

การพัฒนาถึงเก็บความเย็นผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก
Development of electricity generation from cold storage tanks using thermoelectric
technology.

พงศ์ธาริน แทนโนนจิว ภัทรธิดา พรหมสาร
ชนันท์พรพรช โคตรวงศ์¹

¹ที่อยู่: โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย เลข, ตำบลธาตุ, อำเภอเชียงคาน, จังหวัดเลย 42110, ประเทศไทย

*อีเมลล์: phongtharin05623@pcshsloei.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาถึงเก็บความเย็นที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกถึงเก็บความเย็นกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยสร้างต้นแบบจากถังโม่และติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จำนวน 4 แผ่นต่อแบบอนุกรมพร้อมเชื่อมต่อกับโมดูลแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อกักเก็บพลังงานในแบตเตอรี่ จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกถึง รวมถึงความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิภายในถึงลดลงจาก 26.1 เหลือ 1.1 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิภายนอกอยู่ในช่วง 31.4–31.8 องศาเซลเซียส ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5.3 เป็น 30.7 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.16 เป็น 1.71 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จาก 17 เป็น 94 มิลลิแอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 2.72 เป็น 160.74 มิลลิวัตต์ แสดงให้เห็นว่า ความต่างของอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพ การผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเทอร์โมอิเล็กทริก และต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพ ในการประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กและเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งในอนาคต

คำสำคัญ : Thermoelectric, Seebeck Effect, Thermoelectric Module, ความต่างของอุณหภูมิ, พลังงานทางเลือก

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการขยายตัวของเทคโนโลยีและการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในชีวิตประจำวัน อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ห่างไกล หรือสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น ภัยพิบัติทางธรรมชาติ การเข้าถึงแหล่งพลังงานไฟฟ้ายังคงเป็นข้อจำกัดสำคัญ ทำให้การพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สามารถผลิตพลังงานได้ด้วยตนเองและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจมากขึ้น เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)

เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงผ่านหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ซึ่งอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของวัสดุ ในการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแนวคิดดังกล่าว ผู้จัดทำจึงได้ออกแบบและพัฒนาถึงเก็บความเย็นที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ถังโม่เป็นตัวกักเก็บความเย็นและติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จำนวน 4 แผ่นต่อแบบอนุกรมบริเวณผนังถึง เพื่อสร้างความแตกต่าง

ของอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกถัง จะถูกส่งผ่าน โมดูลแปลงความต่างศักย์และกักเก็บในแบตเตอรี่ สำหรับนำไปใช้งานต่อไป ทั้งนี้ โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของอุณหภูมิ กับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ รวมถึงประเมิน ศักยภาพของระบบต้นแบบในการประยุกต์ใช้เป็นแหล่ง พลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กและการเก็บเกี่ยวพลังงาน จากความร้อนเหลือทิ้งในอนาคต

วิธีการดำเนินงาน

2.1 การสร้างต้นแบบถังเก็บความเย็น

สร้างต้นแบบถังเก็บความเย็นโดยใช้ถังโฟม เป็นโครงสร้างหลัก และประกอบแผ่นอะคริลิก เป็นโครงครอบภายนอก จากนั้นเจาะช่องติดตั้ง แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อช่วยถ่ายเทความร้อน

2.2 การติดตั้งระบบเทอร์โมอิเล็กทริก

ติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEG) จำนวน 4 แผ่น ต่อวงจรแบบอนุกรม โดยให้ด้านหนึ่ง สัมผัสกับความเย็นภายในถังและอีกด้านสัมผัสกับ แผ่นอะลูมิเนียมด้านนอก จากนั้นเชื่อมต่อกับโมดูล แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่สำหรับ กักเก็บพลังงาน

2.3 การทดสอบและเก็บข้อมูล

เติมน้ำแข็งภายในถังเพื่อสร้างความแตกต่างของ อุณหภูมิ วัดอุณหภูมิภายในและภายนอกด้วยเครื่องวัด อุณหภูมิแบบ Type K Dual Input Thermometer และ วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าวรรณถึงกระแสไฟฟ้าด้วยมัลติมิเตอร์ ก่อนคำนวณกำลังไฟฟ้าจากสมการ

$$P = VI$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

จากการทดสอบต้นแบบถังเก็บความเย็นที่สามารถ ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEG) จำนวน

4 แผ่นต่อแบบอนุกรม และเชื่อมต่อเข้ากับโมดูล แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงาน พบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เมื่อเกิด ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอก ถังเก็บความเย็น

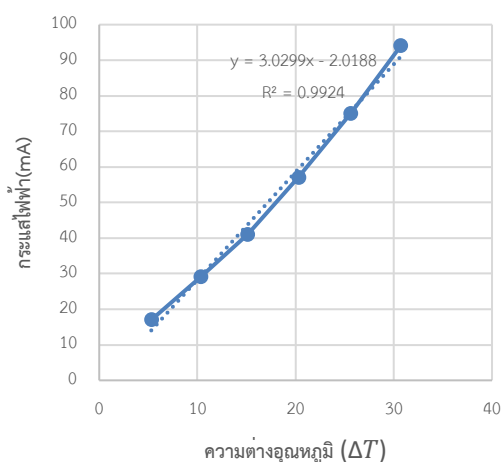
จากการทดลอง เมื่อเกิดความต่างของอุณหภูมิ ระหว่างภายในและภายนอกถังเก็บความเย็น ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โดยในการทดลอง อุณหภูมิภายนอกมีค่าอยู่ในช่วง 31.4–31.8 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิภายในลดลงจาก 26.1 เหลือ 0.9 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ (ΔT) เพิ่มขึ้นจาก 5.3 เป็น 30.7 องศาเซลเซียสและ ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่าง ของอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า

ความต่าง อุณหภูมิ (ΔT)	ความ ต่างศักย์ ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (mA)	กำลัง ไฟฟ้า (mW)
5.3	0.16	17	2.72
10.3	0.39	29	11.31
15.1	0.67	41	27.47
20.3	0.99	57	56.43
25.6	1.34	75	100.50
30.7	1.71	94	160.74

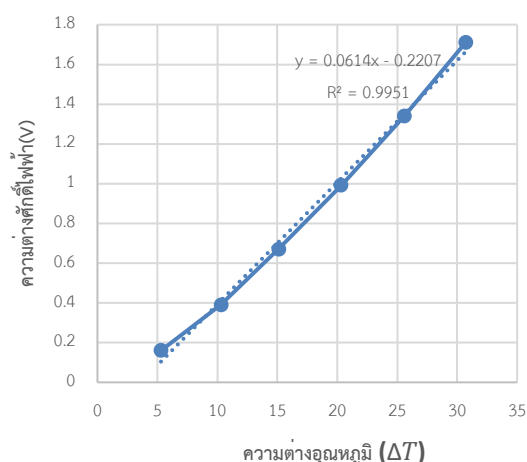
จากข้อมูลในตารางพบว่า เมื่อค่าความแตกต่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความต่างอุณหภูมิ 5.3 องศาเซลเซียส ระบบสามารถ ผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 0.16 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้า 2.72 มิลลิวัตต์ แต่เมื่อความต่างอุณหภูมิเพิ่มเป็น 30.7 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1.71 โวลต์ และ กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 160.74 มิลลิวัตต์

กราฟที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างอุณหภูมิ กับ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้



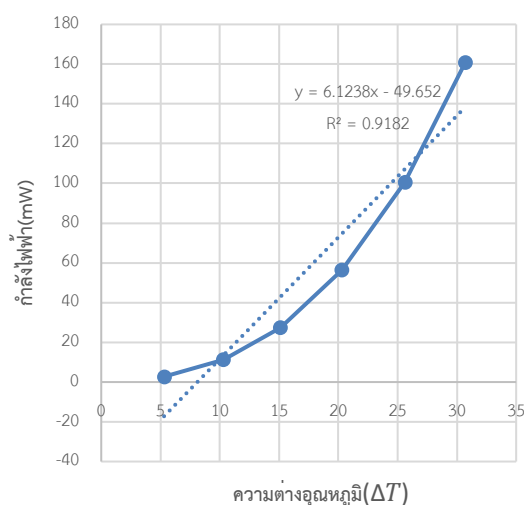
กราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5.3 เป็น 30.7 องศาเซลเซียส กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 17 เป็น 94 มิลลิแอมแปร์ โดยกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งสอดคล้องกับหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ที่ระบุว่า เมื่ออุณหภูมิของวัสดุทั้งสองด้านแตกต่างกัน จะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะประจุและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในวงจร โดยค่า R^2 ที่ได้จากเส้นแนวโน้มมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงให้เห็นว่าความต่างของอุณหภูมิมิมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าในระดับสูง และสามารถใช้สมการจากเส้นแนวโน้มในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้ช่วงการทดลองได้

กราฟที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างอุณหภูมิ กับ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้



กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5.3 เป็น 30.7 องศาเซลเซียส ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 0.16 เป็น 1.71 โวลต์ โดยกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งสอดคล้องกับหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ที่ระบุว่า เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของวัสดุเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นตาม ส่งผลให้ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

กราฟที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างอุณหภูมิ กับ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้



กราฟที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริก จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความแตกต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5.3 เป็น 30.7 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 2.72 เป็น 160.74 มิลลิวัตต์ โดยกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงขึ้นเมื่อความต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกัน ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าซึ่งคำนวณจากสมการ $P = VI$ เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) และแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความต่างอุณหภูมิสามารถช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผลและอภิปรายผล

1. สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความต่างของอุณหภูมิ โดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นตัวกลางในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกถึงเก็บความเย็นเพิ่มขึ้นจาก 5.3 เป็น 30.7 องศาเซลเซียส

ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.16–1.71 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 17–94 มิลลิแอมแปร์ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการ $P = VI$ มีค่าอยู่ในช่วง 2.72–160.74 มิลลิวัตต์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความต่างของอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยเมื่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ได้มากขึ้นตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับหลักการของ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) แสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จริงจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กและระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งในอนาคต

2. อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เพิ่มขึ้นจาก 5.3 เป็น 30.7 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตาม โดยค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 17 เป็น 94 มิลลิแอมแปร์ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.16 เป็น 1.71 โวลต์ และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 2.72 เป็น 160.74 มิลลิวัตต์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ กับค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ที่อธิบายว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า และทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร

นอกจากนี้ แนวโน้มของค่ากระแสไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามค่าความต่างของอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีความสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี อย่างไรก็ตาม แม้ว่าระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จริง แต่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังอยู่ในระดับมิลลิวัตต์

ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง และการสูญเสียพลังงานความร้อนภายในระบบ ทั้งนี้ หากมีการเพิ่มความต่างของอุณหภูมิปรับปรุงการถ่ายเทความร้อน หรือเพิ่มจำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ก็อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่อง “การพัฒนาถังเก็บความเย็นที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ ความเมตตา และการสนับสนุนจากหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ ติดตามความก้าวหน้า และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ ตั้งแต่การกำหนดหัวข้อ การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ผล ตลอดจนการจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหาร คณะครู และบุคลากรของโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย เลย ที่ได้สนับสนุนด้านสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินโครงการ รวมทั้งอำนวยความสะดวกในทุกขั้นตอนของการศึกษา

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และกำลังใจ จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากโครงการฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบเป็นเครื่องแสดงความขอบพระคุณแก่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการศึกษา หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับไว้เพื่อปรับปรุงและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2561). เทคโนโลยีพลังงานทดแทน. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2562). พลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2564). แนวทางการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- กระทรวงพลังงาน. (2563). รายงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- กระทรวงพลังงาน. (2565). รายงานพลังงานของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- ชาญชัย วงศ์ศรี. (2559). ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช.
- ชาญชัย วงศ์ศรี. (2561). ฟิสิกส์ไฟฟ้าและแม่เหล็ก. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชุติมา ประสิทธิ์ศิลป์. (2560). ฟิสิกส์พลังงาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณรงค์ชัย ตั้งวัฒนากุล. (2562). พลังงานกับการพัฒนาที่ยั่งยืน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนภฤต ศรีสุวรรณ. (2561). การทดลองฟิสิกส์ไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญช่วย ศรีสะอาด. (2558). การวิจัยเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.
- สมบัติ อภิชาติเจริญ. (2560). ฟิสิกส์ไฟฟ้าและแม่เหล็ก ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์.สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน. (2563). คู่มือการจัดการเรียนรู้วิชาฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงศึกษาธิการ.สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2561). พลังงานทางเลือกและนวัตกรรมพลังงาน. ปทุมธานี: สวทช.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2562). นวัตกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม. ปทุมธานี: สวทช.
- Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. Science, 321(5895), 1457–1461.



- Chen, G. (2016). Nanoscale Energy Transport and Conversion. Oxford: Oxford University Press.
- DiSalvo, F. J. (1999). Thermoelectric cooling and power generation. *Science*, 285(5428), 703– 706.
- Goldsmid, H. J. (2010). Introduction to Thermoelectricity. Berlin: Springer.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). Fundamentals of Physics (10th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Nolas, G. S., Sharp, J., & Goldsmid, H. J. (2001). Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments. Berlin: Springer.
- Rowe, D. M. (Ed.). (2006). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). Physics for Scientists and Engineers (10th ed.). Boston: Cengage Learning.
- Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7, 105–114.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). Physics for Scientists and Engineers. New York: W. H. Freeman.
- Zebarjadi, M., Esfarjani, K., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., & Chen, G. (2012). Perspectives on thermoelectrics. *Energy & Environmental Science*, 5, 5147–5162.