications for latent heat thermal energy storage: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, *20*, 353–363.
- [26] Hauer, A. Storage Technology Issues and Opportunities, International Low-Carbon Energy Technology Platform. In Proceedings of the Strategic and Cross-Cutting Workshop “Energy Storage Issues and Opportunities”, Paris, France, 15 February 2011.



ภาคผนวก

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง



**แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของแหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้า**

ตารางที่ ก-1 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของแหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้า 1,000 W

ลำดับ	เวลา (min)	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 1,000 W						
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
1	0	29.6778	29.7495	29.7136	29.7136	29.7770	29.8727	29.9458
2	5	91.2331	33.0989	31.8534	31.8534	30.8493	30.3018	30.9062
3	10	169.9024	42.8017	38.4769	38.4769	33.6303	31.2509	33.5076
4	15	222.2774	55.3921	46.9223	46.9223	36.5035	32.0760	34.4323
5	20	256.0915	66.7010	54.8462	54.8462	39.2779	33.0016	34.9232
6	25	279.8986	75.4026	61.0675	61.0675	41.4014	33.7424	35.6058
7	30	297.9445	82.1619	65.9180	65.9180	43.3207	34.5543	37.5496
8	35	306.7446	87.0564	69.4992	69.4992	44.6970	35.2770	37.1226
9	40	312.6300	90.1797	71.6823	71.6823	45.2766	35.4219	37.2987
10	45	318.1015	92.3352	73.4352	73.4352	46.1401	36.1934	38.5458
11	50	321.7249	93.9606	74.8334	74.8334	46.9356	36.6919	39.6156
12	55	321.2638	95.2358	75.7225	75.7225	47.4928	36.9702	39.3062
13	60	320.5614	95.7356	76.2253	76.2253	47.7318	37.1126	39.0638

ตารางที่ ก-2 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของแหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้า 1,100 W

ลำดับ	เวลา (min)	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 1,100 W						
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
1	0	32.0946	31.9231	31.7278	31.7278	31.9579	31.7223	31.9419
2	5	107.4459	36.0748	34.3528	34.3528	32.7683	31.9608	32.5237
3	10	207.2671	49.1616	43.4416	43.4416	36.0447	33.0527	34.6720
4	15	270.2989	66.9295	55.4855	55.4855	39.8990	34.0400	36.2750
5	20	311.8795	83.4335	66.7984	66.7984	43.4916	35.0828	37.2769
6	25	338.4942	95.6074	75.6200	75.6200	46.6991	36.4854	38.8430
7	30	358.2985	104.4934	82.2494	82.2494	49.3512	37.9945	41.6024
8	35	367.5799	110.4566	86.7196	86.7196	50.7432	38.4512	41.7374
9	40	373.2534	114.8431	89.9139	89.9139	51.8218	38.9185	41.4965
10	45	378.0035	117.9090	92.1666	92.1666	52.3816	39.0153	41.2387
11	50	380.3943	120.2798	93.9295	93.9295	53.2880	39.4139	41.4784
12	55	382.2598	121.0660	94.6091	94.6091	53.3350	39.4277	42.0854
13	60	384.8461	121.8724	95.1503	95.1503	53.5188	39.3103	41.5819

ตารางที่ ก-3 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของแหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้า 1,200 W

ลำดับ	เวลา (min)	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 1,200 W						
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
1	0	33.2070	32.4885	32.2371	32.2371	32.3577	32.1303	32.3132
2	5	121.8138	37.3006	35.3802	35.3802	33.4274	32.5456	33.2913
3	10	234.8819	53.7751	46.5908	46.5908	37.1260	33.7712	35.8833
4	15	307.2265	76.5994	62.6634	62.6634	42.3309	35.3377	37.9888
5	20	352.9933	96.8746	77.4442	77.4442	47.2326	37.0314	40.1265
6	25	379.7369	112.5036	88.6182	88.6182	51.0181	38.3156	41.1591
7	30	394.6495	123.4534	96.5158	96.5158	53.4935	38.6115	42.1368
8	35	409.8788	131.7021	102.3948	102.3948	55.3354	39.5777	41.7896
9	40	412.5513	135.5430	106.0586	106.0586	57.2738	39.9470	43.3942
10	45	421.2247	139.6246	108.3820	108.3820	57.6677	40.1683	43.4781
11	50	428.3176	141.3614	109.9734	109.9734	58.6887	41.2286	44.6473
12	55	429.2322	142.9521	111.2480	111.2480	59.3656	41.8810	44.3546
13	60	436.8214	144.0916	112.2664	112.2664	59.5392	42.5066	46.0531

ตารางที่ ก-4 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,300 W

ลำดับ	เวลา (min)	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 1,300 W						
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
1	0	31.4897	31.6812	31.5957	31.5957	31.7333	31.6567	31.7411
2	5	112.4102	38.0330	35.7042	35.7042	33.1986	32.1130	32.9258
3	10	247.6117	60.4519	51.0394	51.0394	37.9691	33.4805	33.4805
4	15	347.1425	90.4240	72.0167	72.0167	44.2540	35.1787	37.2159
5	20	400.4058	116.7352	91.0517	91.0517	50.5522	37.1120	40.0433
6	25	434.9217	135.9769	105.5868	105.5868	55.5657	38.8290	42.1361
7	30	454.4592	149.5885	116.0217	116.0217	59.7675	40.0438	43.9159
8	35	468.6751	158.6202	122.4589	122.4589	61.4943	41.3254	44.2112
9	40	477.2197	164.3637	126.5558	126.5558	62.9722	42.2074	45.7205
10	45	481.0126	168.5009	129.6484	129.6484	64.2161	41.9150	44.7525
11	50	484.9168	170.8305	131.9539	131.9539	65.4731	43.8072	46.9353
12	55	485.2259	172.6815	133.4700	133.4700	66.2001	43.3379	46.2094
13	60	488.1192	173.9154	134.2844	134.2844	66.2790	44.0371	47.2011

ตารางที่ ก-5 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,400 W

ลำดับ	เวลา (min)	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 1,400 W						
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
1	0	32.5368	32.5293	32.3406	32.3406	32.5659	32.3900	32.5983
2	5	129.6269	39.0521	36.5580	36.5580	33.7796	32.7506	33.6775
3	10	292.3806	66.4072	55.4756	55.4756	39.3506	34.1855	36.7222
4	15	397.5869	106.9072	83.9929	83.9929	48.1561	36.8429	39.2851
5	20	457.8071	142.5609	109.7533	109.7533	56.5880	39.0182	42.1801
6	25	494.6473	167.5408	128.6619	128.6619	63.3040	41.0524	45.8395
7	30	518.3098	186.0123	142.2407	142.2407	67.9472	43.1777	47.6402
8	35	532.4458	199.0116	151.9657	151.9657	71.9141	45.6329	50.0405
9	40	540.5062	206.6247	157.8359	157.8359	73.9111	45.5608	51.3405
10	45	546.1289	212.5393	162.2086	162.2086	75.5779	47.1029	50.2702
11	50	549.7376	215.2711	164.2960	164.2960	76.6216	47.4405	50.7747
12	55	548.6888	217.2760	165.9833	165.9833	77.1895	47.2943	50.7283
13	60	550.3044	219.0034	167.3794	167.3794	77.7824	49.2071	51.5900

แสดงผลแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ก-6 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ลำดับ	เวลา (min)	แรงดันไฟฟ้า (V)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	-0.0054956	0.0019135	0.0041243	-0.0008288	-0.0000487
2	5	0.0295935	0.0530900	0.0607675	0.0699718	0.0780940
3	10	0.1675760	0.2524226	0.3071778	0.4229512	0.5159251
4	15	0.3725096	0.5562081	0.7011571	0.9418781	1.2252209
5	20	0.5659850	0.8467182	1.0698097	1.4265188	1.7613295
6	25	0.7194251	1.0580321	1.3561885	1.7239385	1.8866963
7	30	0.8280032	1.2094093	1.5548187	1.8116192	1.9453992
8	35	0.9224570	1.3273388	1.6876964	1.8582556	1.9762239
9	40	0.9795845	1.4054458	1.7193294	1.8793350	1.9920510
10	45	1.0133350	1.4745892	1.7533016	1.8944309	2.0052670
11	50	1.0477237	1.5039968	1.7653295	1.8980498	2.0111219
12	55	1.0533768	1.5239203	1.7727805	1.9047382	2.0133400
13	60	1.0630184	1.5395411	1.7898617	1.9119360	2.0176181



ภาคผนวก ข.

แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ

ผลต่างของอุณหภูมิบนเครื่องผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้าแผ่นดูดซับ ความร้อนที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ลำดับ	เวลา (min)	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้าแผ่นทำความร้อนกับด้านหน้าแผ่นดูดซับความร้อน (°C)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	-0.0716	0.1714	0.7184	-0.1915	0.0074
2	5	58.1342	71.3710	84.5131	74.3772	90.5748
3	10	127.1008	158.1055	181.1068	187.1599	225.9733
4	15	166.8853	203.3694	230.6271	256.7185	290.6796
5	20	189.3904	228.4459	256.1187	283.6706	315.2463
6	25	204.4960	242.8868	267.2333	298.9448	327.1065
7	30	215.7826	253.8050	271.1962	304.8707	332.2975
8	35	219.6882	257.1233	278.1767	310.0549	333.4342
9	40	222.4503	258.4103	277.0083	312.8560	333.8815
10	45	225.7663	260.0944	281.6002	312.5117	333.5897
11	50	227.7644	260.1145	286.9562	314.0863	334.4665
12	55	226.0280	261.1938	286.2801	312.5443	331.4129
13	60	224.8259	262.9737	292.7298	314.2039	331.3009

ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังแผ่นดูดซับความร้อน

ตารางที่ ข-2 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังแผ่นดูดซับความร้อนที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ลำดับ	เวลา (min)	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังแผ่นดูดซับความร้อน (°C)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	0.0358	0.1954	0.2514	0.0855	0.1887
2	5	1.2455	1.7220	1.9205	2.3288	2.4941
3	10	4.3248	5.7200	7.1844	9.4124	10.9316
4	15	8.4698	11.4440	13.9360	18.4073	22.9144
5	20	11.8549	16.6351	19.4304	25.6834	32.8075
6	25	14.3351	19.9873	23.8854	30.3900	38.8790
7	30	16.2439	22.2440	26.9376	33.5669	43.7716
8	35	17.5573	23.7370	29.3073	36.1612	47.0459
9	40	18.4974	24.9292	29.4844	37.8079	48.7888
10	45	18.9000	25.7425	31.2426	38.8525	50.3307
11	50	19.1272	26.3504	31.3880	38.8766	50.9751
12	55	19.5133	26.4569	31.7042	39.2115	51.2927
13	60	19.5103	26.7221	31.8252	39.6309	51.6240

ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ ข-3 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ลำดับ	เวลา (min)	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (°C)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	-0.0634	-0.2301	-0.1206	-0.1375	-0.2253
2	5	1.0041	1.5845	1.9527	2.5056	2.7784
3	10	4.8466	7.3969	9.4648	13.0703	16.1250
4	15	10.4187	15.5865	20.3325	27.7627	35.8368
5	20	15.5683	23.3069	30.2116	40.4995	53.1653
6	25	19.6661	28.9209	37.6000	50.0211	65.3579
7	30	22.5973	32.8982	43.0223	56.2542	74.2935
8	35	24.8022	35.9764	47.0595	60.9646	80.0517
9	40	26.4058	38.0921	48.7848	63.5836	83.9248
10	45	27.2950	39.7850	50.7142	65.4323	86.6307
11	50	27.8978	40.6414	51.2847	66.4808	87.6744
12	55	28.2297	41.2741	51.8823	67.2699	88.7938
13	60	28.4935	41.6315	52.7272	68.0054	89.5971

แสดงผลกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ข-4 กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ลำดับ	เวลา (min)	กระแสไฟฟ้า (A)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	0.000000256	0.000000882	0.000001090	0.000003220	0.000000332
2	5	0.000000441	0.000000255	0.000000410	0.000001190	0.000000167
3	10	-0.000000792	-0.000000287	-0.000000190	-0.000000080	-0.000000469
4	15	-0.000000277	-0.000000461	-0.000000430	-0.000000470	0.000000293
5	20	-0.000000268	-0.000000381	-0.000000220	0.000014550	0.005142021
6	25	0.000000140	0.000000026	0.000003620	0.002938490	0.020361771
7	30	-0.000001428	-0.000000186	0.000181260	0.009616240	0.032444626
8	35	-0.000000358	0.000001401	0.001623210	0.015692840	0.040586054
9	40	-0.000000216	0.000010002	0.002777400	0.019107150	0.045891243
10	45	-0.000000589	0.000039024	0.004640340	0.021764780	0.049689228
11	50	-0.000001198	0.000072993	0.005479650	0.023044480	0.051822740
12	55	-0.000000665	0.000105388	0.006103840	0.023995470	0.052895743
13	60	-0.000000311	0.000140222	0.007560430	0.025411340	0.053817756

แสดงผลกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ข-5 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ลำดับ	เวลา (min)	กำลังไฟฟ้า (W)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	0.000000001	0.000000002	0.000000004	0.000000003	0.000000000
2	5	0.000000013	0.000000014	0.000000025	0.000000084	0.000000013
3	10	0.000000133	0.000000073	0.000000059	0.000000033	0.000000242
4	15	-0.000000103	-0.000000256	-0.000000300	-0.000000444	0.000000359
5	20	-0.000000152	-0.000000323	-0.000000241	0.000020754	0.009056794
6	25	0.000000101	0.000000028	0.000004905	0.005065783	0.038416478
7	30	-0.000001183	-0.000000224	0.000281829	0.017420970	0.063117751
8	35	-0.000000330	0.000001859	0.002739484	0.029161306	0.080207130
9	40	-0.000000211	0.000014057	0.004775265	0.035908729	0.091417698
10	45	-0.000000597	0.000057544	0.008135924	0.041231876	0.099640169
11	50	-0.000001255	0.000109781	0.009673383	0.043739576	0.104221848
12	55	-0.000000701	0.000160603	0.010820766	0.045705093	0.106497116
13	60	-0.000000331	0.000215878	0.013532122	0.048584853	0.108583677

แสดงค่าความร้อนการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นทำความร้อนถึงแผ่นดูดซับความร้อน

ตารางที่ ข-6 ค่าความร้อนการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นทำความร้อนถึงแผ่นดูดซับความร้อนที่
กำลังไฟฟ้า 5 ระดับ

ลำดับ	เวลา (min)	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	-0.00029	0.00071	0.00299	-0.00079	0.00003
2	5	0.32109	0.43038	0.54694	0.46246	0.61136
3	10	1.03845	1.54410	2.00626	2.22326	3.23507
4	15	1.76646	2.68448	3.58047	4.74639	6.59908
5	20	2.36700	3.67056	4.90603	6.64200	9.29179
6	25	2.86422	4.41548	5.80092	8.11910	11.26200
7	30	3.28745	5.03993	6.33008	9.02768	12.64809
8	35	3.49876	5.33947	6.93528	9.74513	13.50387
9	40	3.64670	5.52274	7.02224	10.19259	14.00651
10	45	3.79370	5.68501	7.39551	10.37627	14.35475
11	50	3.89199	5.76072	7.72825	10.59226	14.59933
12	55	3.86867	5.82978	7.75768	10.58815	14.48034
13	60	3.84361	5.92908	8.13431	10.75674	14.58133

แสดงค่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ ข-7 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่กำลงไฟฟ้า 5 ระดับ

ลำดับ	เวลา (min)	ประสิทธิภาพ (%)				
		1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
1	0	0.000485	-0.000238	-0.000150	-0.000338	0.000052
2	5	0.000004	-0.000003	-0.000005	-0.000018	-0.000002
3	10	0.000013	-0.000005	-0.000003	-0.000002	-0.000008
4	15	0.000006	-0.000010	-0.000008	-0.000009	0.000005
5	20	0.000006	-0.000009	-0.000005	0.000313	0.097471
6	25	0.000004	0.000001	0.000085	0.062393	0.341116
7	30	-0.000036	-0.000005	0.004452	0.192973	0.499030
8	35	-0.000009	0.000035	0.039501	0.299240	0.593957
9	40	-0.000006	0.000255	0.068002	0.352303	0.652680
10	45	-0.000016	0.001012	0.110012	0.397367	0.694127
11	50	-0.000032	0.001906	0.125169	0.412939	0.713881
12	55	-0.000018	0.002755	0.139485	0.431663	0.735460
13	60	0.000009	0.003641	0.166359	0.451669	0.744676

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณค่าปัจจัยมุมมอง (View Factor) ระหว่างแผ่นทำความร้อนและตัวดูดซับที่มีการคำนวณค่าปัจจัยมุมมองทำโดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าปัจจัยมุมมองที่คำนวณได้ระหว่างแผ่นทำความร้อนไปยังส่วนบน $(F_{12})_a$ และแผ่นทำความร้อนไปยังฐานของแผ่น $(F_{12})_{a+b}$

$$\bar{X} = X / L \text{ and } \bar{Y} = Y / L$$

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$$

Example:

1. คำนวณค่าปัจจัยมุมมอง (View Factor) จากแผ่นทำความร้อนไปยังแผ่นดูดซับความร้อน $L = 10$ mm)

$$X = 110 \text{ mm}, Y = 82 \text{ mm}, L = 10 \text{ mm}, \bar{X} = X / L = 11, \bar{Y} = Y / L = 8.2$$

$$\frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} = 0.007055$$

$$\ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} = 1.94526$$

$$\bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} = 84.20489$$

$$\tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} = 57.8406$$

$$\bar{X} \tan^{-1} \bar{X} = 16.2815$$

$$\bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} = 11.88544$$

$$(F_{12})_a = 0.007055 (1.94526 + 84.20489 + 57.8406 - 16.2815 - 11.88544)$$

$$(F_{12})_a = 0.91714$$

2. คำนวณค่าปัจจัยมุมมอง (View Factor) จากแผ่นทำความร้อนไปยังแผ่นดูดซับความร้อน(
L=30+16=36)

X=110 mm , Y= 82 mm, L = 30 mm , $\bar{X} = X/L = 3.660769$, $\bar{Y} = Y/L = 2.733846$

$$\frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} = 0.037692$$

$$\ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} = 1.403637$$

$$\bar{X} (1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} + \bar{Y} (1 + \bar{X}^2)^{1/2} = 12.6976$$

$$\tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} = 8.60511$$

$$\bar{X} \tan^{-1} \bar{X} = 5.663699$$

$$\bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} = 3.985675$$

$$(F_{12})_{a+b} = 0.047692 (1.403637 + 12.6976 + 8.60511 - 5.663699 - 3.985675)$$

$$(F_{12})_{a+b} = 0.622713$$

$$(F_{12})_{ave} = \frac{(F_{12})_a + (F_{12})_{a+b}}{2}$$

$$(F_{12})_{ave} = \frac{0.81714 + 0.622713}{2}$$

$$(F_{12})_{ave} = 0.539927$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

พันจ่าอากาศเอก ฐิติวัฒน์ กล้าหาญ

ชื่อวิทยานิพนธ์

23 กันยายน 2533

สาขาวิชา

กทม

ประวัติ

2011-2014 รัฐศาสตรบัณฑิต (ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ),
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
2018-2022 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ),
มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ประวัติการทำงาน:

2012 - ปัจจุบัน

รับราชการกองทัพอากาศ

