

การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของ TEG โดยใช้โปรแกรม
Orcad

THE STUDY OF A SIMPLIFIED ELECTRICAL MODEL OF TEG
BY USING ORCAD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF A SIMPLIFIED ELECTRICAL MODEL OF TEG BY USING ORCAD



KITTAYA VIRIYAKITKACHON
NATTHANICHA THIENGTHAE

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018



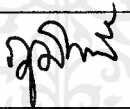
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของ TEG โดยใช้โปรแกรม Orcad

ชื่อนักศึกษา นางสาวกฤตยา วิริยะกิจขจร รหัสนักศึกษา 58051021
นางสาวณัฐธินิษา เทียงแท้ รหัสนักศึกษา 58051061

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.รัชนก สมพรเสน่ห์ กรรมการ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของ TEG โดยใช้โปรแกรม Orcad
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกฤตยา วิริยะกิจขจร รหัสนักศึกษา 58051021 นางสาวณัฐธนิชา เทียงแท้ รหัสนักศึกษา 58051061
ปริญญา ภาควิชา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้โปรแกรม Orcad เพื่อนำมาใช้ทดแทนตัวเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจริง ตั้งต้นจากคุณสมบัติของวัสดุ โดยการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร(V_{oc}) และความต้านทานภายใน(R) ตามคุณสมบัติของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Maximum power transfer) จากผลการทดลองพบว่าในงานนี้สามารถหาความต้านทานภายใน(R) ของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่มีการต่อในรูปแบบต่าง ๆ ได้ และสามารถทราบค่าแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) เอาต์พุตได้ โดยจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายในของชิ้นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ($R_L=R$)

คำสำคัญ : ตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

Title	The Study of a Simplified Electrical Model of TEG by Orcad	
Student	Miss Kittaya Viriyakitkachorn	Student ID 58051021
	Miss Natthanicha Thienghae	Student ID 58051061
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2018	
Advisor	Phumin Jindajitawat	

Abstract

This project is to study a simplified electrical model of thermoelectric generator (TEG) by using Orcad. A methodology is developed for determining electrical parameters of a thermoelectric pellet, such as open circuit voltage (V_{oc}) and internal resistance (R). These electrical parameters are used as the initial values for the simplified electrical model to simulate loading effects of a thermoelectric module. The result is able to predict the internal resistance and the maximum power transfer of the module.

Keywords : thermoelectric generator (TEG)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจากทุก ๆ ท่าน ขอขอบคุณ อ.ภูมิินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ ที่คอยให้ความรู้ และการสนับสนุน ตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม และ คอยให้คำปรึกษาในทางวิชาการและคอยช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่นักศึกษาปริญญาเอก ปริญญาโท และเพื่อนๆ นักศึกษาในห้องปฏิบัติการ สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ คำปรึกษา แนะนำ และให้การช่วยเหลือในการทำงานจนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาและประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาในภาค บัณฑิตจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การอุปการะ หุนในการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ตีมาโดยตลอด

กฤตยา วีริยะกิจขจร
ณัฏฐณิชา เทียงแท้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 หลักการพื้นฐาน (Basic principle).....	4
2.1.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect).....	4
2.1.2 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect).....	4
2.1.3 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect).....	5
2.1.4 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect).....	6
2.2 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric devices).....	7
2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก(Thermoelectric Generator).....	8
2.3 สมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric materials properties).....	9
2.3.1 สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient).....	9
2.3.2 สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity).....	9
2.3.3 ค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริต (Figure of Merit).....	10
2.3.4 สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity).....	10
2.4 ทฤษฎีเทวินิน (Thevenin's Theorem).....	11
2.4.1 ทฤษฎีเทวินิน.....	11
2.4.2 หลักการทฤษฎีเทวินิน.....	11

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	14
3.1 การออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	14
3.1.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	14
3.1.2 แผนผังขั้นตอนการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	17
3.2 วิเคราะห์ขนาดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	18
3.3 การจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าของTEG โดยใช้โปรแกรมOrcad.....	19
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	22
4.1 การออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	22
4.1.1 การออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อวัสดุ p-type คือ 25% Bi ₂ Te ₃ , 75% Sb ₂ Te ₃ (1.75% excess Se).....	22
4.1.2 การออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อวัสดุ p-type คือ BiCuSeO.....	25
4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	26
4.3 ผลของการจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าของTEGโดยใช้โปรแกรมOrcad....	27
4.3.1 ผลของการจำลองการทำงานเมื่อต่อแบบอนุกรม.....	27
4.3.2 ผลของการจำลองการทำงานเมื่อต่อแบบขนาน.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.1.1 การศึกษาการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก.....	48
5.1.2 การจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าของTEGโดยใช้ โปรแกรมOrcad.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก ตัวอย่างในการออกแบบ Thermoelectric generator.....	63
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนงานดำเนินการ.....	3
3.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์ขนาดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	18
4.1 ตารางค่าอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}), ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o), ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(V_{oc}), ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ของวัสดุ n-type คือ 75% Bi ₂ Te ₃ , 25% Bi ₂ Se ₃ และวัสดุ p-type คือ 25% Bi ₂ Te ₃ , 75% Sb ₂ Te ₃ (1.75% excess Se) ที่ต่อเข้าคู่กันโดยกำหนดให้มี ΔT เท่ากับ 100°C.....	22
4.2 ตารางค่าอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}), ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o), ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(V_{oc}), ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ของวัสดุ n-type คือ 75% Bi ₂ Te ₃ , 25% Bi ₂ Se ₃ และวัสดุ p-type คือ 25% Bi ₂ Te ₃ , 75% Sb ₂ Te ₃ (1.75% excess Se) ที่ต่อเข้าคู่กันโดยกำหนดให้มี ΔT เท่ากับ 300°C.....	23
4.3 ตารางค่าอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}), ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o), ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(V_{oc}), ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ของวัสดุ n-type คือ 75% Bi ₂ Te ₃ , 25% Bi ₂ Se ₃ และวัสดุ p-type คือ BiCuSeO ที่ต่อเข้าคู่กัน โดยกำหนดให้มี ΔT เท่ากับ 300°C.....	25
4.4 ตารางค่าความต้านทานภายใน(R_i), กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม(I^*), ค่าการนำความร้อน(K) และความร้อนด้านเย็น(q_c) ภายใต้เงื่อนไขของ V_n และ V_p ที่อุณหภูมิ 300K.....	26
4.5 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับ ความต้านทานภายใน($R_L=R_i$).....	27
4.6 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับ ความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_o$).....	28
4.7 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่แรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) ในแต่ละอุณหภูมิ.....	31
4.8 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทาน(R) ในแต่ละอุณหภูมิ.....	32
4.9 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับ ความต้านทานภายใน($R_L=R_i$).....	37
4.10 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกPN ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับ ความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_o$).....	38

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่อิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับ ความต้านทานภายใน($R_L=R$).....	40
4.12 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่อิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับ ความต้านทานที่เหมาะสม($R_L= R_0$).....	41
4.13 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่อิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทาน(R) ในแต่ละอุณหภูมิ.....	43
5.1 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูล 1 ตัวจากการทดลอง.....	51
5.1.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูล 1 ตัวจากแบบจำลองทางไฟฟ้า.....	51
5.2 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูลที่มีฉนวนจากการทดลอง.....	53
5.2.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูลที่มีฉนวนจากแบบจำลองทางไฟฟ้า.....	54
5.3 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนานจากการทดลอง.....	56
5.3.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนานจากแบบจำลองทางไฟฟ้า.....	56
5.4 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนาน 5 ชุดจากการทดลอง.....	58
5.4.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนาน 5 ชุดจากแบบจำลองทางไฟฟ้า.....	58

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เตาประหยัดพลังงานและผลิตไฟฟ้า..... 4
2.2	ปรากฏการณ์ซีเบค..... 5
2.3	ปรากฏการณ์เพลเทียร์..... 6
2.4	การทดลองของปรากฏการณ์ทอมสัน..... 7
2.5	ส่วนประกอบของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก..... 8
2.6	อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าสำหรับชาร์ตแบตเตอรี่..... 8
2.7	วงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin Equivalent Circuit)..... 11
2.8	วงจรไฟฟ้าในการหาค่าแรงดันเทวินิน (V_{th})..... 11
2.9	วงจรไฟฟ้าในการหาค่าความต้านทานเทวินิน (R_{th})..... 12
2.10	วงจรไฟฟ้าในการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL})..... 13
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบค(α) สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) และ Figure of merit(Z) ของ n-type 75% Bi ₂ Te ₃ ,25% Bi ₂ Se ₃ เทียบกับอุณหภูมิ (T)..... 15
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบค(α) สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) และ Figure of merit(Z) ของ p-type 25%Bi ₂ Te ₃ ,75%Sb ₂ Te ₃ (1.75% excess Se) เทียบกับอุณหภูมิ(T)..... 16
3.3	วงจรไฟฟ้าสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกP-N 1 คู่..... 19
3.4	วงจรไฟฟ้าที่ต่อกันแบบอนุกรมและแบบขนานที่ประกอบด้วยคู่P-N จำนวน 2 คู่..... 20
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$)..... 27
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_0$)..... 28
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$)..... 29
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_0$)..... 30
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)..... 31
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน(R) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)..... 32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 1 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม.....	33
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 2 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม.....	33
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 3 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม.....	34
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 4 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม.....	34
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 8 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม.....	35
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 20 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม.....	35
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 30 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม.....	36
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$).....	37
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_O$).....	38
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$).....	39
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_O$).....	40
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N).....	42
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน(R) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N).....	43
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 1 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน.....	44
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 2 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน.....	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 3 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน.....	45
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 4 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน.....	45
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 8 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน.....	46
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 20 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน.....	46
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 30 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน.....	47
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนในด้านร้อน(q_H) กับอุณหภูมิด้านร้อน(T_H).....	48
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) กับอุณหภูมิ(T).....	48
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}) กับอุณหภูมิ(T).....	49
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}).....	52
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R).....	52
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I).....	53
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}).....	54
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R) ของความต้านทานไฟฟ้าจากการทดลอง และความต้านทานไฟฟ้าจากการคำนวณ.....	55
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I).....	55
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}).....	56
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R).....	57
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I).....	57
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}).....	58
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R).....	59
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I).....	59

ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สภาพปัญหา อดีต ปัจจุบัน และแนวโน้มในอนาคต

เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการศึกษาระหว่างปรากฏการณ์เชิงไฟฟ้า (Electronics) และปรากฏการณ์เชิงความร้อน (Thermodynamics) ในวัสดุ ทำให้เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถย้อนกลับได้ กล่าวคือสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิได้ตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ ขณะเดียวกันสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน ซึ่งความเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบจนเกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้ตามปรากฏการณ์ซีเบค

เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมากโดยเฉพาะสำหรับการระบายความร้อนหรือสำหรับการทำความเย็น โดยมีข้อดีในการช่วยลดมลพิษทางอากาศ เพราะไม่มีการใช้สารทำความเย็นซีเอฟซี (CFC) และไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศแวดล้อม นอกจากนี้ยังช่วยลดมลพิษทางเสียงทั้งในเครื่องทำความเย็นยานยนต์และอาคารที่พักอาศัยได้ เนื่องจากการใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ในการทำความเย็นไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวน เนื่องจากไม่มีส่วนใดของตัวทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนไหวในขณะทำงาน ทำให้ได้รับความน่าเชื่อถือได้มาก เหมาะสำหรับการควบคุมอุณหภูมิ การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ สามารถควบคุมการขนส่งความร้อนด้วยกระแสอินพุต มีขนาดกะทัดรัดเป็นประโยชน์ในการพกพาหรืองานที่มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดและน้ำหนัก อีกทั้งยังเป็นทางเลือกในการระบายความร้อนที่ดีสำหรับเครื่องทำความเย็นแบบไอในระบบที่ไวต่อการสั่นสะเทือนทางกล ข้อเสียของเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์คือ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบบีบอัดไอ การกระจายปริมาณของความร้อนเกิดขึ้นได้อย่างจำกัด และความร้อนทั้งหมดที่ออกจากตัวทำความเย็นมีปริมาณมากกว่า

ตัวอย่างของอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มีทั้งในทางอิเล็กทรอนิกส์ก็คือ การทำความเย็นแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างการประยุกต์ในด้าน การแพทย์ เช่น อุปกรณ์พกพาในการเก็บวัคซีน และตัวอย่างการประยุกต์ในด้านการบินและอวกาศ เช่น การควบคุมอุณหภูมิซีปนาวุสและระบบอวกาศ เป็นต้น ในการใช้งานตัวทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์จะมีช่วงของการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันออกไป เริ่มต้นจากระดับมิลลิวัตต์ไปจนถึงระดับหลายพันวัตต์ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพต่ำ การถ่ายเทความร้อนในปริมาณน้อยจึงทำงานได้ดีกว่า

แนวคิด ทฤษฎีต่าง ๆ

แนวคิดพื้นฐานที่อยู่เบื้องหลังเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกคือ ปรากฏการณ์เพลเทียร์ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ค้นพบครั้งแรกในช่วงต้นศตวรรษที่ 19 ปรากฏการณ์เพลเทียร์จะเกิดขึ้นมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำสองชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน การดูดซับหรือปลดปล่อยความร้อนของรอยต่อที่เกิดจากตัวนำทั้งสองจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์เพลเทียร์ที่ได้รับการต่อแรงดันไฟฟ้าหรือไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ตัวนำทั้งสองจะทำให้เกิดเป็นหน่วยปฏิบัติการที่ช่วยให้เกิดการขนส่งความร้อนอย่างต่อเนื่องระหว่างรอยต่อของตัวนำได้ และปรากฏการณ์ซีเบคเป็นผลย้อนกลับของปรากฏการณ์เพลเทียร์ กล่าวคือเมื่อให้ความร้อนให้แก่ตัวนำทั้งสองที่แตกต่างกันทำให้สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้ กระแสจะทำให้เกิดการไหลผ่านประจุพาหะไฟฟ้า(โดยมีทิศตรงข้ามกับทิศการไหลของโฮล หรือมีทิศเดียวกับทิศการไหลของอิเล็กตรอน) การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนตัวของประจุพาหะไฟฟ้า ในโลกของเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกโดยทั่วไปจะใช้บิสมัทเทลลูไรด์(สารกึ่งตัวนำ) เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการกำเนิดปรากฏการณ์เพลเทียร์ โดยจะต่อคั่นระหว่างตัวนำไฟฟ้าสองตัวซึ่งมักจะใช้ทองแดงเพื่อเป็นเส้นทางเชื่อมต่อไปยังแหล่งจ่ายไฟ และที่เลือกใช้สารกึ่งตัวนำเพราะสามารถปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการบีบความร้อน และนอกจากนี้ยังสามารถเลือกชนิดของตัวประจุไฟฟ้าภายในได้ การใช้วัสดุประเภทนี้สามารถสร้างอุปกรณ์เพลเทียร์ได้ เช่น โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

ถ้าวัสดุสารกึ่งตัวนำเป็น n-type อิเล็กตรอนจะเป็นประจุพาหะไฟฟ้า ที่ถูกผลักจากขั้วลบไปยังขั้วบวกของแหล่งจ่าย อิเล็กตรอนโดยจะไหลผ่านวัสดุจากด้านเย็นไปยังด้านร้อน ความร้อนถูกดูดซับที่รอยต่อด้านเย็นและถูกถ่ายโอนไปยังรอยต่อร้อนที่ด้านบน การบีบจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพโดยที่พาหะของประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านชั้นส่วนสารกึ่งตัวนำ เมื่อให้แรงดันความร้อนจะเคลื่อนย้ายไปในทิศทางเดียวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และถ้าสารกึ่งตัวนำเป็น p-type โฮลจะเป็นพาหะประจุไฟฟ้า โฮลจะเป็นตัวนำไฟฟ้าของโครงสร้างผลึก p-type โฮลจะถูกผลักจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ดังนั้นกระแสของโฮลจะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของอิเล็กตรอน เนื่องจากโฮลเป็นประจุพาหะไฟฟ้าที่มีอยู่ในวัสดุที่ขนส่งความร้อนผ่านตัวนำ โดยพื้นฐานแล้วประจุพาหะไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดทิศทางของการไหลของความร้อน การบีบความร้อนที่ต่างกันของวัสดุสารกึ่งตัวนำ p และ n นี้เป็นกลไกที่สำคัญมากในการออกแบบอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้งานได้จริง

การเลือกวัสดุเพื่อนำมาสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่างชนิดกัน จะทำให้มีคุณสมบัติที่ निक ออกแบบต้องการรู้แตกต่างกันไป เช่น ค่าประสิทธิภาพสูงสุด กำลังสูงสุด กำลังเอาต์พุต ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิต่ำ ค่ากระแสและแรงดัน และค่าความร้อนอินพุต โครงการพิเศษนี้ต้องการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ที่ใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเมื่อใช้วัสดุตั้งต้นในการสร้างแตกต่างกัน และหาแบบจำลองทางไฟฟ้าของตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้โปรแกรม Orcad

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

นำคุณสมบัติสัมประสิทธิ์ซีเบค ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ figure of merit ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ ของงานวิจัยที่มีแล้ว มาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพสูงสุด กำลังสูงสุด กำลังเอาต์พุต ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิต่ำ ค่ากระแสและแรงดัน และค่าความร้อนอินพุต แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทำการศึกษาการจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ทดแทนตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกได้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินการ

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาแนวทางการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดคุณสมบัติที่สำคัญต่อการทำงาน
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการพล็อตกราฟเพื่อศึกษาความเป็นไปได้จากคุณสมบัติที่เลือก
- ขั้นตอนที่ 4 สรุปและให้ข้อเสนอในการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและการศึกษา

แบบจำลองทางไฟฟ้า

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนงานดำเนินการ

กิจกรรม	ระยะเวลา									
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
ขั้นตอนที่ 1										
ขั้นตอนที่ 2										
ขั้นตอนที่ 3										
ขั้นตอนที่ 4										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

สามารถนำผลที่ได้ไปประเมินความเป็นไปได้ก่อนที่จะสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจริง

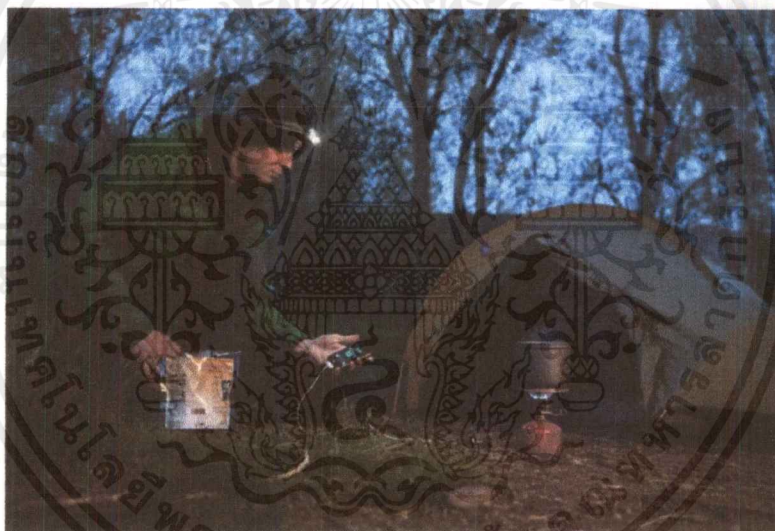
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการพื้นฐาน (Basic principle)

2.1.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect)

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริกจึงเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถผันกลับได้ โดยมีตัวกลางในการแลกเปลี่ยนพลังงานเป็นวัสดุของแข็งที่มีสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกที่เรียกว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็ก เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับพลังงานจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ จึงสามารถเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในระบบได้ โดยเทอร์โมอิเล็กทริกมีปรากฏการณ์พื้นฐานในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานได้อยู่ 3 ปรากฏการณ์ ได้แก่ ปรากฏการณ์ซีเบค ปรากฏการณ์เพลเทียร์ และปรากฏการณ์ทอมสัน



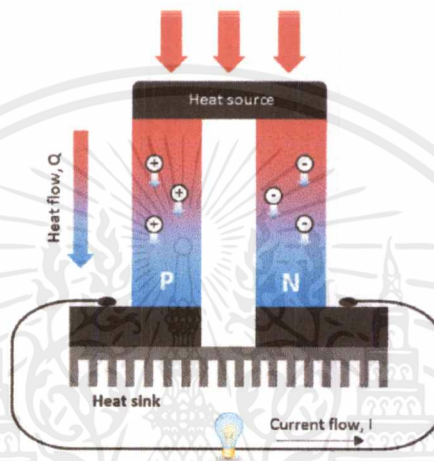
รูปที่ 2.1 เต้าประหยัดพลังงานและผลิตไฟฟ้า[1]

2.1.2 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect)

ปรากฏการณ์ซีเบค ถูกค้นพบโดยโรมันส์ จอห์น ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) โดยพบจากการทดลองว่า ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง 2 ด้านของโลหะ โดยเมื่อให้ความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งของรอยต่อโลหะของระบบที่ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ วัสดุสารชนิดพีและชนิดเอ็น

ต่อเข้าด้วยกันเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขึ้น ทำให้พาหะข้างมากที่เป็นตัวนำไฟฟ้า(อิเล็กตรอนหรือโฮล) เกิดการแพร่จากด้านร้อนไปยังด้านเย็นได้ จากการกระตุ้นในเชิงความร้อน จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในระบบ

ดังนั้นปรากฏการณ์ซีเบคจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณด้านทั้งสองของโลหะ ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมทั้ง 2 ด้านของโลหะและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในระบบขึ้นนั่นเอง โดยสรุปง่าย ๆว่า เมื่อเราจ่ายความร้อนที่บริเวณรอยต่อของโลหะตัวนำทั้งสองจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิดได้



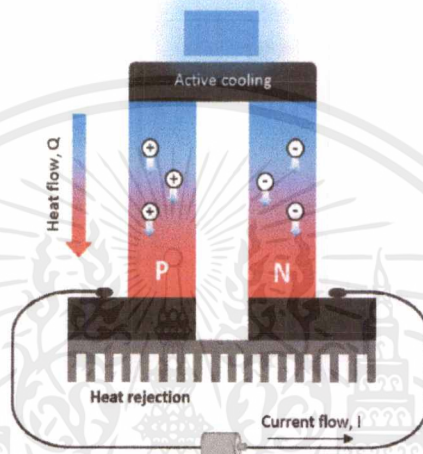
รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ซีเบค

2.1.3 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ปรากฏการณ์เพลเทียร์ ถูกค้นพบโดย ฌอง ชาร์ล เอทานส์ เพลเทียร์ (Jean Charles Ananse Peltier) โดยพบจากการทดลองว่า เมื่อทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในโลหะ จะทำให้เกิดรอยต่อด้านร้อนและด้านเย็นของโลหะทั้ง 2 ชนิดที่ต่างกันที่มีการต่อเข้าคู่ด้วยกันได้ ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ อันเนื่องมาจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในแต่ละทิศทางเป็นตัวบ่งบอกว่า จะเกิดการดูดความร้อนทำให้อุณหภูมิด้านนั้นเย็นตัวลง และการคายความร้อนทำให้อุณหภูมิด้านนั้นร้อนสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบทำให้เกิดการดูดความร้อนและการคายความร้อนที่บริเวณรอยต่อของโลหะที่ต่างชนิดกัน

โดยเป็นที่ทราบกันดีว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นปรากฏการณ์ที่ได้ชื่อว่าเป็นปรากฏการณ์ย้อนกลับของปรากฏการณ์ซีเบค โดยเป็นปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน แล้วทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นในระบบ กล่าวคือ เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแก่สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ โดยมี

พาหะนำไฟฟ้า(อิเล็กตรอนหรือโฮล) ในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นตัวพาความร้อนจากด้านเย็นมายังด้านร้อน โดยที่ฝั่งวัสดุชนิดพี พาหะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้า และในฝั่งวัสดุชนิดเอ็น พาหะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิของด้านที่ถูกดูดความร้อนออกไปเย็นลง และด้านที่คายความร้อนอุณหภูมิร้อนขึ้น โดยสรุปง่าย ๆ ว่าเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะเกิดความร้อนขึ้นที่รอยต่อของโลหะตัวนำ ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดความร้อนว่าจะเพิ่มสูงขึ้น (ด้านร้อน) หรือลดต่ำลง(ด้านเย็น)

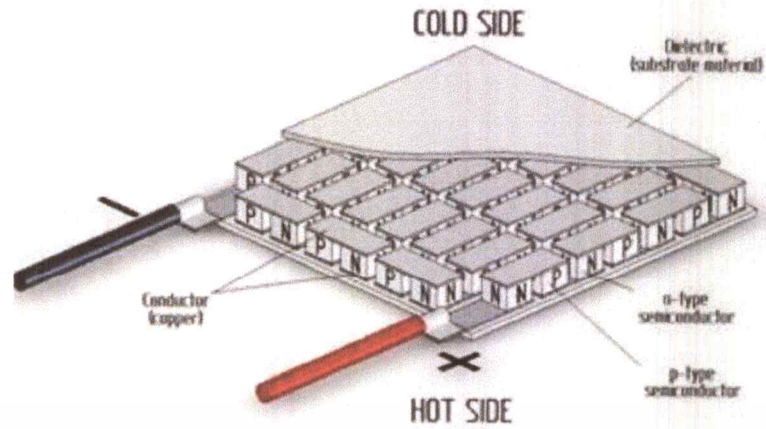


รูปที่ 2.3 ปราบฏการณ์เพลเทียร์

2.1.4 ปราบฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

ปราบฏการณ์ทอมสันถูกค้นพบโดย วิลเลียม ทอมสัน(William Thomson) โดยอาศัยทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์(Thermodynamics) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ศึกษาเกี่ยวกับปราบฏการณ์เชิงความร้อนในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปราบฏการณ์ซีเบค และปราบฏการณ์เพลเทียร์ และพบว่าเมื่อเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวัสดุนำไฟฟ้า ขณะที่วัสดุมีความแตกต่างของอุณหภูมิ สามารถเกิดการดูดความร้อนหรือคายความร้อนในวัสดุได้ แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดการไหลของความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทำให้ความร้อนไหลจากด้านหนึ่งในตัววัสดุนำไฟฟ้าไปยังอีกด้านหนึ่งได้

ปราบฏการณ์ทอมสันเป็นปราบฏการณ์ที่ทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ในวัสดุนำไฟฟ้า เมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุนำไฟฟ้าขณะที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ ความร้อนในปราบฏการณ์นี้จึงเรียกว่า ความร้อนทอมสัน(Thomson heat) โดยปราบฏการณ์ทอมสันทำให้เห็นว่าปราบฏการณ์ซีเบค และปราบฏการณ์เพลเทียร์ เกิดขึ้นเป็นส่วนกลับหรือตรงกันข้ามกัน ดังนั้น



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก[2]

2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator)

เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อจ่ายความร้อนเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งของวัสดุจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง 2 ด้านของวัสดุ คือ ด้านร้อนและด้านเย็น โดยในสารกึ่งตัวนำ p-type จะมีพาหะข้างมากเป็นโฮล(hole) และในสารกึ่งตัวนำ n-type จะมีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน(electron) ซึ่งพาหะข้างมากจะเป็นตัวพาความร้อนให้ไหลจากด้านร้อนไปยังด้านเย็น เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมปลายทั้ง 2 ด้านของวัสดุทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบและนำสามารถกระแสไฟฟ้าเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่สมาร์ทโฟน, รถยนต์ประหยัดพลังงาน ฯลฯ



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าสำหรับชาร์จแบตเตอรี่สมาร์ทโฟน[1]

2.3 สมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric materials properties)

2.3.1 สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient)

สัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เป็นตัวบ่งบอกถึงความเป็นเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคได้จากสัดส่วนของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัสดุ ($\Delta V = V_H - V_C$) และความต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นบนวัสดุ ($\Delta T = T_H - T_C$) โดยในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะกระทำขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าภายนอกไหลในวัสดุหรือไหลในวงจร แสดงได้ดังสมการ

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_H - V_C}{T_H - T_C} \quad \text{หน่วย V/K} \quad (2.1)$$

ในการเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมบนวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกเหนี่ยวนำมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น โดยพาหะนำไฟฟ้า(อิเล็กตรอนและโฮล) ในวัสดุจะเคลื่อนที่เมื่อได้รับความร้อน เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นบนวัสดุทำให้พาหะนำไฟฟ้าเคลื่อนที่จากด้านร้อนไปยังด้านเย็น กล่าวคือ ถ้าพาหะนำไฟฟ้าในวัสดุคือ อิเล็กตรอน ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นจะมีเป็นลบ เนื่องจากอิเล็กตรอนแพร่จากด้านร้อนไปยังด้านเย็นแล้วทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในด้านร้อนมากกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในด้านเย็น ในทางกลับกันถ้าพาหะนำไฟฟ้าในวัสดุคือ โฮล ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นจะมีเป็นบวก เนื่องจากโฮลแพร่จากด้านร้อนไปยังด้านเย็นแล้วทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในด้านร้อนน้อยกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในด้านเย็น และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคสูง

2.3.2 สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)

สภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น $\Omega \cdot m$ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า วัสดุที่เป็นฉนวนจะมีความต้านทานไฟฟ้าสูง และวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ เนื่องมาจากการยึดเหนี่ยวกันของพาหะนำไฟฟ้าในอะตอม โดยความร้อนมีผลต่อการเคลื่อนที่หรือการชนกันของอิเล็กตรอนในอะตอม ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นกระแสก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

2.3.3 ค่าฟิสิกเกอร์ออฟเมอริต (Figure of Merit)

ค่าฟิสิกเกอร์ออฟเมอริตเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกได้ว่าเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละชนิดนั่นเอง วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีค่า Z สูงก็คือ Bismuth telluride (Bi_2Te_3) โดยมีค่า Z อยู่ที่ประมาณ 1 โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงถึงค่า Figure of Merit คือ Z มีหน่วยเป็นหนึ่งต่อเคลวิน ($1/\text{K}$) นอกจากนี้ยังมีค่าที่บ่งชี้ถึงสมบัติทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอีกค่าหนึ่งเรียกว่า Dimensionless Figure of merit สัญลักษณ์คือ ZT ไม่มีหน่วย เป็นค่าที่พิจารณาค่า Z กับอุณหภูมิ (T) ไปพร้อมกัน ซึ่งนิยมใช้ค่า ZT แทนค่า Z เพราะสะดวกในการเปรียบเทียบค่าระหว่างวัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยกัน และยังบอกถึงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานได้ โดยที่

$$Z = \frac{\sigma S^2}{K} \quad (2.2)$$

เมื่อ S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K) σ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า ($\Omega\cdot\text{m}$)⁻¹
 K คือ ค่าสภาพนำความร้อน ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) T คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างร้อนและเย็น (K)
 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า Z มากจะแสดงว่าวัสดุนั้นมีความสามารถในการแปลงพลังงานได้สูง ถ้าจะทำให้ค่า Z ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าสูงได้ก็ต่อเมื่อทำการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ค่าสภาพนำไฟฟ้าและทำให้ค่าสภาพนำความร้อนต่ำ

2.3.4 สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity)

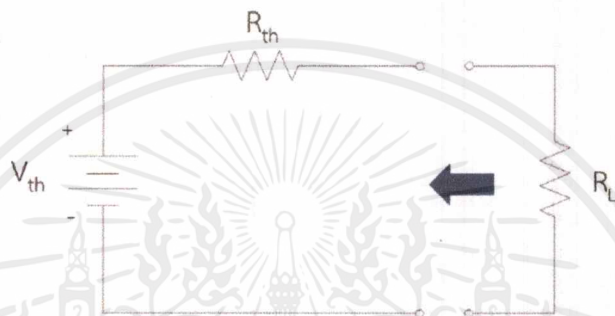
ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด โดยอาศัยการนำความร้อนของวัสดุหรือความสามารถในการยอมให้ความร้อนไหลผ่านวัสดุนั้นได้ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้นั้นคือ K มีหน่วยเป็น $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ โดยที่วัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแตกต่างกันออกไป ในวัสดุที่มีค่า K สูงจะแสดงว่าการนำความร้อนของวัสดุนั้นสูง (ความร้อนผ่านได้มาก) เช่น ทองแดง เงิน อลูมิเนียม ฯลฯ และในวัสดุที่มีค่า K ต่ำจะแสดงว่าการนำความร้อนของวัสดุนั้นต่ำ (ความร้อนผ่านได้น้อย) เช่น แผ่นยิปซัม ฉนวนใยแก้ว ไม้อัด ฯลฯ

โดยที่ค่าสภาพการนำความร้อนยิ่งสูงจะยิ่งนำความร้อนมาก เช่น วัสดุประเภทโลหะ มักมีค่าสภาพการนำความร้อนสูงกว่าวัสดุประเภทพลาสติก เป็นต้น โดยการออกแบบอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นจำเป็นต้องทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนต่ำเพื่อให้ได้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพที่ดี

2.4 ทฤษฎีเทวินิน (Thevenin's Theorem)

2.4.1 ทฤษฎีเทวินิน

กล่าวไว้ว่า “วงจรเชิงเส้นสองขั้วใด ๆ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของแหล่งกำเนิด แรงดันอิสระอนุกรมกับตัวต้านทาน โดยที่แรงดันของแหล่งกำเนิดมีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจรระหว่างสองขั้วที่พิจารณา และความต้านทานมีค่าเท่ากับความต้านทานสมมูลระหว่างสองขั้วที่พิจารณา ซึ่งคำนวณในกรณีที่แหล่งกำเนิดอิสระทุกตัวไม่จ่ายกำลัง” (Alexander & Sadiku, 2009)[3] หรือกล่าวได้ว่าในวงจรไฟฟ้าเชิงเส้นสองขั้วใด ๆ สามารถยุบวงจรที่เหลือเพียงแหล่งจ่ายไฟหรือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งตัว และตัวต้านทานหนึ่งตัวต่อร่วมกันแบบอนุกรมได้



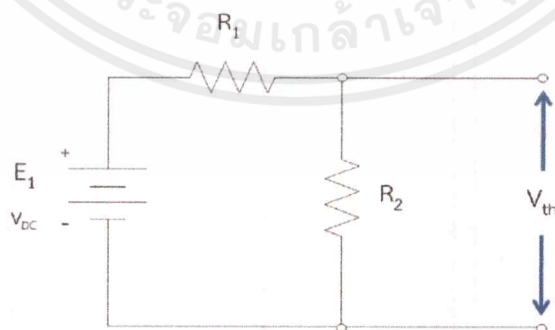
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin Equivalent Circuit)

2.4.2 หลักการทฤษฎีของเทวินิน

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลเทวินินจะมีการประยุกต์ใช้กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ควบคู่ไปกับหลักการทฤษฎีของเทวินินในการคำนวณ เป็นขั้นตอนดังนี้

1. การหาค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเทียบเท่าของเทวินิน

(Thevenin Equivalent Voltage Source: V_{th})



รูปที่ 2.8 วงจรไฟฟ้าในการหาค่าแรงดันเทวินิน (V_{th})

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเทวินิน(V_{th}) เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทาน R_2 จะได้แรงดันไฟฟ้าเทวินิน(V_{th}) ดังสมการ

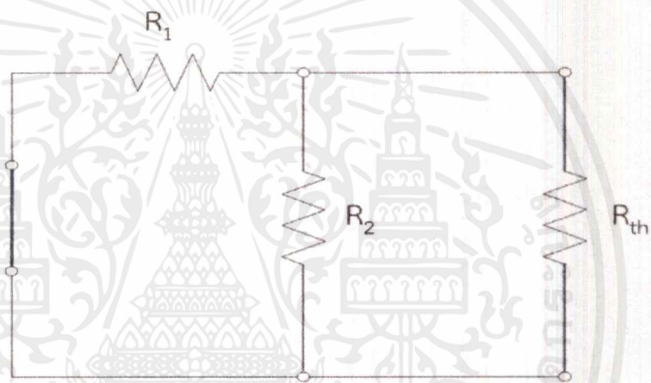
$$V_{th} = E \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อกระแส(I) เท่ากับ

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} \quad (2.4)$$

2. การหาค่าความต้านทานเทียบเท่าของเทวินิน

(Thevenin Equivalent Resistance: R_{th})

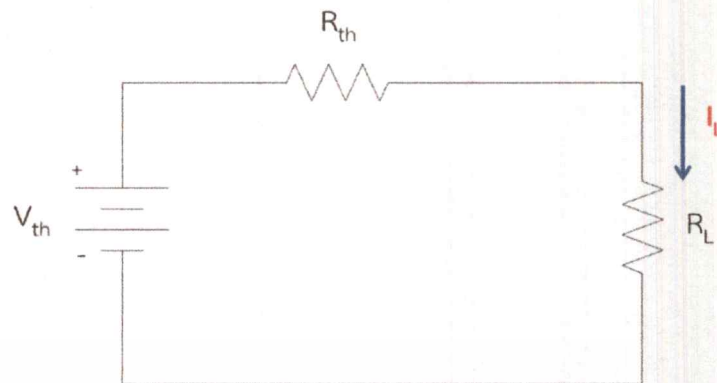


รูปที่ 2.9 วงจรไฟฟ้าในการหาค่าความต้านทานเทวินิน(R_{th})

การหาค่าความต้านทานเทวินิน(R_{th}) ทำได้โดยการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าความต้านทาน R_1 และความต้านทาน R_2 ต่อกันอยู่แบบขนาน ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความต้านทานเทวินิน(R_{th}) ได้ดังนี้

$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.5)$$

3. การหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL})



รูปที่ 2.10 วงจรไฟฟ้าในการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL})

ในวงจรสมมูลของเทวินิน

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) หาได้จากการนำค่าแรงดันเทวินิน(V_{th}) และค่าความต้านทานเทวินิน(R_{th}) มาเขียนเป็นวงจรดังรูปที่ 2.7 ใส่ความต้านทานโหลด(R_L) ดังรูปที่ 2.10 และทำการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ได้ดังสมการ

$$I_{RL} = \frac{V_{th}}{R_{th} + R_L} \quad (2.6)$$

บทที่ 3

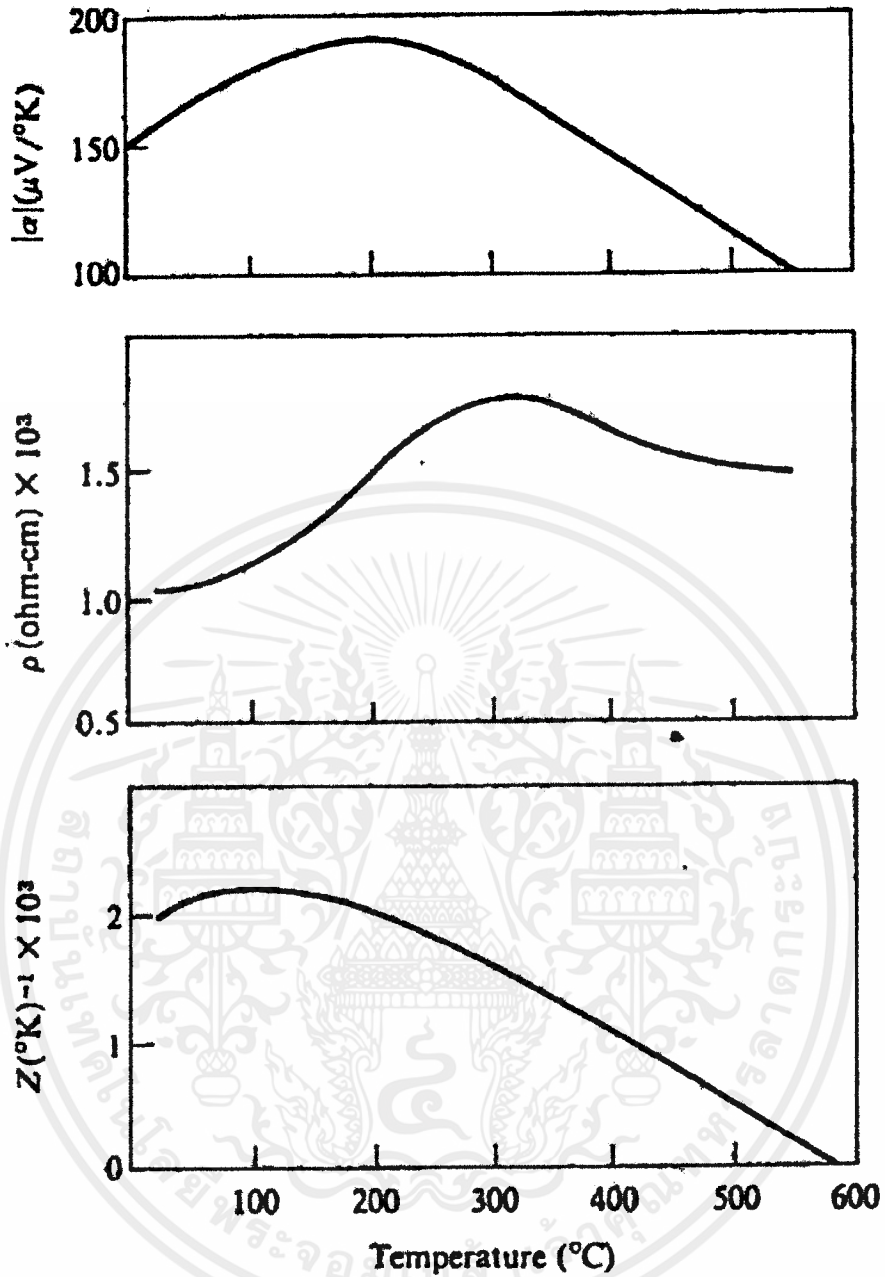
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 นี้เป็นการนำเสนอการดำเนินการในการศึกษาการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และการ Simulate แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่ายของตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งการออกแบบตัวกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator) จะศึกษาการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลของวัสดุ n-type คือ 75% Bi₂Te₃ ,25% Bi₂Se₃ และวัสดุ p-type คือ 25% Bi₂Te₃ ,75% Sb₂Te₃(1.75% excess Se) และ BiCuSeO

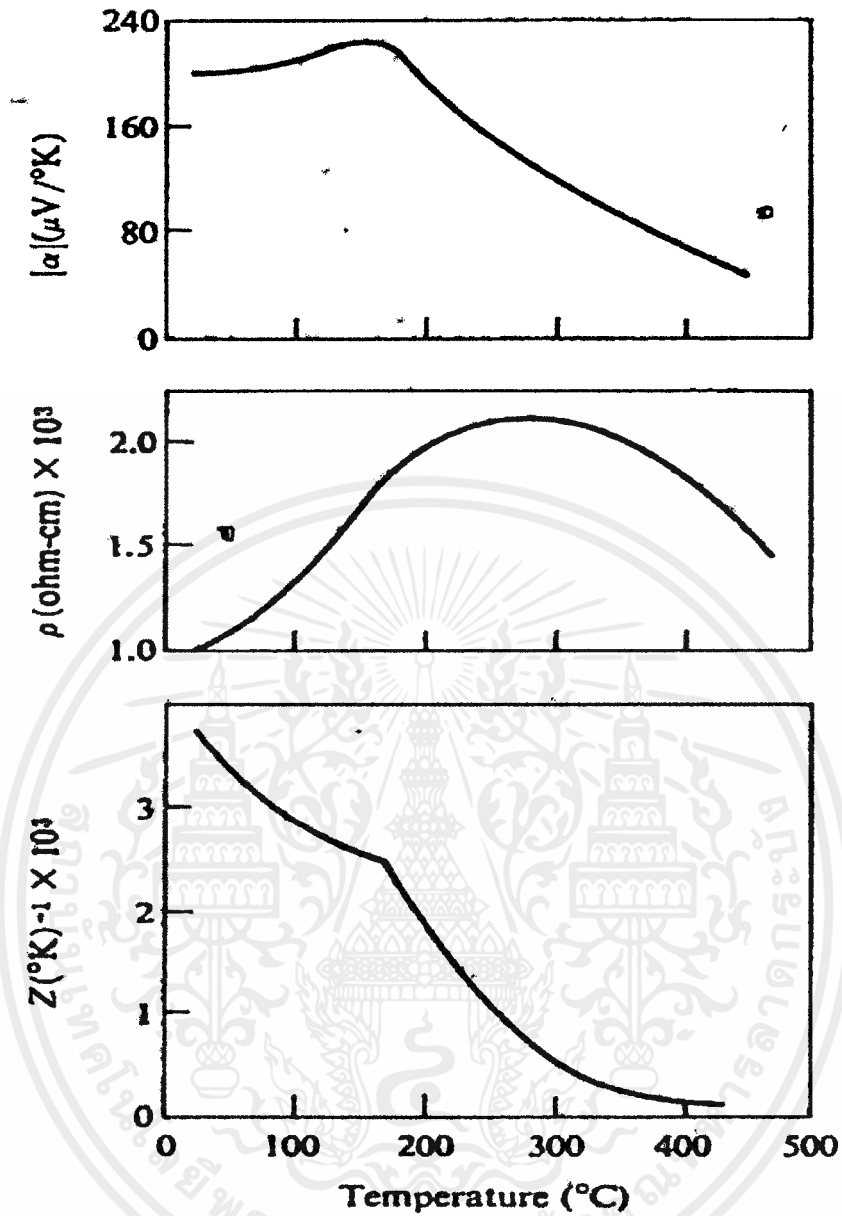
3.1 การออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

3.1.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

1. กำหนดเงื่อนไขให้รักษาความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง 2 ด้านของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยกำหนดให้ $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$ และ $\Delta T = 300^{\circ}\text{C}$
2. หาคคุณสมบัติของวัสดุได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบค(α) สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) และ Figure of merit(Z) เทียบกับอุณหภูมิ (T)
3. คำนวณค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด (λ_n, λ_p)
4. คำนวณหาค่า figure of merit สูงสุดของการต่อร่วมกันของวัสดุเหล่านี้ที่อุณหภูมิห้อง
5. ห้อัตราส่วน γ_n/γ_p ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
6. กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ($A_{n,p}$) และความยาวของวัสดุ($L_{n,p}$) เท่ากับ 1 ซม. เพื่อหา γ_n และ γ_p
7. คำนวณหาค่าความต้านทานภายใน (R)
8. คำนวณหาค่าการนำความร้อน (K)
9. คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (V_{oc})
10. คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าในจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp})
11. คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีค่าสูงสุด ($P_{o(mp)}$)
12. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า(Power density) หรืออัตราการจ่ายพลังงาน
13. คำนวณหาค่าความร้อนที่จ่ายเข้าไปที่รอยต่อร้อนของคู่วัสดุพี-เอ็น (q_h)
14. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต่อเข้าคู่กันในจุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดของอุปกรณ์ ($\eta_{(mp)}$)



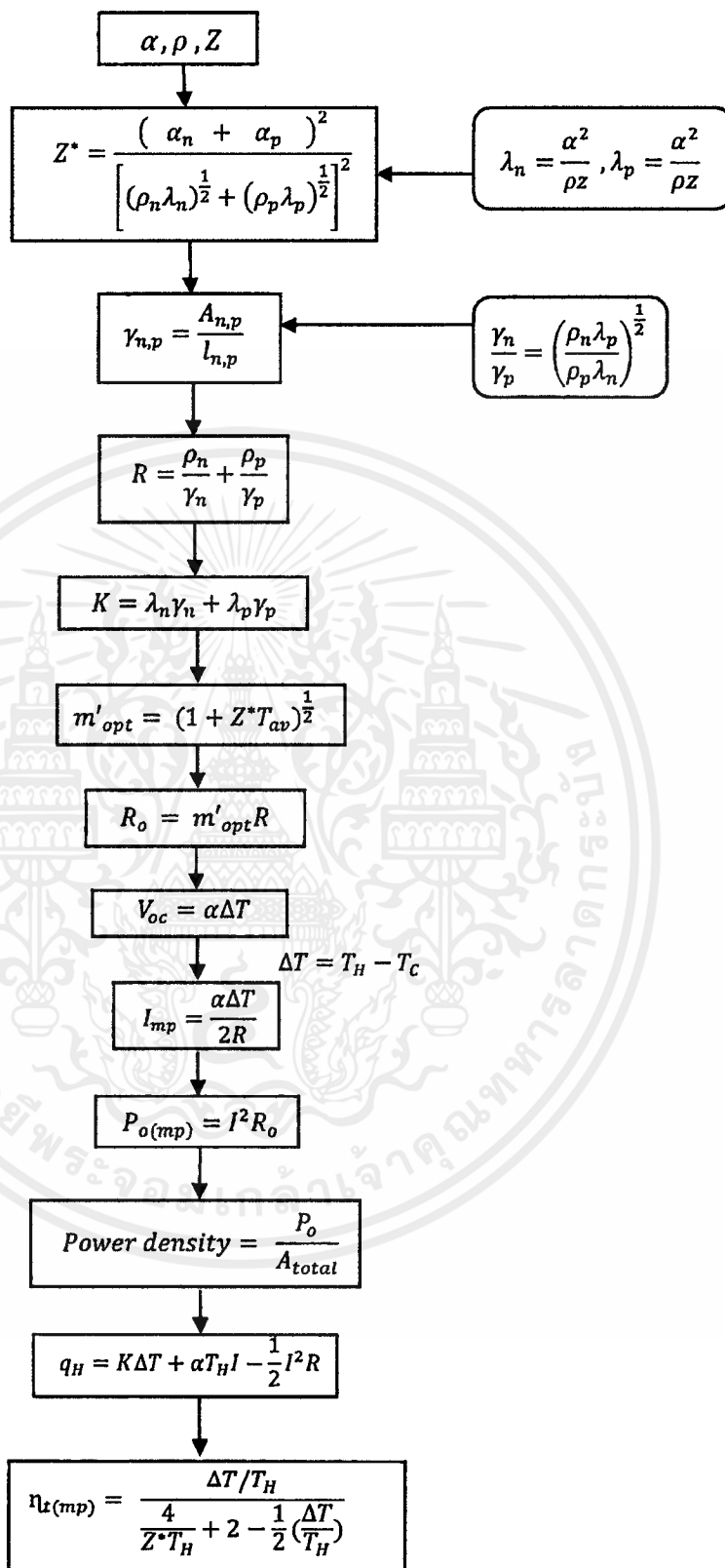
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบค(α) สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) และ Figure of merit(Z) ของ n-type 75%Bi₂Te₃, 25%Bi₂Se₃ เทียบกับอุณหภูมิ (T) [4]



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบค(α) สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) และ Figure of merit(Z) ของ p-type 25%Bi₂Te₃ ,75%Sb₂Te₃(1.75%excess Se) เทียบกับอุณหภูมิ (T) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 แผนผังขั้นตอนการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิเคราะห์ขนาดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

กำหนดให้ค่า V_n และ V_p ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อความยาวของวัสดุ ให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้ ที่อุณหภูมิ 300K

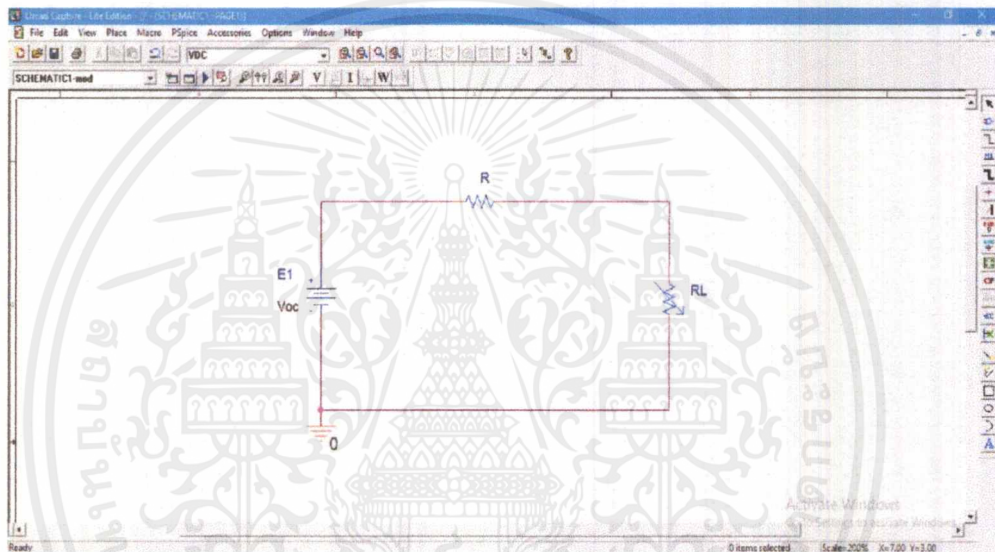
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์ขนาดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

V_n	V_p
1	0.25
1	0.50
1	0.75
0.25	1
0.50	1
0.75	1
1	1

3.3 การจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าของ TEG โดยใช้โปรแกรม Orcad

ขั้นตอนการจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าของ TEG โดยใช้โปรแกรม Orcad

1. ทำการเลือกช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) แต่ละช่วง เพื่อนำข้อมูลที่คำนวณได้ก่อนหน้ามาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า(V) กำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้า(I)
2. ทำการสร้างวงจรโดยใช้โปรแกรม Orcad เป็นโปรแกรมในการสร้างวงจร
3. ทำการสร้างวงจรสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก P-N 1 คู่ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง(V_{dc}) ตัวต้านทาน(R) และตัวต้านทานปรับค่าได้(R_L) และใช้ค่าความต้านทาน(R) และค่าแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) ที่คำนวณได้ก่อนหน้าใส่ลงในวงจร



รูปที่ 3.3 วงจรไฟฟ้าสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกพี-เอ็น 1 คู่

4. กำหนดค่าความต้านทานโหลด(R_L) ขึ้นมาเป็นตัวต้านทานแบบปรับค่าได้(Adjustable Resistor) ซึ่งจะทำการช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) ที่ถูกกำหนดขึ้นจากการคำนวณก่อนหน้า
5. เมื่อได้ค่ากำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ตามค่าความต้านทานโหลด(R_L) ที่กำหนด จะทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) สำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก P-N 1 คู่แล้ว

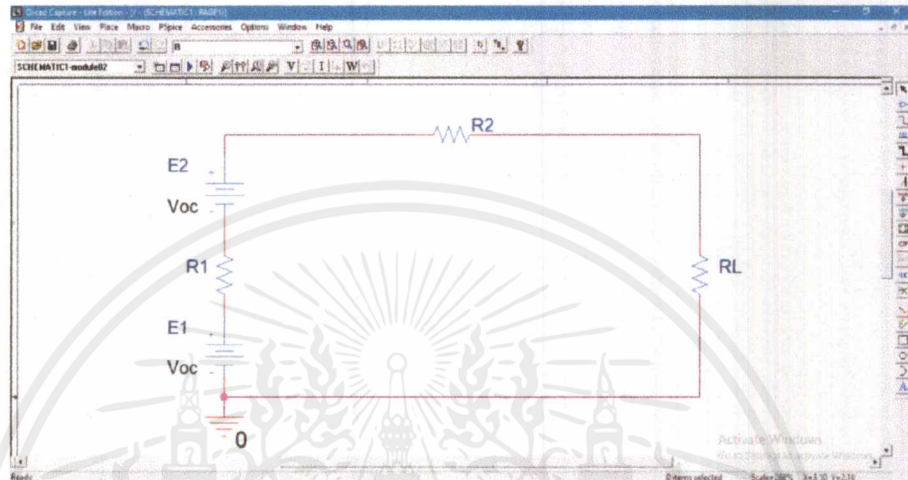
เงื่อนไขในการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) 2 กรณีคือ

- กรณีที่ 1 กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Maximum power transfer)

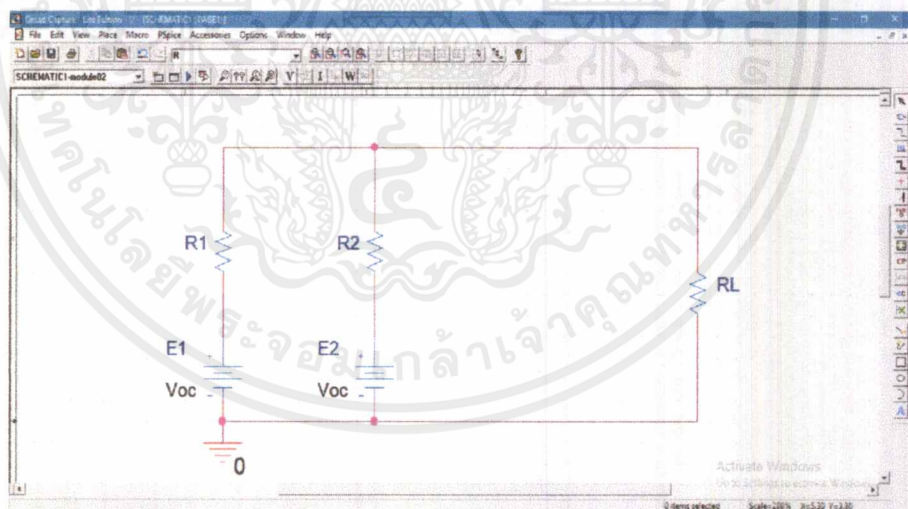
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2 กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L = R_0$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด(Maximum thermal efficiency)

6. ทำการสร้างวงจรโดยต่อวงจร 2 รูปแบบคือ วงจรแบบอนุกรม(Series Circuit) และวงจรแบบขนาน(Parallel Circuit) สำหรับจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N 2, 4, 8, 20 และ 30 คู่ ภายใต้เงื่อนไขทั้ง 2 กรณีดังกล่าว



(ก.)



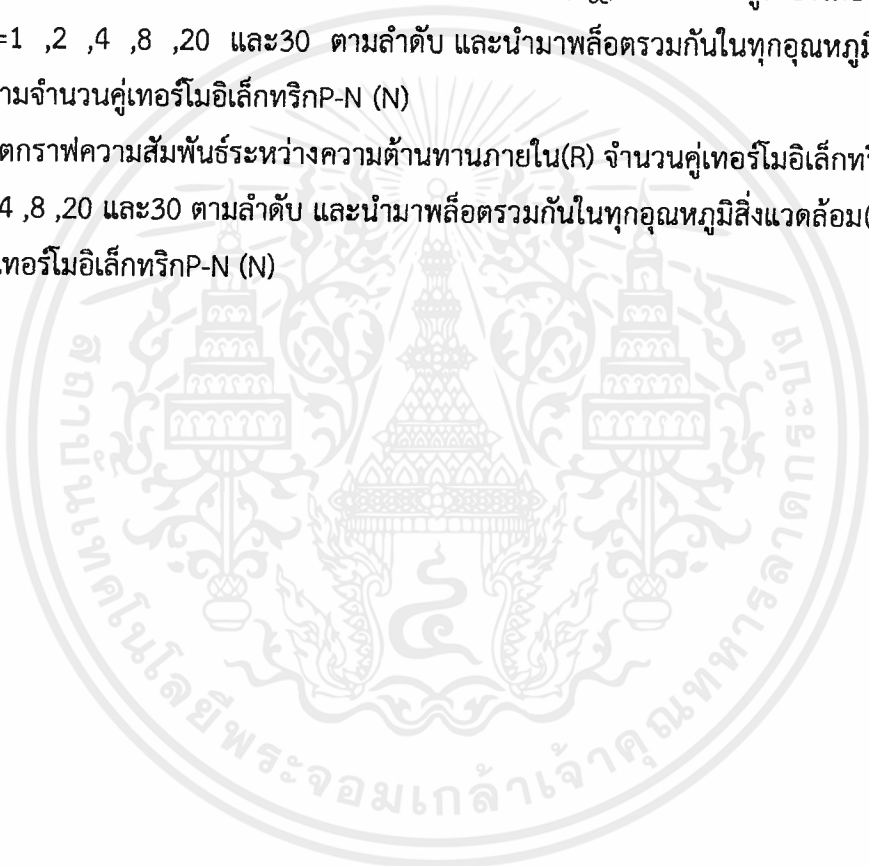
(ข.)

รูปที่ 3.4 (ก.) วงจรไฟฟ้าที่ต่อกันแบบอนุกรมที่ประกอบด้วยคู่พี-เอ็นจำนวน 2 คู่

(ข.) วงจรไฟฟ้าที่ต่อกันแบบขนานที่ประกอบด้วยคู่พี-เอ็นจำนวน 2 คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) กับกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) รวมกันในทุกอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดตามจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)
8. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) กับจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) โดยที่ $N=1, 2, 4, 8, 20$ และ30 ตามลำดับ และนำมาพล็อตรวมกันในทุกอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดตามจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)
9. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) กับจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) โดยที่ $N=1, 2, 4, 8, 20$ และ30 ตามลำดับ และนำมาพล็อตรวมกันในทุกอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) ทั้งหมดตามจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกPN(N)
10. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}) กับจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) โดยที่ $N=1, 2, 4, 8, 20$ และ30 ตามลำดับ และนำมาพล็อตรวมกันในทุกอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดตามจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)
11. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายใน(R) จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) โดยที่ $N=1, 2, 4, 8, 20$ และ30 ตามลำดับ และนำมาพล็อตรวมกันในทุกอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดตามจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

4.1.1 ผลจากการศึกษาการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลของวัสดุ n-type คือ 75% Bi₂Te₃, 25% Bi₂Se₃ และวัสดุ p-type คือ 25% Bi₂Te₃, 75% Sb₂Te₃(1.75% excess Se)

ตารางที่ 4.1 ตารางค่าอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}), ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o), ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}), ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ของวัสดุ n-type คือ 75% Bi₂Te₃, 25% Bi₂Se₃ และวัสดุ p-type คือ 25% Bi₂Te₃, 75% Sb₂Te₃(1.75% excess Se) ที่ต่อเข้าคู่กัน โดยกำหนดให้มี ΔT เท่ากับ 100°C

n-type		p-type	
75% Bi ₂ Te ₃ 25% Bi ₂ Se ₃		25% Bi ₂ Te ₃ 75% Sb ₂ Te ₃ (1.75% excess Se)	
$\Delta T = 100^\circ\text{C}$			
$T_{av}(^\circ\text{C})$	$R_o(\Omega)$	$V_{oc}(V)$	$I_{mp}(A)$
50	0.00302	0.0380	8.7
70	0.00297	0.0378	8.8
100	0.00324	0.0390	8.4
120	0.00345	0.0400	8.2
150	0.00388	0.0410	7.5
170	0.00408	0.0408	7.1
200	0.00414	0.0370	6.2

จากตารางที่ 4.1 เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 50°C–70°C จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 70°C–200°C จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o)ลดลง โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 200°C จะทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.00414 Ω และเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 50°C–70°C

จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด(V_{oc}) มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 70°C - 150°C จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด(V_{oc}) เพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 150°C - 200°C จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด(V_{oc}) ลดลงอีกครั้ง โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 150°C จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด(V_{oc}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.0410 V และเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย (T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 50°C - 70°C จะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 70°C - 200°C จะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ลดลง โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 70°C จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.8 A

ตารางที่ 4.2 ตารางค่าอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}), ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o), ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด(V_{oc}), ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ของวัสดุ n-type คือ 75% Bi_2Te_3 , 25% Bi_2Se_3 และวัสดุ p-type คือ 25% Bi_2Te_3 , 75% Sb_2Te_3 (1.75% excess Se) ที่ต่อเข้าคู่กัน โดยกำหนดให้มี ΔT เท่ากับ 300°C

n-type		p-type	
75% Bi_2Te_3 25% Bi_2Se_3		25% Bi_2Te_3 75% Sb_2Te_3 (1.75% excess Se)	
$\Delta T = 300^{\circ}\text{C}$			
$T_{av}(^{\circ}\text{C})$	$R_o(\Omega)$	$V_{oc}(\text{V})$	$I_{mp}(\text{A})$
150	0.00388	0.123	22.5
177	0.00397	0.128	22.8
200	0.00414	0.111	18.6
250	0.00457	0.101	14.6
300	0.00495	0.089	11.0
350	0.00505	0.075	8.6
400	0.00478	0.065	7.5

จากตารางที่ 4.2 เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 150°C - 350°C จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 350°C - 400°C จะส่งผลทำให้ค่า

ความต้านทานเอาต์พุต(R_o) ลดลง โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 350°C จะทำให้ค่าต้านทานเอาต์พุต (R_o) มีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.00505\ \Omega$ และเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 150°C – 177°C จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(V_{oc}) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 177°C – 400°C จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(V_{oc}) ลดลง โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(V_{oc}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.128\ \text{V}$ และเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 150°C – 177°C จะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย (T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 177°C – 400°C จะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ลดลง โดยอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ $22.8\ \text{A}$



4.1.2 ผลจากการศึกษาการออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลของวัสดุ n-type คือ 75% Bi₂Te₃, 25% Bi₂Se₃ และวัสดุ p-type คือ BiCuSeO

ตารางที่ 4.3 ตารางค่าอุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}), ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o), ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด(V_{oc}), ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) ของวัสดุ n-type คือ 75% Bi₂Te₃, 25% Bi₂Se₃ และวัสดุ p-type คือ BiCuSeO ที่ต่อเข้าคู่กัน โดยกำหนดให้มี ΔT เท่ากับ 300°C

n-type		p-type	
75% Bi ₂ Te ₃ 25% Bi ₂ Se ₃		BiCuSeO	
$\Delta T = 300^\circ\text{C}$			
$T_{av}(^\circ\text{C})$	$R_o(\Omega)$	$V_{oc}(V)$	$I_{mp}(A)$
150	0.01223	0.177	7.60
177	0.01096	0.176	8.60
200	0.01227	0.172	7.50
250	0.01209	0.170	7.70
300	0.01129	0.161	8.10
350	0.00993	0.149	8.80
400	0.00849	0.141	9.90
450	0.00794	0.137	10.60
500	0.00752	0.130	10.88
550	0.00763	0.131	10.90
600	0.00805	0.134	10.50

จากตารางที่ 4.3 เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o) มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องแค่เพียงช่วง 250°C–500°C โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 200°C จะทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.01227 Ω และที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 500°C จะทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.00752 Ω และเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้นจาก 150°C–500°C จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด(V_{oc}) มีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้น

จาก 500°C-600°C จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}) เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 150°C จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.177 V และเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแค่เพียงช่วง 250°C-550°C โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 550°C จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.90 A และที่อุณหภูมิเฉลี่ย(T_{av}) เท่ากับ 200°C จะทำให้ค่าความต้านทานเอาต์พุต(R_o) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 7.50 A

4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ 4.4 ตารางค่าความต้านทานภายใน(R) ,กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม(I^*) ,ค่าการนำความร้อน(K) และ ความร้อนต้านเย็น(q_c) ภายใต้เงื่อนไขของ Y_n และ Y_p ที่อุณหภูมิ 300K

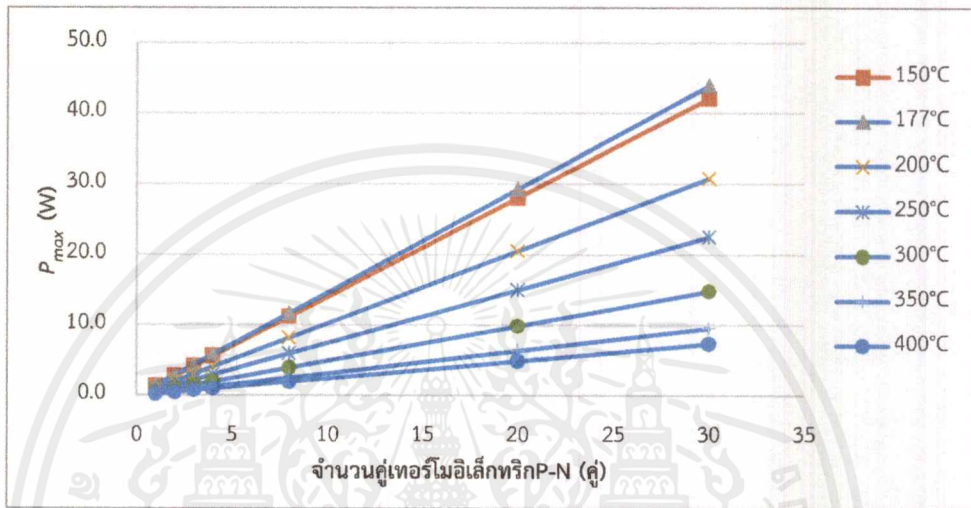
$Y_n(\text{cm})$	$Y_p(\text{cm})$	$R(\Omega)$	$I^*(\text{A})$	$K(\text{Watt}/^\circ\text{C})$	$Q_c (\text{Watt})$
1	0.25	0.0050	11.86	0.0162	-0.0090
1	0.50	0.0030	19.58	0.0194	0.3805
1	0.75	0.0024	25.01	0.0226	0.6027
0.25	1	0.0052	11.38	0.0161	-0.0397
0.50	1	0.0031	19.14	0.0193	0.3510
0.75	1	0.0024	24.77	0.0226	0.5863
1	1	0.0020	29.04	0.0258	0.7226

จากตารางที่ 4.4 พบว่าขนาดของวัสดุที่ใช้มีผลต่อการบีบความร้อนในรอยต่อต้านเย็น(q_c) ขนาดที่ต่างกันมากขึ้นจะมีค่าความต้านทานภายใน(R) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม(I^*) และค่าการนำความร้อน(K) เกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้การบีบความร้อนจากรอยต่อต้านเย็น(q_c) เกิดขึ้นได้น้อยเช่นกัน และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีขนาดที่เท่ากันจะมีค่าความต้านทานภายใน(R)ลดลง ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม(I^*) และค่าการนำความร้อน(K) เกิดเพิ่มขึ้น การบีบความร้อนจากรอยต่อต้านเย็น(q_c) จึงเพิ่มขึ้นสูงสุด ดังนั้นจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 ชี้บอกได้ว่า คุณสมบัติในการบีบความร้อนจากรอยต่อต้านเย็น(q_c) ทำงานได้ดีและใช้กระแสไฟฟ้าสูง เมื่อวัสดุทั้ง p type และ n type มีขนาดเท่ากัน

4.3 ผลของการจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าของ TEG โดยใช้โปรแกรม Orcad

4.3.1 ผลของการจำลองการทำงานเมื่อต่อแบบอนุกรม

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลของวัสดุ n-type คือ 75% Bi₂Te₃, 25% Bi₂Se₃ และวัสดุ p-type คือ 25% Bi₂Te₃, 75% Sb₂Te₃(1.75% excess Se) ในสภาวะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ต่อคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ร่วมกันแบบอนุกรม

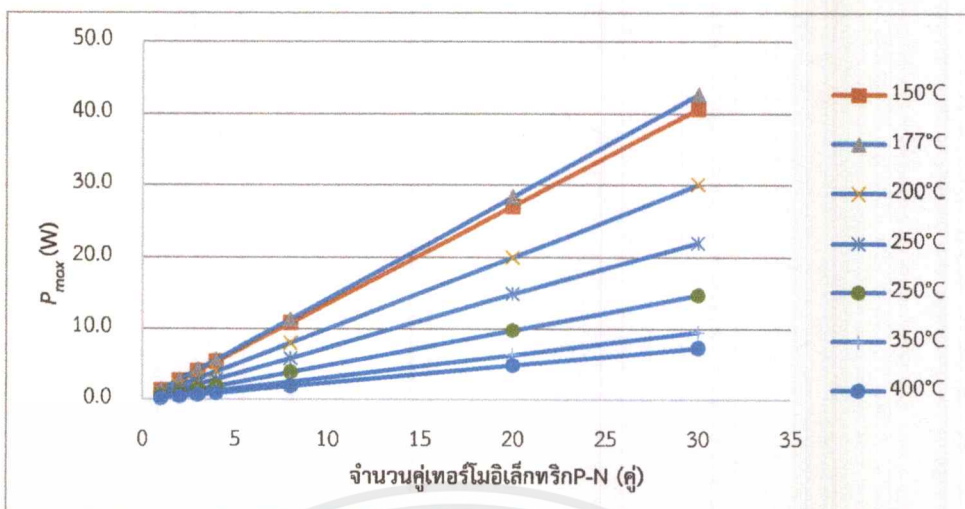


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$)

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$)

อุณหภูมิ(°C)	สมการเส้นตรง
150	$y = 1.401x + 6E-05$
177	$y = 1.463x - 0.0009$
200	$y = 1.0267x + 0.0005$
250	$y = 0.75x + 0.0002$
300	$y = 0.495x + 0.0002$
350	$y = 0.3196x - 5E-05$
400	$y = 0.2456x + 5E-06$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) และจำนวนคู่อิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_O$)

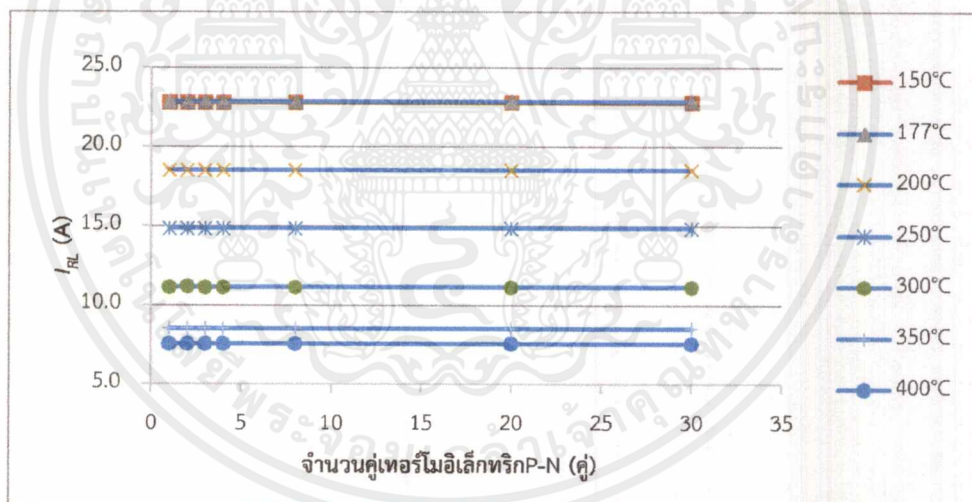
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่อิเล็กทริก P-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_O$)

อุณหภูมิ(°C)	สมการเส้นตรง
150	$y = 1.3557x + 0.0013$
177	$y = 1.4192x - 0.0008$
200	$y = 1.0008x - 0.0015$
250	$y = 0.7365x + 0.0007$
300	$y = 0.4894x + 0.0005$
350	$y = 0.3181x - 0.0001$
400	$y = 0.245x + 2E-05$

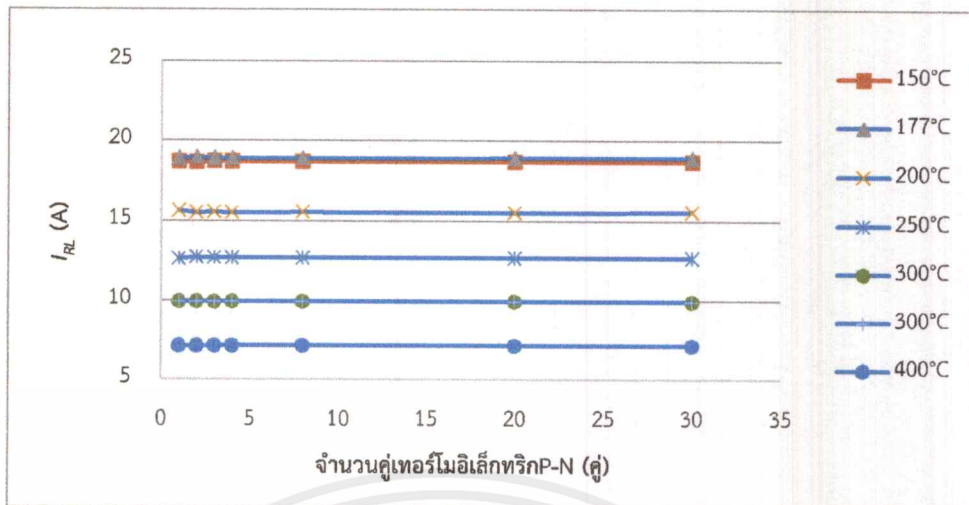
จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Maximum power transfer) ภายใต้อุณหภูมิที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อจำนวนคู่อิเล็กทริก P-N (N) มากขึ้น กำลังไฟฟ้า(P) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่อิเล็กทริก P-

N (N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.5 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) ที่จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N 30 คู่เท่ากับ 43.89 วัตต์

และจากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.2 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม ($R_L = R_O$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (Maximum thermal efficiency) ภายในสภาวะเช่นเดียวกันคือที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) มากขึ้น กำลังไฟฟ้า (P) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.6 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) เช่นเดียวกันกับกรณีที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L = R$) เท่ากับ 42.58 วัตต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเพียงเล็กน้อย



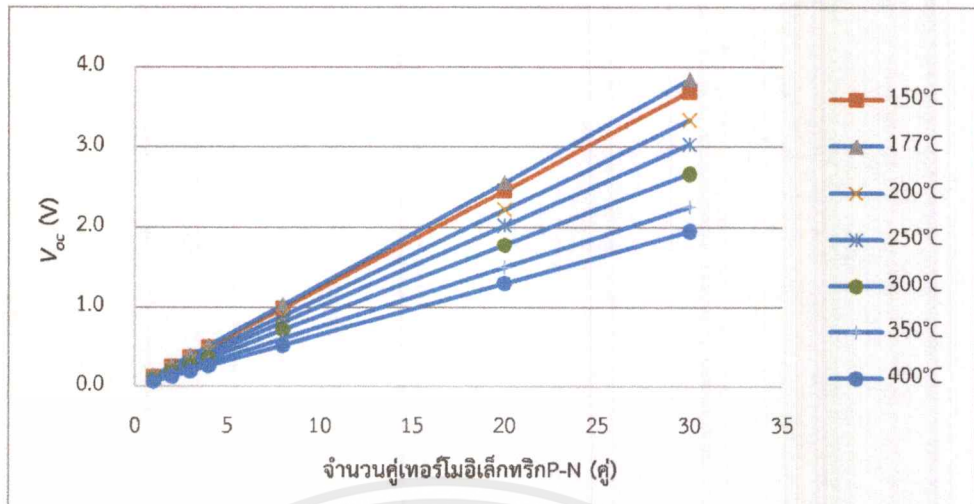
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{sc}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L = R$)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม ($R_L = R_O$)

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.3 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L = R$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power transfer) ภายในสภาวะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C โดยแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) กระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) มีค่าคงที่ แม้จะมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) ก็ตาม และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.3 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) สูงสุดเท่ากับ 22.86 แอมแปร์

และจากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.4 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม ($R_L = R_O$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (Maximum thermal efficiency) ภายในสภาวะเช่นเดียวกันคือที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C โดยแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) กระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) มีค่าคงที่ แม้จะมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) ก็ตาม และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) สูงสุดเช่นเดียวกับกรณีที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L = R$) เท่ากับ 18.96 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเพียงเล็กน้อย จึงแสดงให้เห็นว่าในการต่อวงจรร่วมกันแบบอนุกรม กระแสจะมีค่าคงที่ทั่วทั้งวงจรไม่ขึ้นกับจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N)



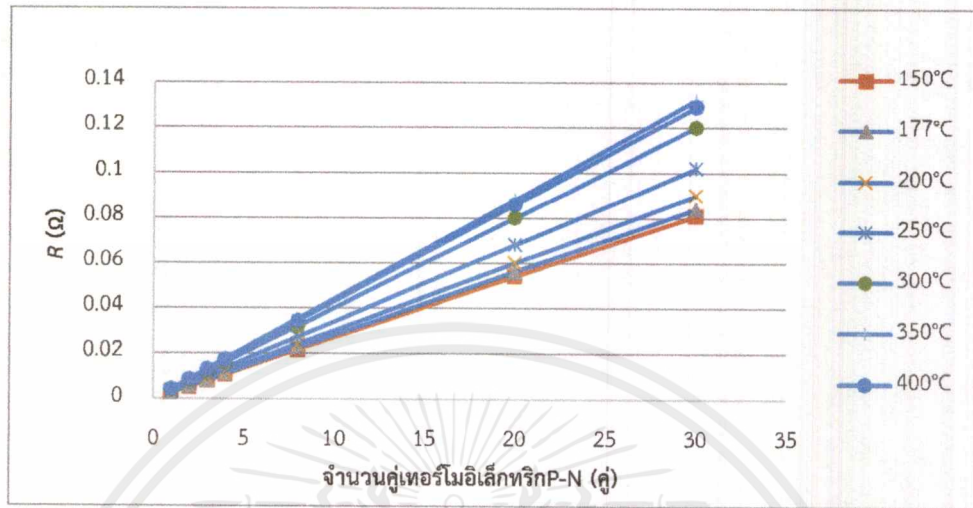
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่แรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) ในแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ($^{\circ}C$)	สมการเส้นตรง
150	$y = 0.123x$
177	$y = 0.128x + 4E-16$
200	$y = 0.111x$
250	$y = 0.101x + 4E-16$
300	$y = 0.089x$
350	$y = 0.075x$
400	$y = 0.065x$

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.5 ภายในสภาวะที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ $300^{\circ}C$ ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ $150^{\circ}C$, $177^{\circ}C$, $200^{\circ}C$, $250^{\circ}C$, $300^{\circ}C$, $350^{\circ}C$, $400^{\circ}C$ ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) มากขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.7 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ $177^{\circ}C$ จะมีค่าแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) สูงสุด ที่จำนวนคู่เทอร์โม

เล็กทรอนิกส์ P-N (N) 30 คู่เท่ากับ 3.84 วัตต์ แสดงให้เห็นว่าในการต่อวงจรร่วมกันแบบอนุกรม ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) มีค่าเพิ่มขึ้น



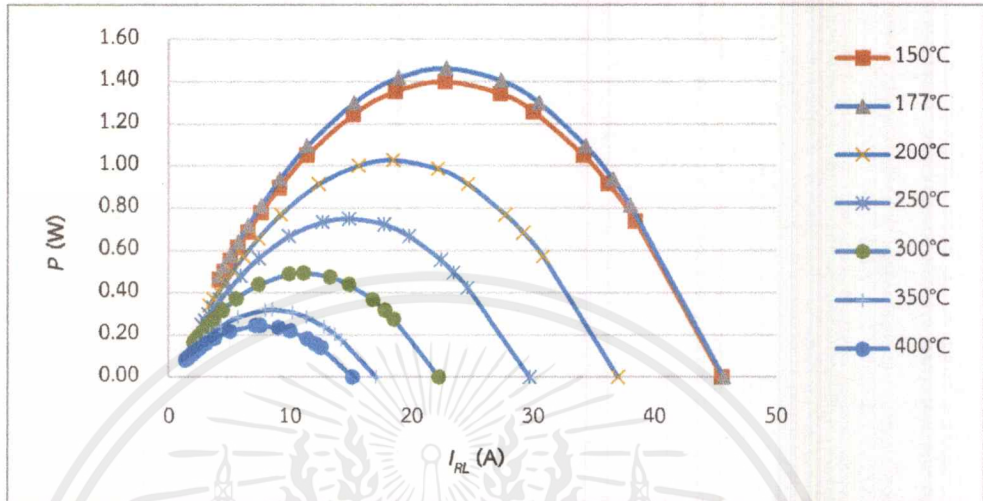
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน(R) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N)

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N ที่ความต้านทาน(R) ในแต่ละอุณหภูมิ

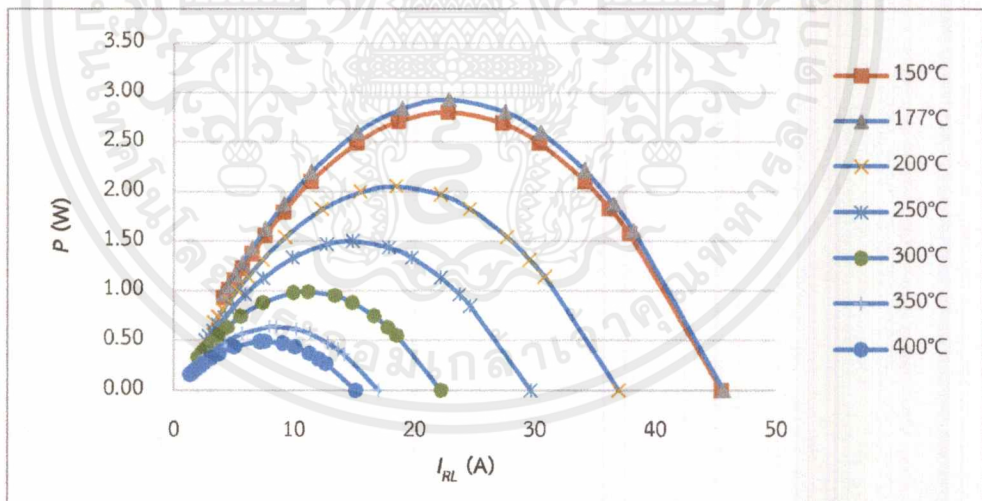
อุณหภูมิ(°C)	สมการเส้นตรง
150	$y = 0.0027x$
177	$y = 0.0028x$
200	$y = 0.003x + 1E-17$
250	$y = 0.0034x + 1E-17$
300	$y = 0.004x + 1E-17$
350	$y = 0.0044x + 1E-17$
400	$y = 0.0043x$

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6 ภายในสภาวะที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) มากขึ้น ค่าความต้านทานภายใน (R) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) โดยมีความสัมพันธ์ของ

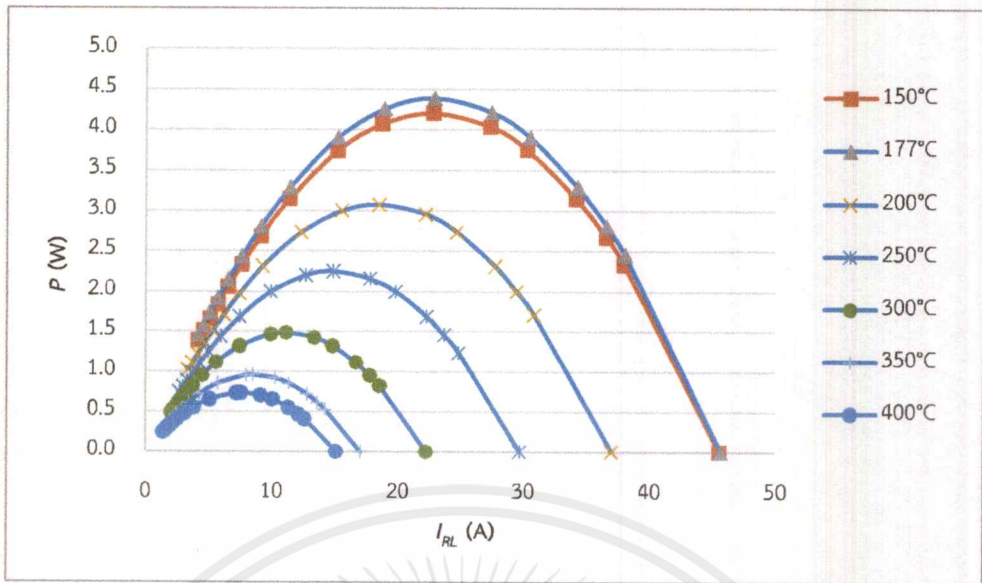
จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.8 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เท่ากับ 350°C จะมีค่าความต้านทานภายใน (R) สูงสุด ที่จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) 30 คู่เท่ากับ 0.132 โอห์ม



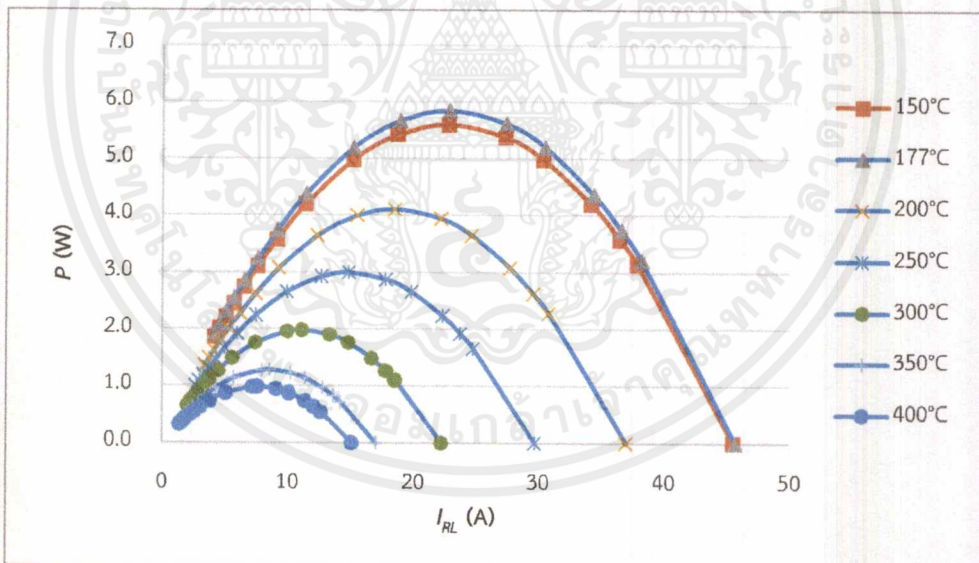
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N จำนวน 1 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม



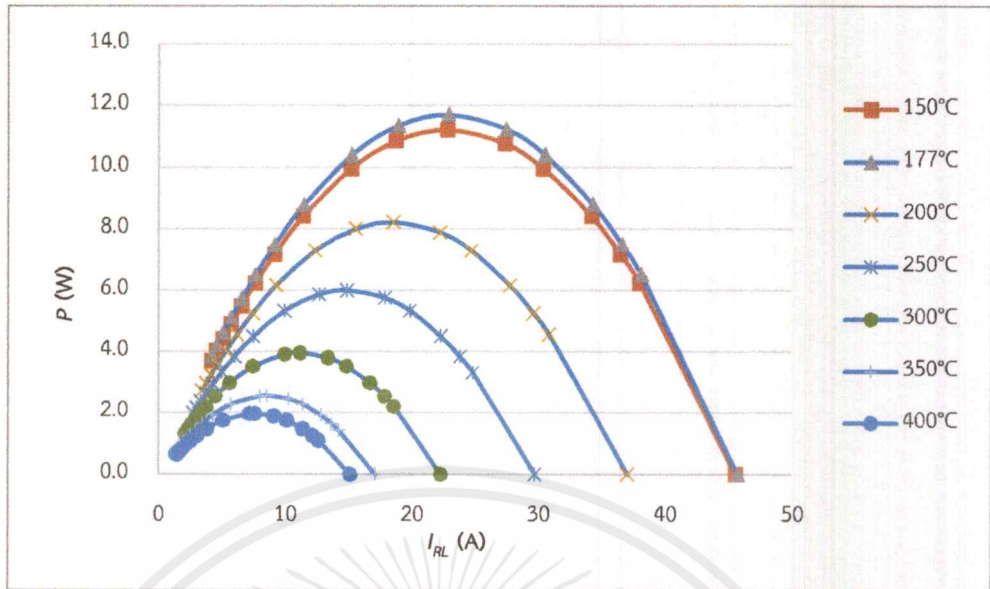
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N จำนวน 2 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม



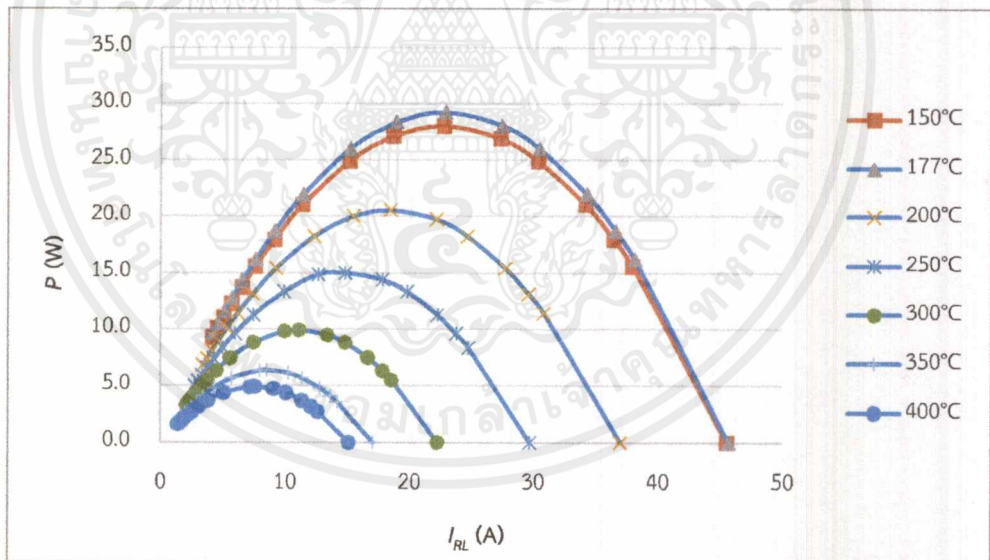
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่ออร์โมอิเล็กทรอนิกส์P-N จำนวน 3 คู่ ต่อรวมกันแบบอนุกรม



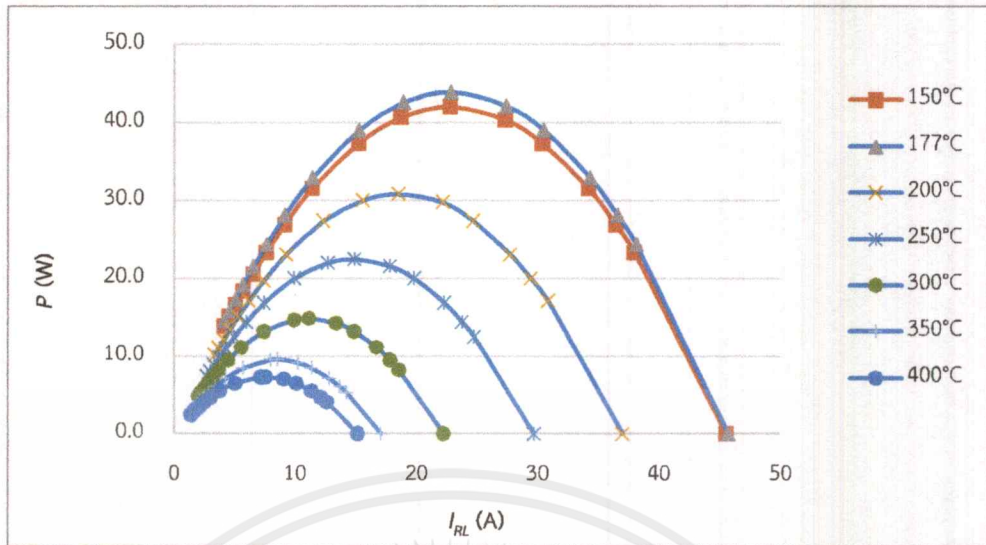
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่ออร์โมอิเล็กทรอนิกส์P-N จำนวน 4 คู่ ต่อรวมกันแบบอนุกรม



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 8 คู่ ต่อรวมกันแบบอนุกรม



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 20 คู่ ต่อรวมกันแบบอนุกรม

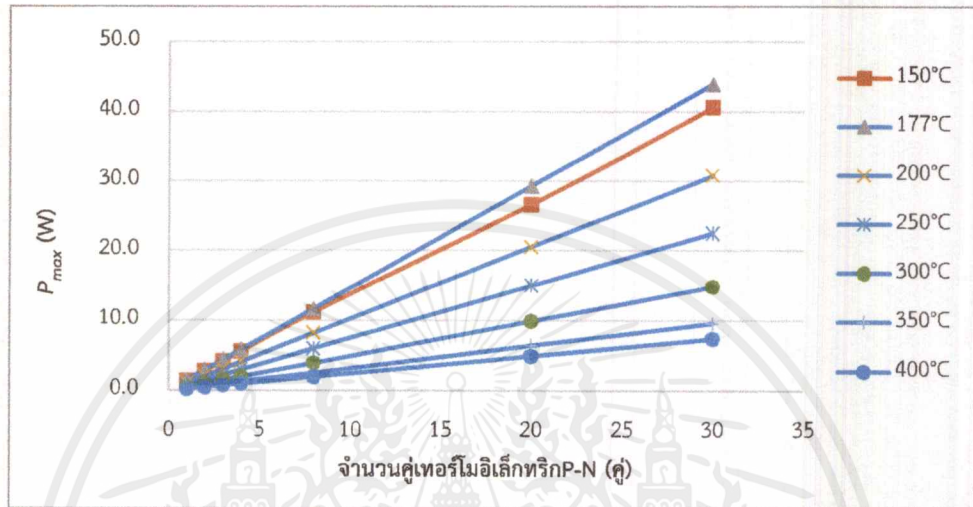


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคูเทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 30 คู่ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.7-4.13 ภายในสภาวะที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) เพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้า(P) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม จนกระทั่งกำลังไฟฟ้า(P) เพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ค่ากำลังไฟฟ้านิ่งจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) เพิ่มขึ้น กราฟจะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดมีลักษณะแนวโน้มเป็นไปดังกราฟในรูปที่ 4.7-4.13 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด(P_{max}) มากที่สุด และเป็นเช่นนี้ในทุก ๆ จำนวนคูเทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) ที่เพิ่มขึ้นด้วย

4.3.2 ผลของการจำลองการทำงานเมื่อต่อแบบขนาน

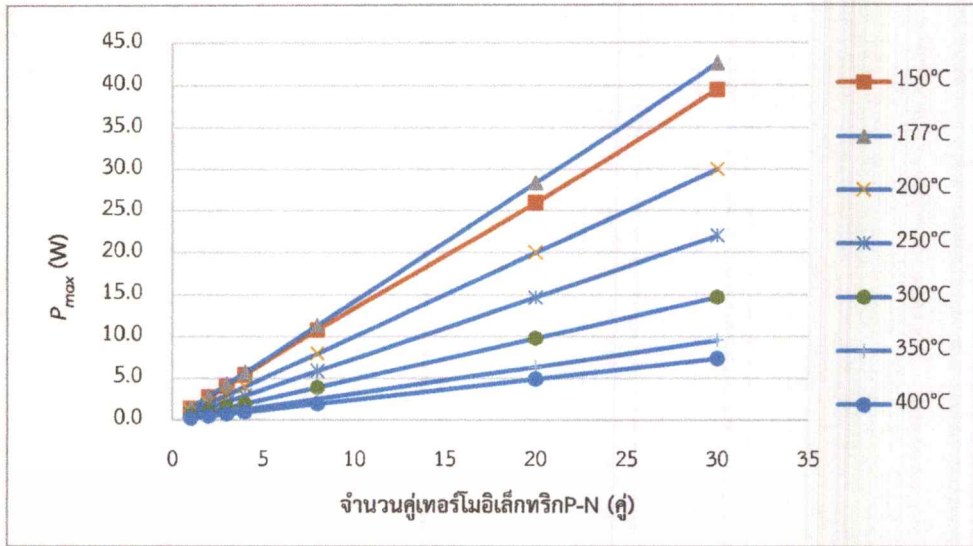
เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลของวัสดุ n-type คือ 75% Bi₂Te₃, 25% Bi₂Se₃ และวัสดุ p-type คือ 25% Bi₂Te₃, 75% Sb₂Te₃(1.75% excess Se) ในสภาวะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ต่อคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ร่วมกันแบบขนาน



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$)

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$)

อุณหภูมิ(C)	สมการเส้นตรง
150	$y = 1.3418x + 0.1691$
177	$y = 1.463x - 0.0009$
200	$y = 1.0267x + 0.0005$
250	$y = 0.75x + 3E-05$
300	$y = 0.495x + 0.0002$
350	$y = 0.3196x - 5E-05$
400	$y = 0.2456x - 2E-05$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม ($R_L = R_O$)

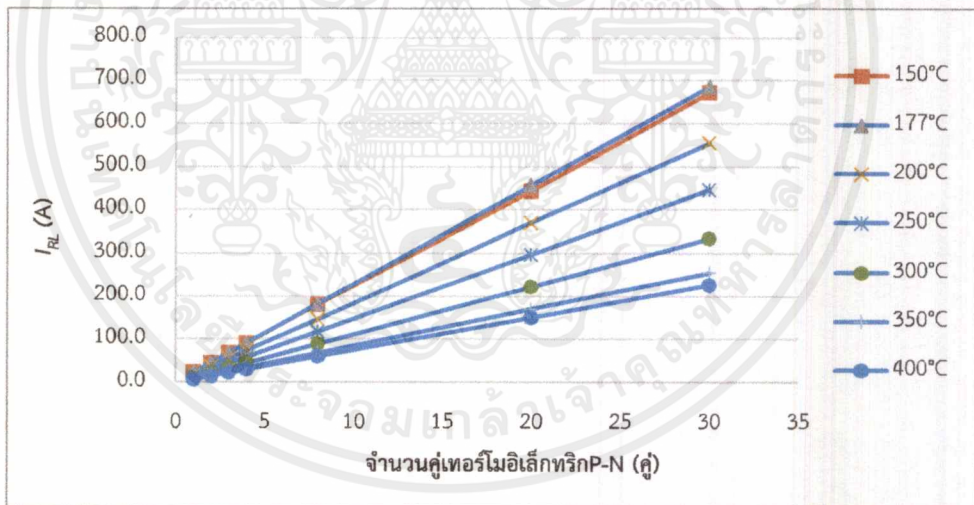
ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม ($R_L = R_O$)

อุณหภูมิ (C)	สมการเส้นตรง
150	$y = 1.3074x + 0.1354$
177	$y = 1.4194x - 0.0042$
200	$y = 1.0007x - 0.0028$
250	$y = 0.7339x - 0.0004$
300	$y = 0.4896x - 0.001$
350	$y = 0.3181x + 0.0002$
400	$y = 0.245x - 0.0002$

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.14 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L = R$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power transfer) ภายในสภาวะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) มากขึ้น กำลังไฟฟ้า (P) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก

PN(N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.9 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.14 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) ที่จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N 30 คู่เท่ากับ 43.89 วัตต์

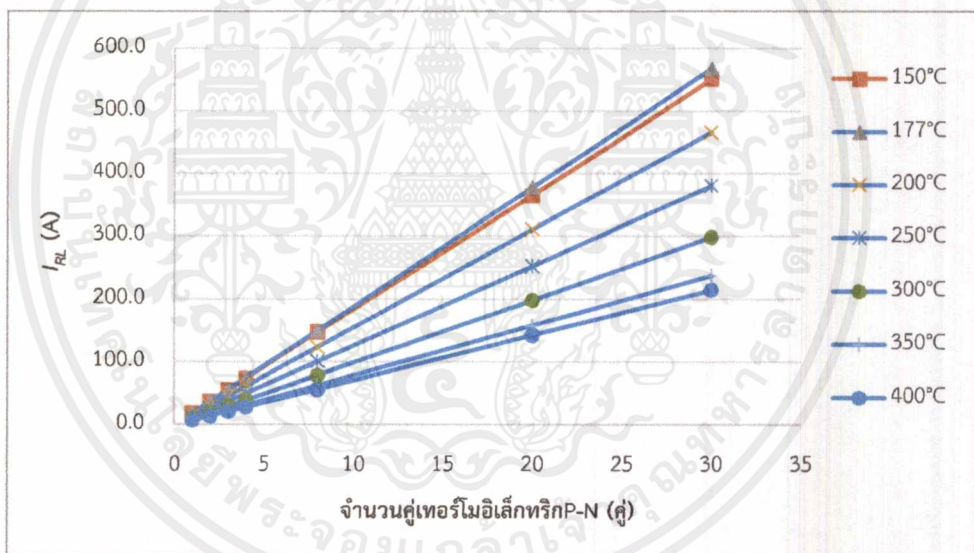
และจากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.15 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L = R_O$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด(Maximum thermal efficiency) ภายในสถานะเช่นเดียวกันคือที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) มากขึ้น กำลังไฟฟ้า(P) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.10 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.15 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) เช่นเดียวกันกับกรณีที่มีความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L = R$) เท่ากับ 42.59 วัตต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L = R$)

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L = R$)

อุณหภูมิ (C)	สมการเส้นตรง
150	$y = 22.308x + 0.9791$
177	$y = 22.855x + 0.0361$
200	$y = 18.502x - 0.1656$
250	$y = 14.872x - 0.1825$
300	$y = 11.137x - 0.0449$
350	$y = 8.5158x + 0.0299$
400	$y = 7.5682x - 0.1075$



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด (I_{RL}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) กำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม ($R_L = R_0$)

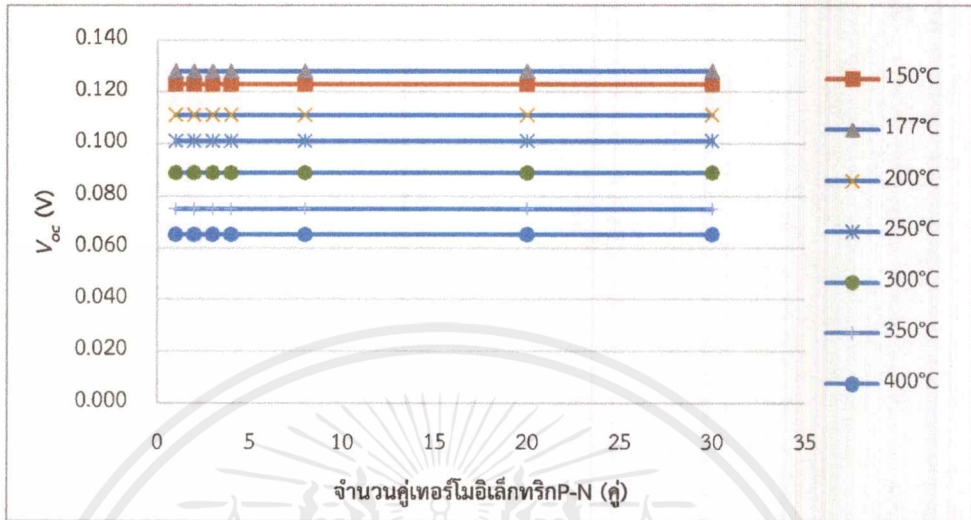
ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L = R_O$)

อุณหภูมิ(C)	สมการเส้นตรง
150	$y = 18.307x + 0.9542$
177	$y = 18.923x - 0.2059$
200	$y = 15.55x - 0.1436$
250	$y = 12.682x - 0.0575$
300	$y = 9.9427x - 0.0509$
350	$y = 7.9387x + 0.0205$
400	$y = 7.1667x - 0.0707$

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.16 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Maximum power transfer) ภายในสถานะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) มากขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.11 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.16 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) สูงสุด ที่จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N 30 คู่เท่ากับ 685.7 แอมแปร์

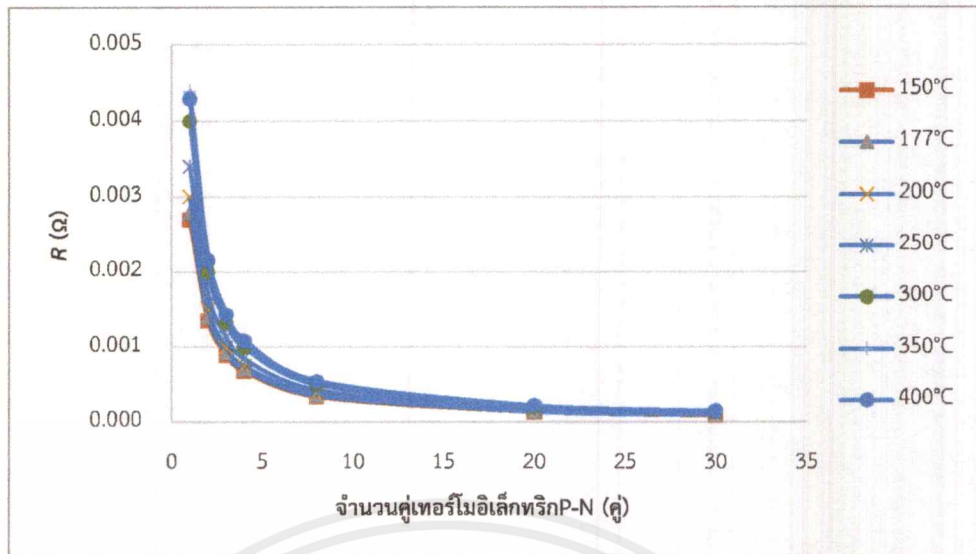
และจากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.17 กรณีกำหนดให้ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม($R_L=R_O$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด(Maximum thermal efficiency) ภายในสถานะเช่นเดียวกันคือที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) มากขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) จะเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.12 และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.17 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL})

สูงสุด เช่นเดียวกับกับกรณีที่ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L=R$) เท่ากับ 568 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N)

กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.18 ภายในสภาวะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C โดยแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) แรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) มีค่าคงที่ แม้มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) ก็ตาม และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.18 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) สูงสุดเท่ากับ 0.128 โวลต์



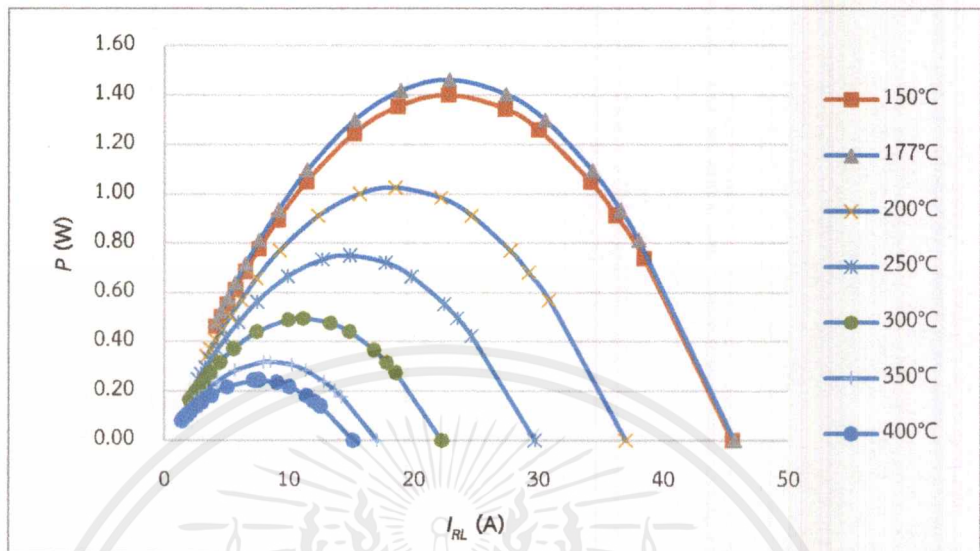
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน(R) และจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N)

ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N ที่ความต้านทาน(R) ในแต่ละอุณหภูมิ

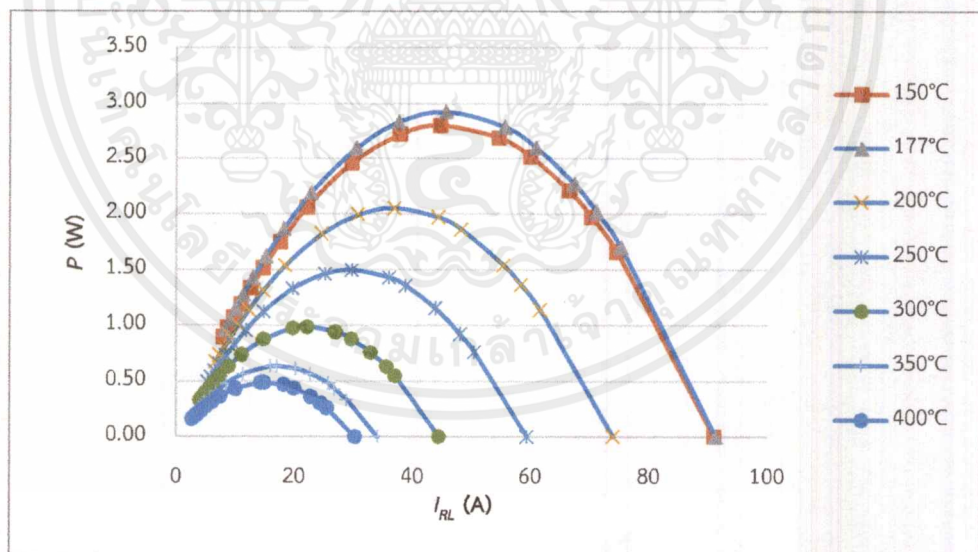
อุณหภูมิ(C)	สมการเส้นตรง
150	$y = -6E-05x + 0.0014$
177	$y = -6E-05x + 0.0015$
200	$y = -6E-05x + 0.0016$
250	$y = -7E-05x + 0.0018$
300	$y = -8E-05x + 0.0021$
350	$y = -9E-05x + 0.0023$
400	$y = -9E-05x + 0.0023$

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.19 ภายในสถานะที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N(N) มากขึ้น ค่าความต้านทานภายใน(R) จะลดลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลเป็นจำนวนเท่าของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกPN(N) โดยมีความสัมพันธ์ของจำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) เป็นไปตามตารางที่ 4.13 และเมื่อเทียบอุณหภูมิ

สิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดดังรูปที่ 4.19 พบว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 350°C จะมีค่าความต้านทานภายใน(R) สูงสุด ที่จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N (N) 1 คู่เท่ากับ 0.0044 โอห์ม

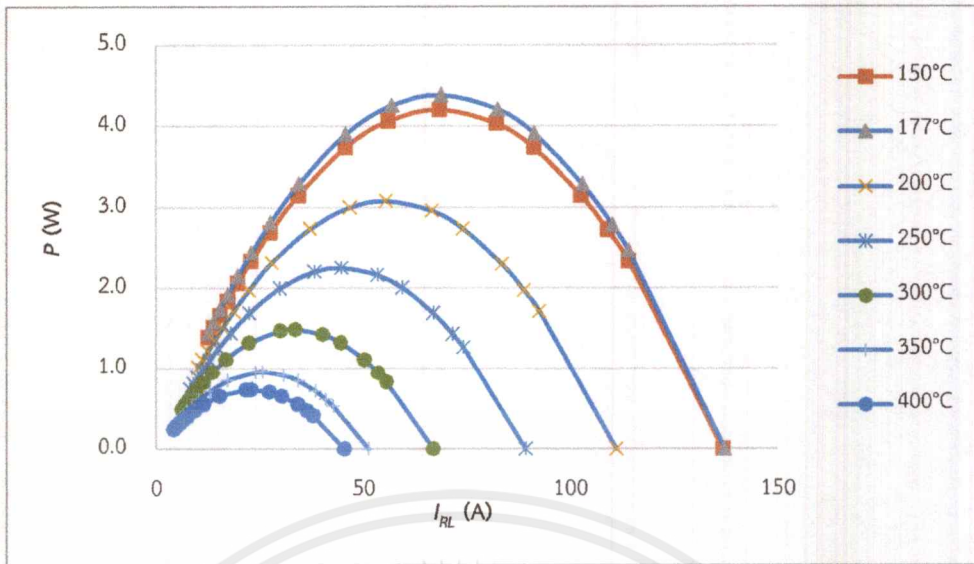


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N จำนวน 1 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน

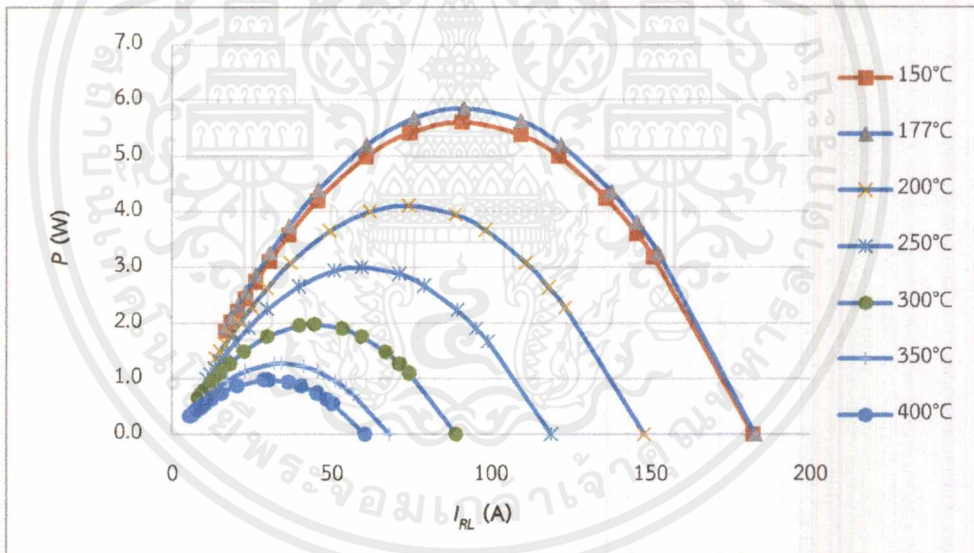


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริก P-N จำนวน 2 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน

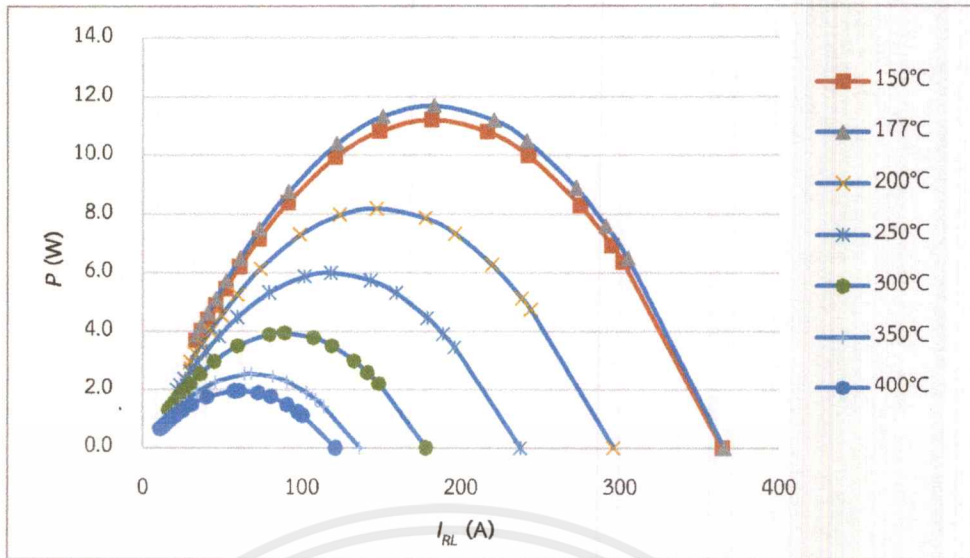
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



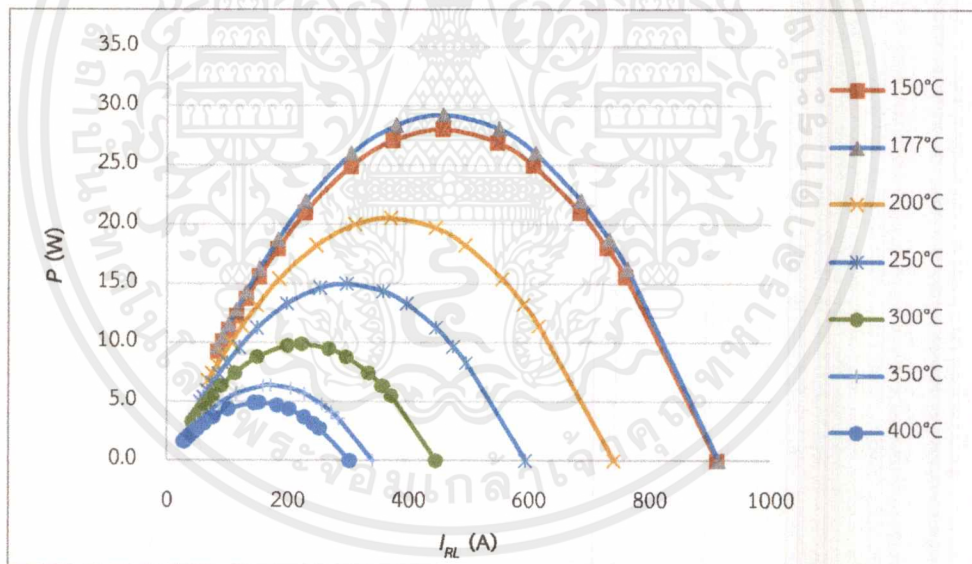
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคูเทออร์โมอิเล็กทรอนิกส์P-N จำนวน 3 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคูเทออร์โมอิเล็กทรอนิกส์P-N จำนวน 4 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน

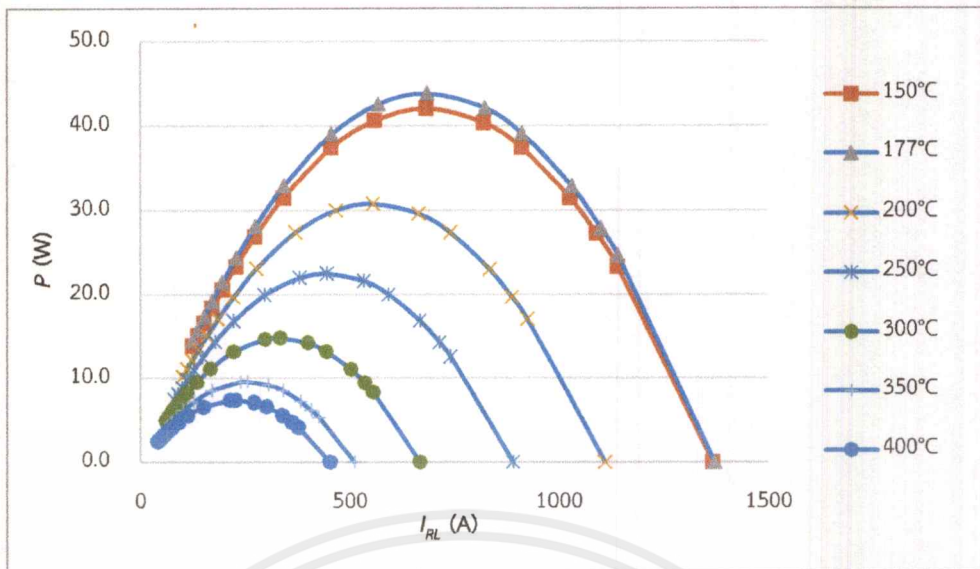


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคูเทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 8 คู่ ต่อรวมกันแบบขนาน



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคูเทอร์โมอิเล็กทริกP-N จำนวน 20 คู่ ต่อรวมกันแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) และกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) ของคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-Nจำนวน 30 คู่ ต่อร่วมกันแบบขนาน

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 20-26 ภายในสภาวะที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) เท่ากับ 300°C ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) แตกต่างกันได้แก่ 150°C , 177°C , 200°C , 250°C , 300°C , 350°C , 400°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) เพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้า (P) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม จนกระทั่งกำลังไฟฟ้า(P) เพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ค่ากำลังไฟฟ้าวัดหนึ่งจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ความต้านทานโหลด(I_{RL}) เพิ่มขึ้น กราฟจะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ และเมื่อเทียบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) ทั้งหมดมีลักษณะแนวโน้มเป็นไปดังกราฟในรูปที่ 20-26 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 177°C จะมีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด(P_{max}) มากที่สุด และเป็นเช่นนี้ในทุก ๆ จำนวนคู่เทอร์โมอิเล็กทริกP-N (N) ที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นเดียวกับการต่อแบบอนุกรม

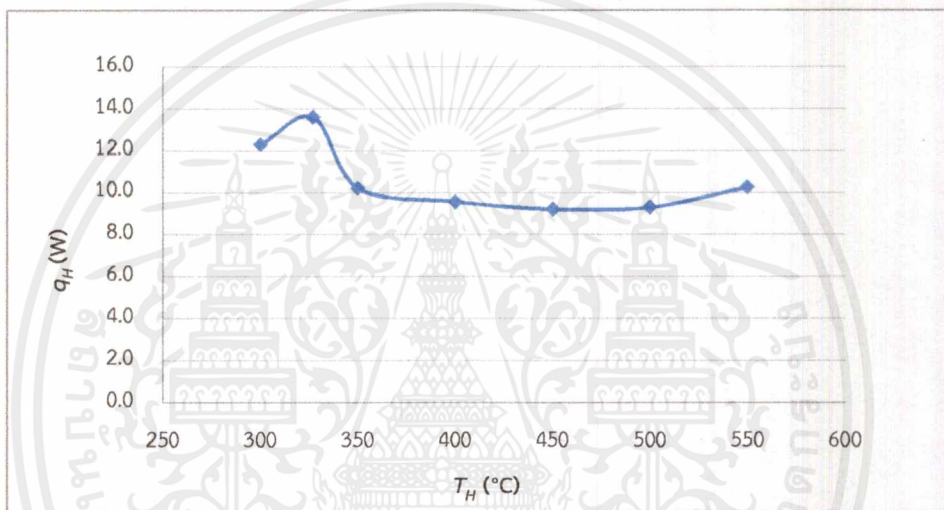
บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

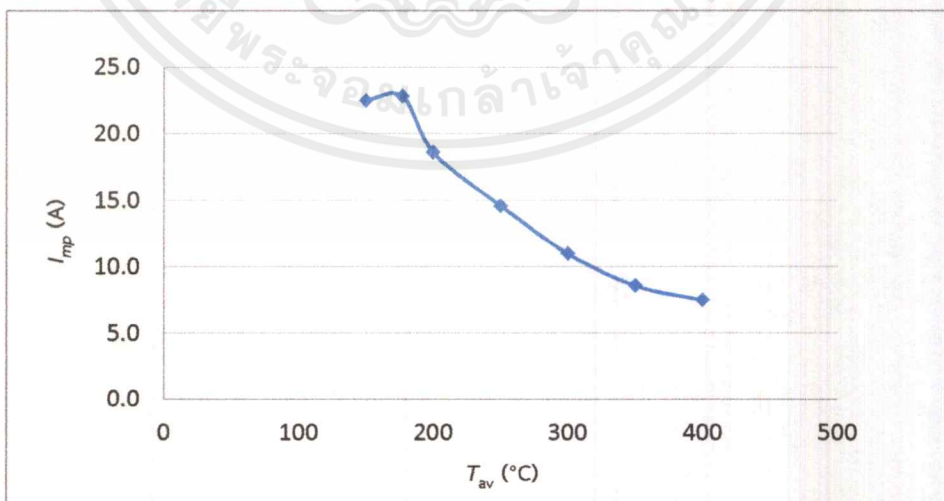
5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่วัสดุ n-type คือ 75% Bi_2Te_3 , 25% Bi_2Se_3 และวัสดุ p-type คือ 25% Bi_2Te_3 , 75% Sb_2Te_3 (1.75% excess Se) ต่อเข้าคู่กัน โดยมีความแตกต่างอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 300°C

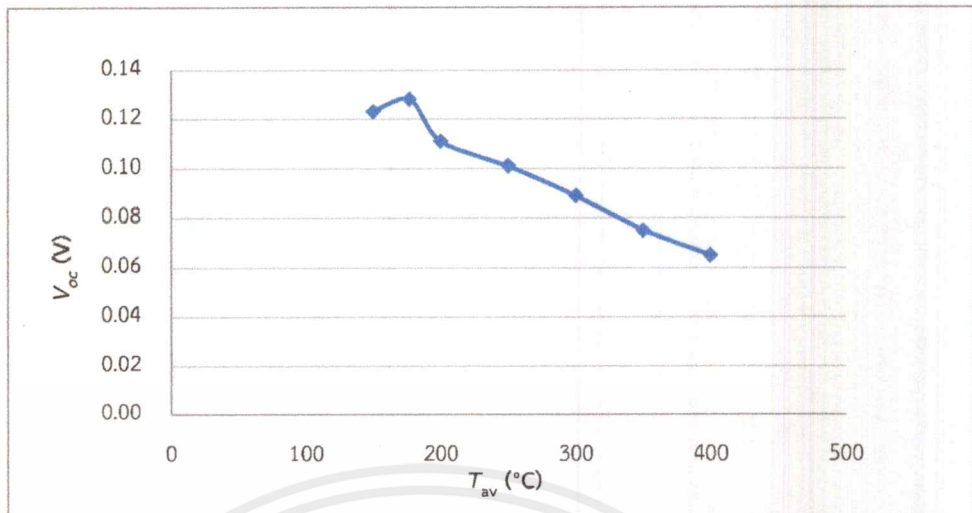


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนในด้านร้อน (q_H) กับอุณหภูมิด้านร้อน (T_H)



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด (I_{mp}) กับอุณหภูมิ (T_{av})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}) กับอุณหภูมิ(T_{av})

จากกราฟในรูปที่ 5.1-5.3 แสดงให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม(T_{av}) เท่ากับ 177°C เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด(I_{mp}) และให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร(V_{oc}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 22.8 A และ 0.128 V ตามลำดับ จึงทำให้การป้อนความร้อนที่รอยต่อมีค่าสูงสุดเท่ากับ 13.62 W โดยที่อุณหภูมิด้านร้อน(T_H) มีค่าเท่ากับ 327°C และอุณหภูมิด้านเย็นมีค่าเท่ากับ 150°C ซึ่งเมื่อเราทราบค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด(I_{mp}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร(V_{oc}) จะทำให้สามารถหาค่าการป้อนความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกได้

5.1.2 การจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้าของ TEG โดยใช้โปรแกรม Orcad

การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ศึกษาจากแบบจำลองอย่างง่ายของเทวินิน เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งจำลองการทำงานจากโปรแกรม Orcad โดยใช้แบบจำลองเทวินินในการแทนชิ้นเทอร์โมอิเล็กทริก 1 ชิ้น ฉะนั้นในการแทนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน N ชิ้น ก็จะใช้แทนด้วยจำนวนชุดของเทวินิน N ชุด ตั้งต้นจากคุณสมบัติของวัสดุและคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร(V_{oc}) และความต้านทานภายใน(R) ตามคุณสมบัติของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power transfer) คือ ค่าความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน($R_L=R$) และเมื่อทำการจำลองการทำงานของแบบจำลองในรูปแบบการต่อ 2 รูปแบบ คือ วงจรแบบอนุกรม (Series Circuit) และวงจรแบบขนาน (Parallel Circuit) ผลปรากฏว่าเป็นจริง นั่นคือกำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดสูงสุดหรือให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดจะมีค่าความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายใน ($R_L=R$)

การศึกษาในงานของเราสามารถหาความต้านทานภายใน(R) ของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่มีการต่อในรูปแบบต่าง ๆ ได้ และสามารถทราบค่าแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) เอาท์พุทได้ ทั้งในรูปแบบการต่อเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลร่วมกันแบบอนุกรม แบบขนาน หรือแบบผสม เราจึงเลือกใช้โปรแกรม Orcad นี้ในการจำลองการทำงานบอกค่าความต้านทานภายใน(R) ของชิ้นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยแปรผันไปตามความต้านทานโหลด(R_L) เพราะฉะนั้นถ้าหากต้องการหาค่าหรือเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายใน(R) ของชิ้นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล สามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างในการต่อวงจร โดยนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาจำลองการทำงานของรูปแบบการต่อเพื่อให้ทราบค่าความต้านทานภายใน(R) ก่อนจึงทำให้สามารถทราบถึงรูปแบบและจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่จะใช้ในการจำลอง ซึ่งใช้คุณสมบัติการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Maximum power transfer) ได้โดยจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าความต้านทานโหลดเท่ากับค่าความต้านทานภายในของชิ้นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ($R_L=R$)



5.2 ข้อเสนอแนะ

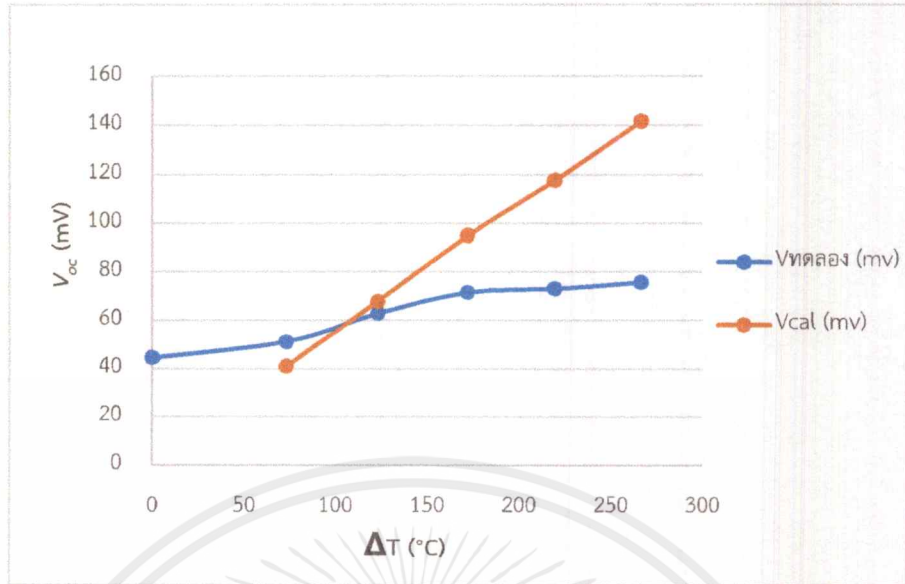
เมื่อนำคุณสมบัติของวัสดุและค่าไฟฟ้าจากการวัดของซินโมดูลแคลเซียมแมงกานีสออกไซด์ (CaMnO) ที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และค่าความต้านทานภายใน (R) จากนั้นใส่ลงในแบบจำลองการทำงานแบบจำลองทางไฟฟ้า TEG โดยใช้โปรแกรม Orcad เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างค่าไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองกับค่าไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลอง เพื่อดูว่าการจำลองการทำงานของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่เราได้สอดคล้องกับการทดลองอย่างไร

ตารางที่ 5.1 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูล 1 ตัวจากการทดลอง

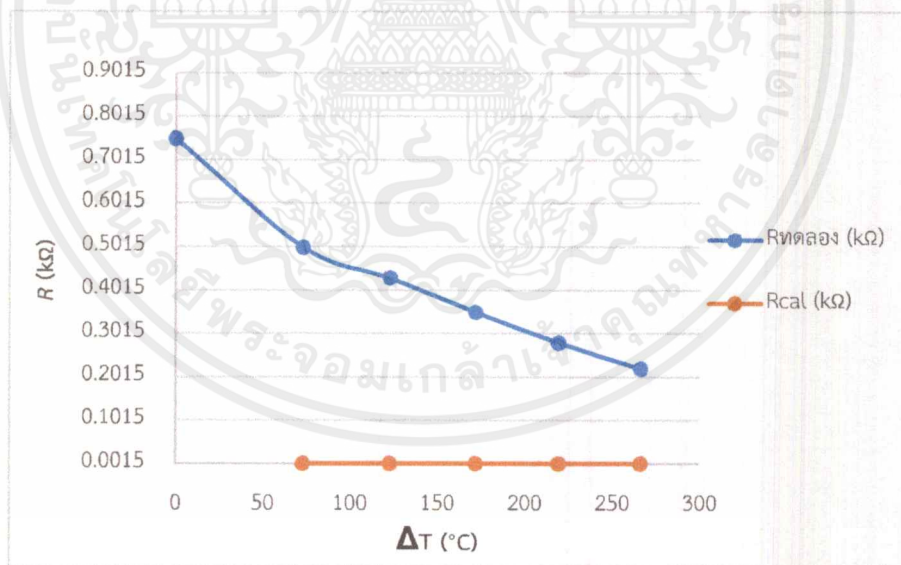
T1 (°C)	T2 (°C)	V (mv)	R (k Ω)	I (μ A)
อุณหภูมิห้อง	26.3	44.52	0.75	0.7
100	26.9	51.2	0.5	0.78
150	27.2	62.9	0.43	0.926
200	28	71.61	0.35	1.024
250	30.6	73.21	0.28	1.356
300	33.7	75.84	0.22	1.632

ตารางที่ 5.1.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูล 1 ตัวจากแบบจำลองทางไฟฟ้า

ΔT	V_{oc} (mv)	R (k Ω)	I_{sc} (μ A)
0	-	-	-
73.1	40.94	0.0020	20470
122.8	67.79	0.0019	35680
172	94.94	0.0018	52740
219.4	117.60	0.0017	69180
266.3	141.62	0.0016	88510

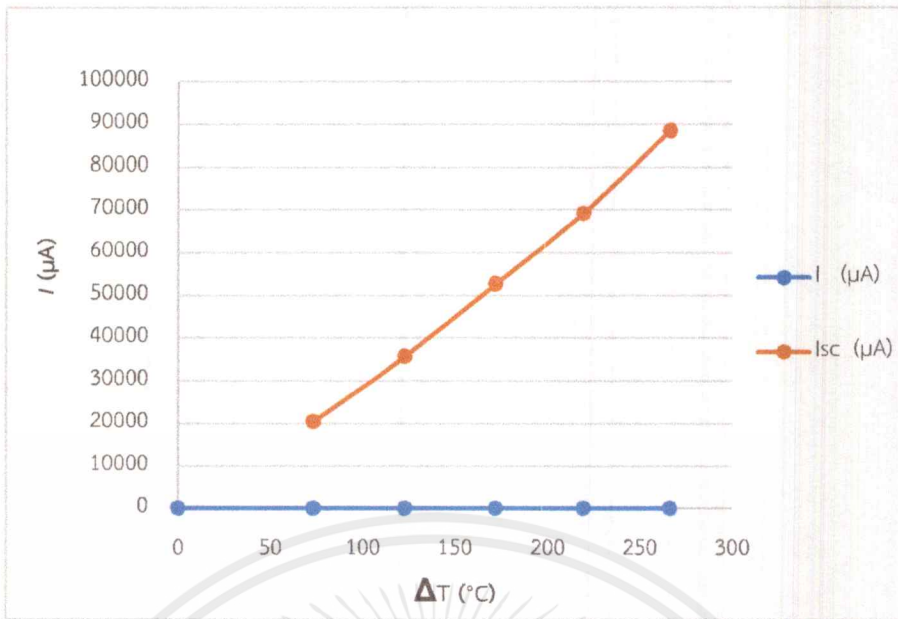


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) ของแรงดันไฟฟ้าจากการทดลอง และแรงดันไฟฟ้าจากการคำนวณ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R) ของความต้านทานไฟฟ้าจากการทดลอง และความต้านทานไฟฟ้าจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



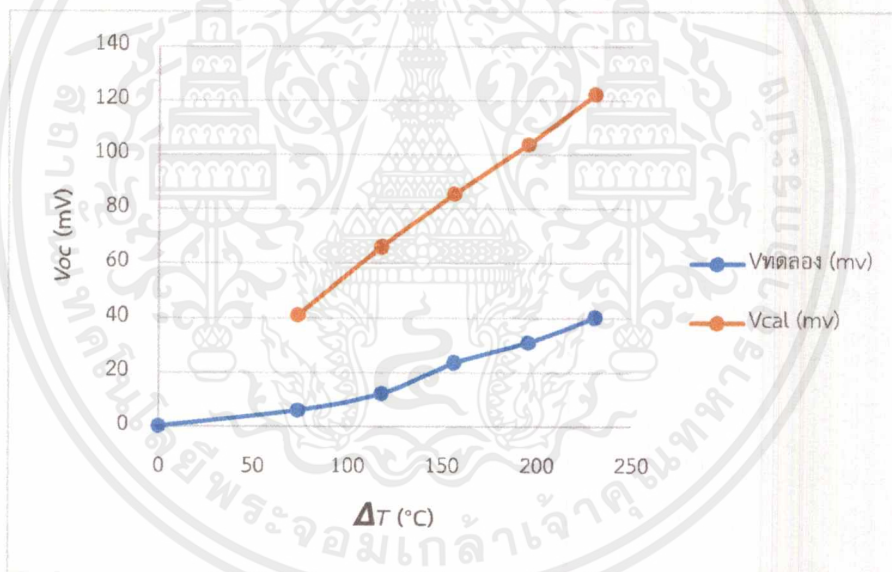
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I) ของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และกระแสไฟฟ้าวงจรถัด(I_{sc})

ตารางที่ 5.2 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูลที่มีฉนวนจากการทดลอง

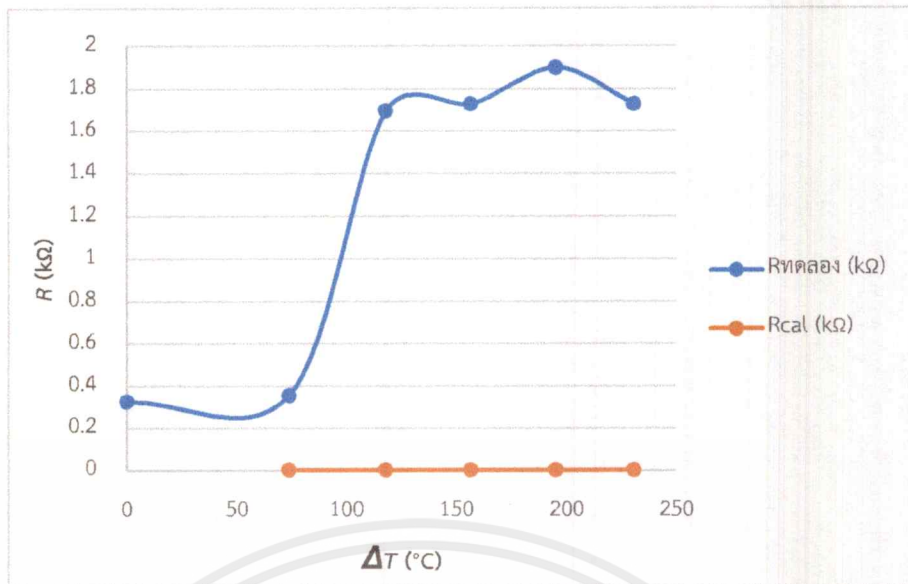
T_1 (°C)	T_2 (°C)	V (mv)	R (k Ω)	I (μA)
อุณหภูมิห้อง	25	0.225	0.326	0.32
100	26.3	6.071	0.356	12.193
150	32.2	12.184	1.697	27.97
200	43.6	23.6	1.73	52.8
250	54.8	30.925	1.901	75.56
300	69.4	40.26	1.73	122

ตารางที่ 5.2.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูลที่มีฉนวนจากแบบจำลองทางไฟฟ้า

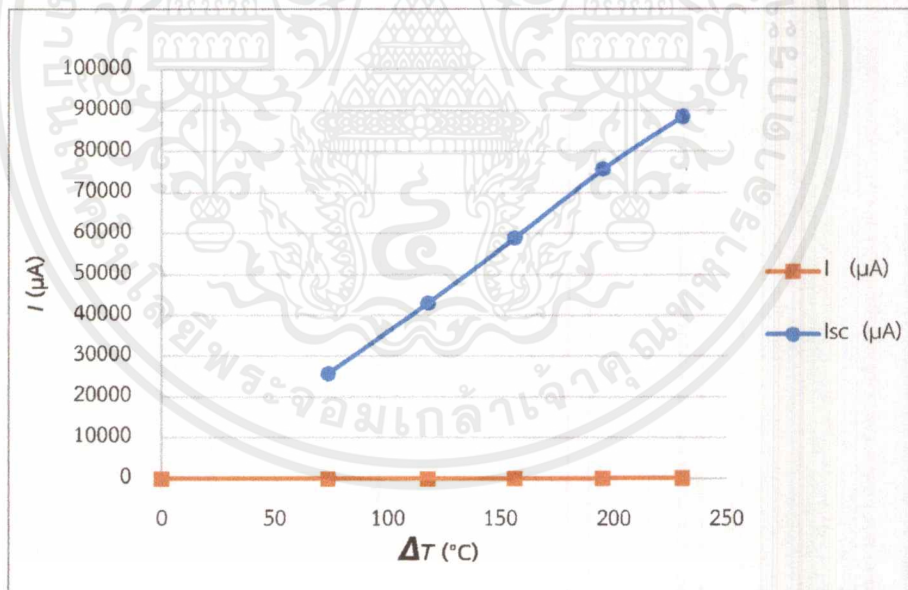
ΔT	V_{oc} (mv)	R (k Ω)	I_{sc} (μA)
0	-	-	-
73.7	41.139	0.00160	25710
117.8	65.968	0.00153	43120
156.4	85.457	0.00145	58940
195.2	103.846	0.00137	75800
230.6	122.449	0.00127	88580



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) ของแรงดันไฟฟ้าจากการทดลอง และแรงดันไฟฟ้าจากการคำนวณ



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R) ของความต้านทานไฟฟ้าจากการทดลอง และความต้านทานไฟฟ้าจากการคำนวณ



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I) ของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และกระแสไฟฟ้าวงจรถัด(I_{sc})

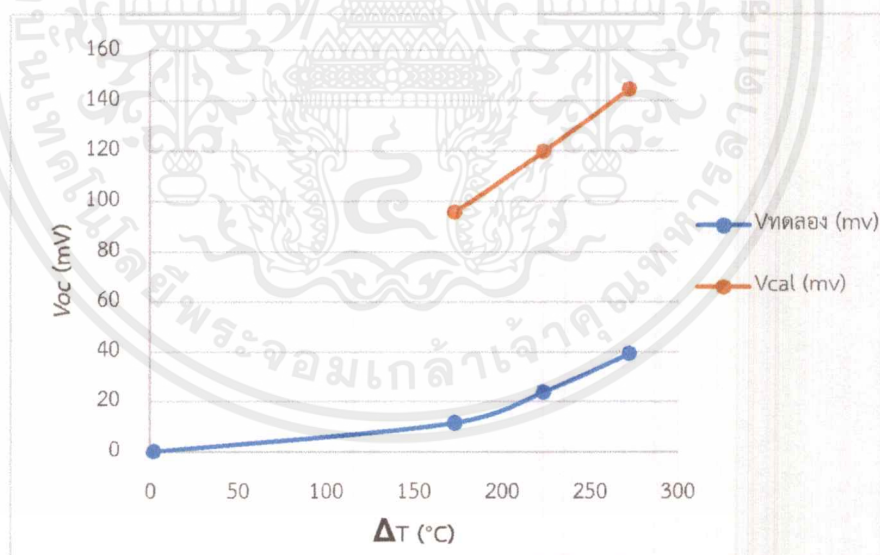
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนานจากการทดลอง

T1 (°C)	T2 (°C)	V (mv)	R (k Ω)	I (μ A)
26.9	24.8	0.177	0.05914	8.44
200	26.6	11.580	0.06354	90.39
250	26.4	23.870	0.06849	180.00
300	27.4	39.510	0.07760	299.00

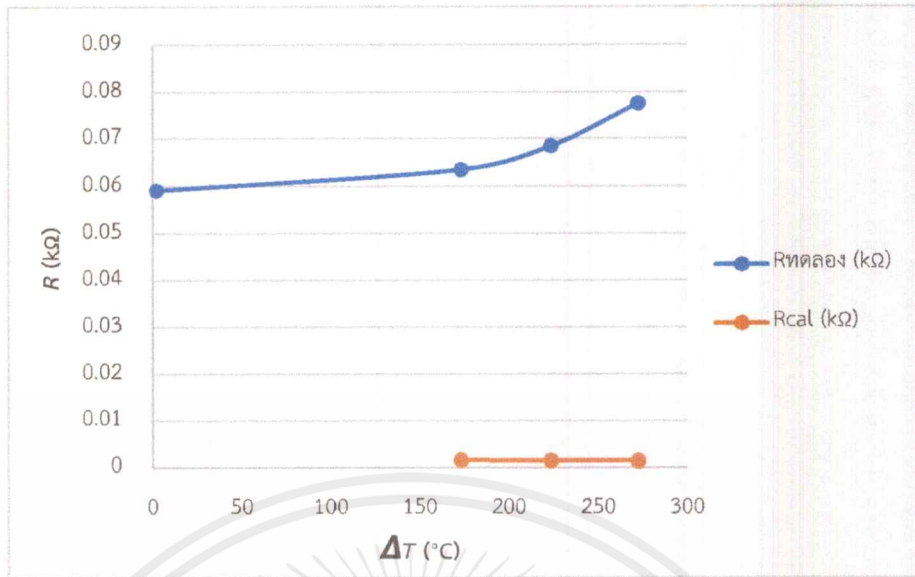
ตารางที่ 5.3.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนานจากแบบจำลองทางไฟฟ้า

ΔT	V_{oc} (mv)	R (k Ω)	I_{sc} (μ A)
2.1	-	-	-
173.4	95.720	0.00148	64680
223.6	119.89	0.00140	85640
272.6	144.75	0.00132	109700

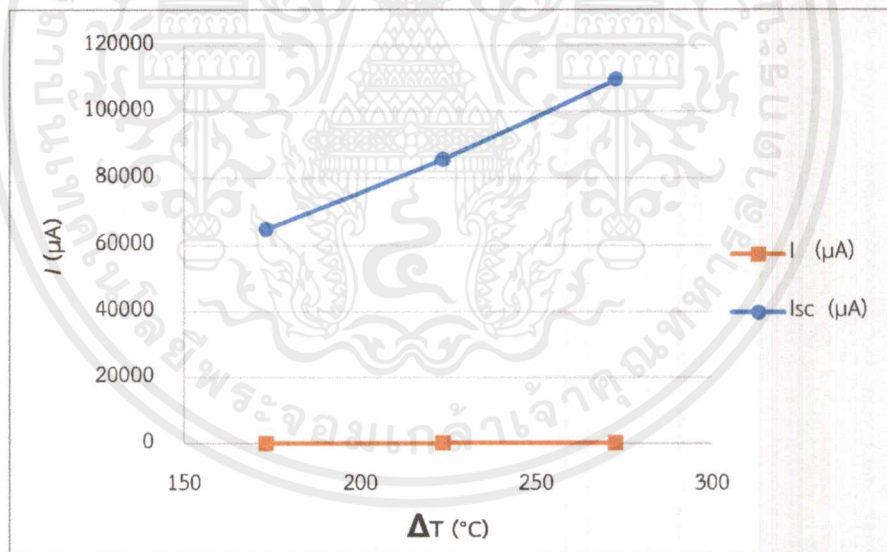


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) ของแรงดันไฟฟ้าจากการทดลอง และแรงดันไฟฟ้าจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R) ของความต้านทานไฟฟ้าจากการทดลอง และความต้านทานไฟฟ้าจากการคำนวณ



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I) ของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และกระแสไฟฟ้าวงจรถัด(I_{sc})

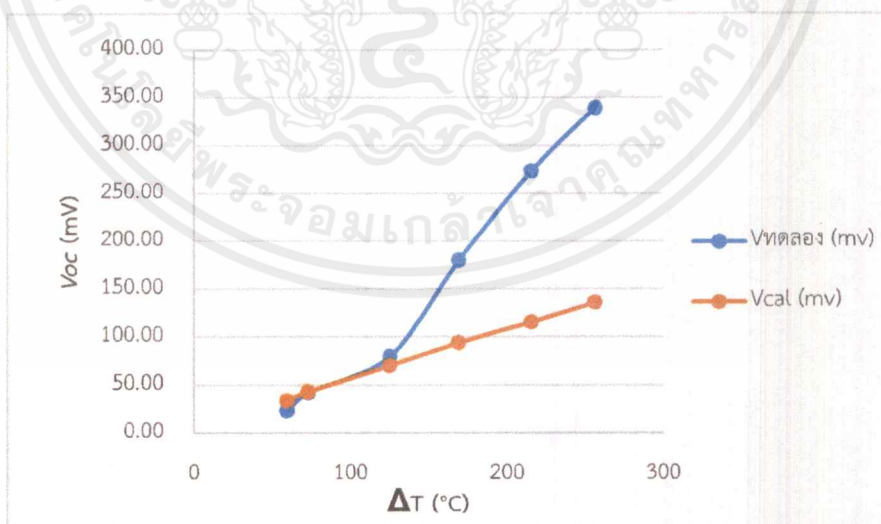
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 การวัดค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนาน 5 ชุดจากการทดลอง

T1 (°C)	T2 (°C)	V (mv)	R (k Ω)	I (μ A)
86.5	27.1	23.69	0.366	66
100	27.3	41.97	0.358	114.52
150	24.6	79.72	1.07	250
200	30.6	180	18.44	663
250	34.5	274	27.81	1050
300	43.7	339	33.99	3499

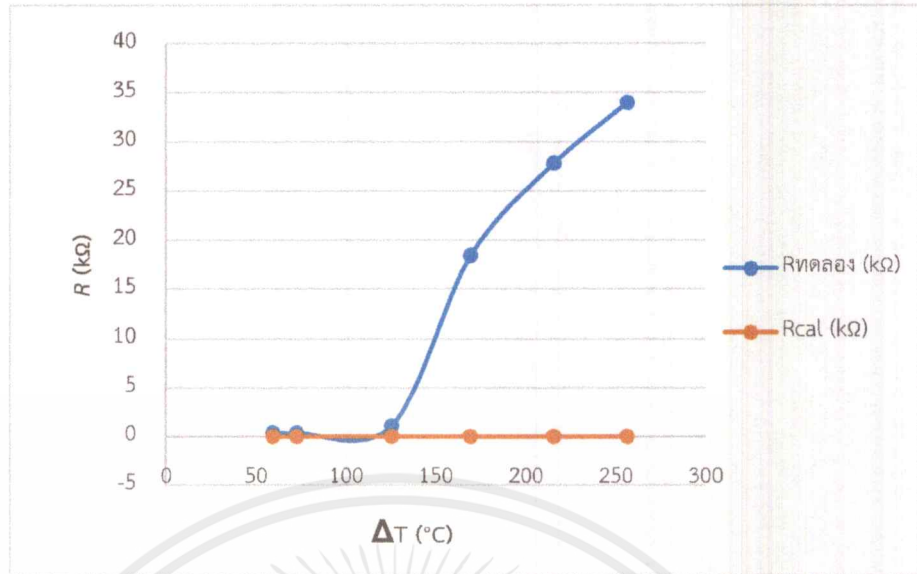
ตารางที่ 5.4.1 ค่าไฟฟ้าของโมดูล 10 ตัวต่อขนาน 5 ชุดจากแบบจำลองทางไฟฟ้า

ΔT	V_{oc} (mv)	R_l (k Ω)	I_{sc} (μ A)
59.4	33.73	0.00164	20570
72.7	42.75	0.00162	26390
125.4	70.25	0.00154	45620
169.4	94.02	0.00146	64400
215.5	115.25	0.00140	82320
256.3	136.30	0.00131	104050

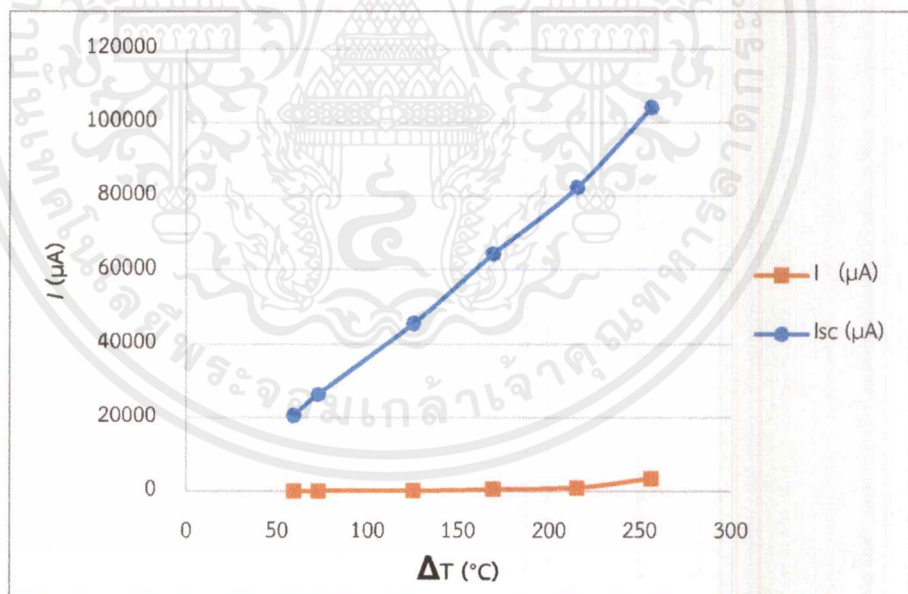


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และแรงดันไฟฟ้า(V_{oc}) ของแรงดันไฟฟ้าจากการทดลอง และแรงดันไฟฟ้าจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และความต้านทานไฟฟ้า(R) ของความต้านทานไฟฟ้าจากการทดลอง และความต้านทานไฟฟ้าจากการคำนวณ



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ(ΔT) และกระแสไฟฟ้า(I) ของกระแสไฟฟ้าจากการทดลอง และกระแสไฟฟ้าวงจรถัด(I_{sc})

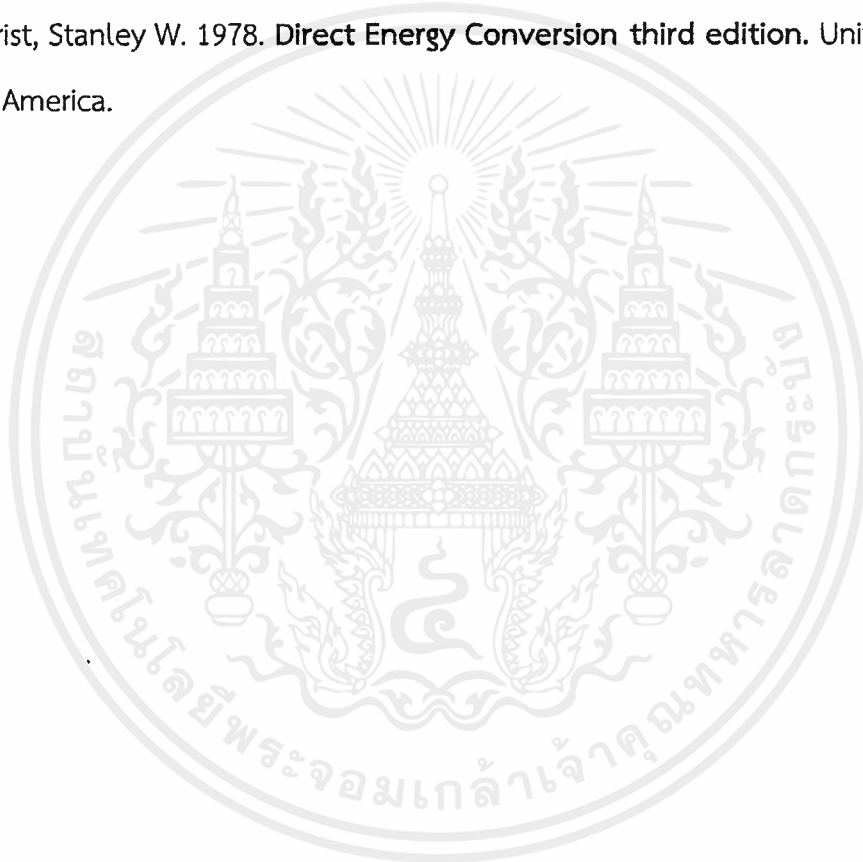
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟดังรูปที่ 5.4 -5.15 แสดงถึงการเปรียบเทียบข้อมูลของการทดลองกับการจำลองการทำงานของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของผลต่างของอุณหภูมิ(ΔT) แนวนอนของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร(V_{oc}) มีค่าเพิ่มขึ้นตามช่วงผลต่างของอุณหภูมิ(ΔT) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันทั้งการทดลองและการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Orcad แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้มีความแตกต่างกัน ซึ่งคาดว่า เป็นผลมาจากแบบจำลองที่ใช้ยังไม่สามารถอธิบายผลการทดลองได้อย่างสมบูรณ์ ต้องมีการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ อันเกิดขึ้นมาจากผลของรอยต่อและผลของการทำงานของอุปกรณ์ในภาคปฏิบัติ เพื่อใช้ในการพัฒนาเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). 2561. เทอร์โมอิเล็กทริกส์ Thermoelectrics. [Online] Available: <https://www.sri.or.th/th/sliresearch/thermoelectrics.html>
- [2] ข่าวสารคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2552.วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก. [Online] Available: <http://webstaff.kmutt.ac.th/~ivorthip/TE/>
- [3] Charles K. Alexander and Matthew N.O. Sadiku. 2009. **Fundamentals of Electric Circuits**.United States of America.
- [4] Angrist, Stanley W. 1978. **Direct Energy Conversion** third edition. United States of America.



ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างในการออกแบบ Thermoelectric generator

โจทย์ปัญหา จงออกแบบที่ทำงานในช่วง 27°C และ 327°C ทำการหาค่าประสิทธิภาพ(maximum efficiency) และกำลังสูงสุด(maximum power) จากนั้นทำการหากำลังเอาต์พุต(power output) และ ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิตัวอุปกรณ์(thermal efficiency)ของตัวอุปกรณ์ ทำการหาแรงดัน กระแส และความร้อนอินพุต(heat input) ที่จำเป็นต้องใช้

วิธีทำ จากภาคผนวก C เราหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิตัวของ Thermoelectric generator เป็น 177°C (450K) ทั้ง n-type และ p-type มีค่า figures of merit สูงสุดเป็น

n-type	p-type
75% Bi_2Te_3 25% Bi_2Se_3	25% Bi_2Te_3 75% Sb_2Te_3 (1.75% excess Se)
$\alpha = -195 \times 10^{-6}$ volts/ $^{\circ}\text{C}$	$\alpha = +230 \times 10^{-6}$ volts/ $^{\circ}\text{C}$
$\rho = 1.35 \times 10^{-3}$ ohm-cm	$\rho = 1.73 \times 10^{-3}$ ohm-cm
$Z = 2.05 \times 10^{-3}$ (K^{-1})	$Z = 2.50 \times 10^{-3}$ (K^{-1})

สมการ 4-46 แสดงค่า figures of merit สำหรับการต่อวัสดุ n-type และ p-type รวมกันเป็น couple

$$Z^* = \frac{(|\alpha_n| + |\alpha_p|)^2}{\left[(\rho_n \lambda_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p \lambda_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (4-46)$$

ค่า figures of merit ของวัสดุชิ้นเดียวหาได้จากสมการ

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \quad (4-87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาค่า thermal conductivity ของวัสดุทั้งสองได้จาก

$$\lambda_n = \frac{\alpha^2}{\rho z} = \frac{(-195 \times 10^{-6})^2}{(1.35 \times 10^{-3})(2.05 \times 10^{-3})} = 0.014 \text{ watt/cm}^\circ\text{C}$$

$$\lambda_p = \frac{\alpha^2}{\rho z} = \frac{(230 \times 10^{-6})^2}{(1.75 \times 10^{-3})(2.50 \times 10^{-3})} = 0.012 \text{ watt/cm}^\circ\text{C}$$

ค่า figures of merit ที่จุด optimal เมื่อมีการต่อวัสดุทั้ง 2 เข้ากันจะเป็นดังสมการ 4-46

$$Z^* = \frac{(|\alpha_n| + |\alpha_p|)^2}{\left[(\rho_n \lambda_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p \lambda_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2}$$

$$Z^* = \frac{(|(195 + 230) \times 10^{-6}|)^2}{\left[(1.35 \times 10^{-3} \times 14 \times 10^{-3})^{\frac{1}{2}} + (1.75 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^{-3})^{\frac{1}{2}} \right]^2}$$

$$= 2.26 \times 10^{-3} \text{ (K)}^{-1}$$

นักวิจัยพบว่า การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค สภาพต้านทานไฟฟ้า และ figures of merit ทำได้ง่ายกว่าการวัดการนำความร้อน และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า figures of merit ของวัสดุ

โดยทั่วไปแล้วค่า figures of merit ที่เกิดจากการรวมกันของวัสดุ 2 ชนิดไม่ใช่ค่าเฉลี่ยของค่า figures of merit ของแต่ละวัสดุรวมกัน อย่างไรก็ตามในตัวอย่างนี้บังเอิญมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าเฉลี่ยเท่านั้น

อัตราส่วนของพื้นที่ต่อความยาว คือ

$$\gamma = \frac{A}{l}$$

การนำความร้อน

$$K = \lambda_n \gamma_n + \lambda_p \gamma_p$$

ความต้านทานไฟฟ้าภายใน

$$R = \frac{\rho_n}{\gamma_n} + \frac{\rho_p}{\gamma_p}$$

อัตราส่วนของพื้นที่ต่อความยาวที่ทำให้ค่า RK มีค่าน้อยที่สุดสามารถหาได้จาก

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_p} = \left[\frac{\rho_n \lambda_p}{\rho_p \lambda_n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= [(1.35 \times 1.2)/(1.75 \times 1.4)]^{\frac{1}{2}} = 0.81$$

เราจึงทำการสมมติต่อ : ให้อัตราส่วนพื้นที่ของ n-type ต่อความยาวมีค่า 1 เซนติเมตร และความยาวของแต่ละชั้นยาว 1 เซนติเมตร

$$\gamma_n = \frac{A_n}{l_n} = 1 \text{ cm}$$

และดังนั้น

$$\gamma_p = \frac{1}{0.81} = 1.24 \text{ cm}$$

ค่า thermal conductance หาได้จากสมการ 4-36

$$K = \lambda_n \gamma_n + \lambda_p \gamma_p = (14 \times 10^{-3})(1) + (12 \times 10^{-3})(1.24)$$

$$= 28.8 \times 10^{-3} \text{ watts/}^\circ\text{C}$$

และค่า electrical resistance ภายในหาได้จากสมการ 4-37

$$R = \frac{\rho_n}{\gamma_n} + \frac{\rho_p}{\gamma_p} = \frac{1.35 \times 10^{-3}}{1} + \frac{1.73 \times 10^{-3}}{1.24} = 2.76 \times 10^{-3} \text{ ohm}$$

อัตราส่วนของ optimum resistance หาได้จากสมการ 4-48

$$m'_{opt} = (1 + Z^* T_{av})^{\frac{1}{2}} = (1 + 2.26 \times 10^{-3} \times 450)^{\frac{1}{2}} = 1.42$$

เมื่อ

$$m = \frac{\text{load resistance}}{\text{internal resistance of the device}} = \frac{R_o}{R}$$

$$T_{av} = \frac{1}{2} (T_C + T_H)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m'_{opt} = 1.42 = \frac{R_o}{2.76 \times 10^{-3}}$$

$$R_o = 3.92 \times 10^{-3} \text{ ohms}$$

แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร สามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์ซีเบคของขาทั้งสองรวมกัน คุณกลับผลต่างของอุณหภูมิคอมขาทั้งสอง

$$V_{oc} = \alpha \Delta T = [(|-195| + |+230|) \times 10^{-6}][300] = 0.128 \text{ V}$$

เราพิจารณาต่อเพื่อหาค่าการทำงานของตัวกำเนิดไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

เงื่อนไขการทำงานนี้ความต้านทานโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับความต้านทานภายใน ดังนั้นกระแสจึงมีค่าเป็น

$$I_{mp} = \frac{\alpha \Delta T}{2R} = \frac{0.128}{2(2.76 \times 10^{-3})} = 23.2 \text{ amp}$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายมีค่า

$$P_o = I^2 R_o = 23.2^2 (2.76 \times 10^{-3}) = 1.48 \text{ watts}$$

Power density มีค่า

$$\frac{P}{A_{total}} = \frac{1.48}{2.24} = 0.662 \text{ watt/cm}^2$$

Power input ของอุปกรณ์สามารถหาได้จากสมการ 4-35

$$\begin{aligned} q_H &= K \Delta T + \alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R \\ &= 28.8 \times 10^{-3} (300) + (425 \times 10^{-6}) (600) (19.2) - \frac{1}{2} (19.2)^2 (2.76 \times 10^{-3}) \\ &= 13.04 \text{ watts} \end{aligned}$$

Thermal efficiency สามารถคำนวณได้จากสมการ 4-51

$$\begin{aligned} \eta_{t(mp)} &= \frac{\Delta T/T_H}{\frac{4}{Z^*T_H} + 2 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T}{T_H}\right)} & (4-51) \\ &= \frac{300/600}{\left(\frac{4}{2.26 \times 10^{-3} \times 600}\right) + 2 - \frac{1}{2}\left(\frac{300}{600}\right)} = \frac{0.5}{2.93 + 2 - 0.25} \\ &= 10.70 \text{ percent} \end{aligned}$$

ในกรณีนี้เราสามารถเพิ่ม Power output แต่เราต้องเสีย thermal efficiency



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ต่อร่วมกันแบบอนุกรม

อุณหภูมิ 150°C

ต่ออนุกรม 1 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.123	0.0027	0.0000	45.56	0.000
0.123	0.0027	0.0005	38.44	0.739
0.123	0.0027	0.0007	36.18	0.916
0.123	0.0027	0.0009	34.17	1.051
0.123	0.0027	0.0014	30.00	1.260
0.123	0.0027	0.0018	27.33	1.345
0.123	0.0027	0.0027	22.78	1.401
0.123	0.0027	0.0039	18.69	1.356
0.123	0.0027	0.0054	15.19	1.245
0.123	0.0027	0.0081	11.39	1.051
0.123	0.0027	0.0108	9.11	0.897
0.123	0.0027	0.0135	7.59	0.778
0.123	0.0027	0.0162	6.51	0.686
0.123	0.0027	0.0189	5.69	0.613
0.123	0.0027	0.0216	5.06	0.553
0.123	0.0027	0.0243	4.56	0.504
0.123	0.0027	0.0270	4.14	0.463

ต่ออนุกรม 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
3.69	0.081	0.0000	45.56	0.00
3.69	0.081	0.0162	37.96	23.35
3.69	0.081	0.0203	36.43	26.94
3.69	0.081	0.0270	34.17	31.52
3.69	0.081	0.0405	30.37	37.36
3.69	0.081	0.0540	27.33	40.34
3.69	0.081	0.0810	22.78	42.03
3.69	0.081	0.1164	18.69	40.67
3.69	0.081	0.1620	15.19	37.36
3.69	0.081	0.2430	11.39	31.52
3.69	0.081	0.3240	9.11	26.90
3.69	0.081	0.4050	7.59	23.35
3.69	0.081	0.4860	6.51	20.58
3.69	0.081	0.5670	5.69	18.39
3.69	0.081	0.6480	5.06	16.60
3.69	0.081	0.7290	4.56	15.13
3.69	0.081	0.8100	4.14	13.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 177°C

ต่ออนุกรม 1 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.128	0.0028	0.00000	45.71	0.000
0.128	0.0028	0.00056	38.01	0.813
0.128	0.0028	0.00070	36.57	0.936
0.128	0.0028	0.00093	34.32	1.095
0.128	0.0028	0.00140	30.48	1.300
0.128	0.0028	0.00187	27.41	1.405
0.128	0.0028	0.00280	22.86	1.463
0.128	0.0028	0.00397	18.91	1.419
0.128	0.0028	0.00560	15.24	1.300
0.128	0.0028	0.00840	11.43	1.097
0.128	0.0028	0.01120	9.14	0.936
0.128	0.0028	0.01400	7.62	0.813
0.128	0.0028	0.01680	6.53	0.717
0.128	0.0028	0.01960	5.71	0.640
0.128	0.0028	0.02240	5.08	0.578
0.128	0.0028	0.02520	4.57	0.527
0.128	0.0028	0.02800	4.16	0.484

ต่ออนุกรม 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
3.84	0.084	0.0000	45.710	0.00
3.84	0.084	0.0168	38.100	24.38
3.84	0.084	0.0210	36.570	28.09
3.84	0.084	0.0280	34.290	32.91
3.84	0.084	0.0420	30.480	39.01
3.84	0.084	0.0560	27.430	42.13
3.84	0.084	0.0840	22.860	43.89
3.84	0.084	0.1191	18.910	42.58
3.84	0.084	0.1680	15.240	39.01
3.84	0.084	0.2520	11.430	32.91
3.84	0.084	0.3360	9.143	28.09
3.84	0.084	0.4200	7.619	24.38
3.84	0.084	0.5040	6.531	21.50
3.84	0.084	0.5880	5.714	19.20
3.84	0.084	0.6720	5.079	17.34
3.84	0.084	0.7560	4.571	15.80
3.84	0.084	0.8400	4.156	14.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 200°C

ต่ออนุกรม 1 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.111	0.003	0.0000	37.000	0.0000
0.111	0.003	0.0006	30.830	0.5704
0.111	0.003	0.0008	29.210	0.6826
0.111	0.003	0.0010	27.750	0.7701
0.111	0.003	0.0015	24.670	0.9127
0.111	0.003	0.0020	22.200	0.9857
0.111	0.003	0.0030	18.500	1.0270
0.111	0.003	0.0041	15.630	1.0020
0.111	0.003	0.0060	12.330	0.9127
0.111	0.003	0.0090	9.250	0.7701
0.111	0.003	0.0120	7.400	0.6571
0.111	0.003	0.0150	6.167	0.5704
0.111	0.003	0.0180	5.286	0.5029
0.111	0.003	0.0210	4.625	0.4492
0.111	0.003	0.0240	4.111	0.4056
0.111	0.003	0.0270	3.700	0.3696
0.111	0.003	0.0300	3.364	0.3394

ต่ออนุกรม 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
3.33	0.09	0.000	37.000	0.00
3.33	0.09	0.018	30.830	17.11
3.33	0.09	0.023	29.470	19.97
3.33	0.09	0.030	27.750	23.10
3.33	0.09	0.045	24.670	27.38
3.33	0.09	0.060	22.200	29.75
3.33	0.09	0.090	18.500	30.80
3.33	0.09	0.124	15.560	30.03
3.33	0.09	0.180	12.330	27.38
3.33	0.09	0.270	9.250	23.10
3.33	0.09	0.360	7.400	19.71
3.33	0.09	0.450	6.167	17.11
3.33	0.09	0.540	5.286	15.09
3.33	0.09	0.630	4.625	13.48
3.33	0.09	0.720	4.111	12.17
3.33	0.09	0.810	3.700	11.09
3.33	0.09	0.900	3.364	10.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 250°C

ต่ออนุกรม 1 คู่					ต่ออนุกรม 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P	V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.101	0.0034	0.0000	29.710	0.0000	3.03	0.102	0.0000	29.710	0.000
0.101	0.0034	0.0007	24.630	0.4248	3.03	0.102	0.0204	24.760	12.500
0.101	0.0034	0.0009	23.490	0.4965	3.03	0.102	0.0255	23.770	14.400
0.101	0.0034	0.0011	22.440	0.5541	3.03	0.102	0.0340	22.280	16.880
0.101	0.0034	0.0017	19.800	0.6667	3.03	0.102	0.0510	19.800	20.000
0.101	0.0034	0.0023	17.720	0.7221	3.03	0.102	0.0680	17.820	21.600
0.101	0.0034	0.0034	14.850	0.7501	3.03	0.102	0.1020	14.850	22.500
0.101	0.0034	0.0046	12.630	0.7332	3.03	0.102	0.1371	12.670	22.020
0.101	0.0034	0.0068	9.902	0.6667	3.03	0.102	0.2040	9.902	20.000
0.101	0.0034	0.0102	7.427	0.5626	3.03	0.102	0.3060	7.427	16.880
0.101	0.0034	0.0136	5.941	0.4800	3.03	0.102	0.4080	5.941	14.400
0.101	0.0034	0.0170	4.951	0.4167	3.03	0.102	0.5100	4.951	12.500
0.101	0.0034	0.0204	4.244	0.3674	3.03	0.102	0.6120	4.244	11.020
0.101	0.0034	0.0238	3.713	0.3282	3.03	0.102	0.7140	3.713	9.846
0.101	0.0034	0.0272	3.301	0.2963	3.03	0.102	0.8160	3.301	8.890
0.101	0.0034	0.0306	2.971	0.2700	3.03	0.102	0.9180	2.971	8.101
0.101	0.0034	0.0340	2.701	0.2480	3.03	0.102	1.0200	2.701	7.439

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 300°C

ต่ออนุกรม 1 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.089	0.004	0.0000	22.250	0.0000
0.089	0.004	0.0008	18.540	0.2750
0.089	0.004	0.0010	17.800	0.3168
0.089	0.004	0.0013	16.790	0.3666
0.089	0.004	0.0020	14.830	0.4401
0.089	0.004	0.0027	13.280	0.4764
0.089	0.004	0.0040	11.130	0.4951
0.089	0.004	0.00495	9.944	0.4895
0.089	0.004	0.0080	7.417	0.4401
0.089	0.004	0.0120	5.563	0.3713
0.089	0.004	0.0160	4.450	0.3168
0.089	0.004	0.0200	3.708	0.2750
0.089	0.004	0.0240	3.179	0.2425
0.089	0.004	0.0280	2.781	0.2166
0.089	0.004	0.0320	2.472	0.1956
0.089	0.004	0.0360	2.225	0.1782
0.089	0.004	0.0400	2.023	0.1637

ต่ออนุกรม 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
2.67	0.12	0.000	22.250	0.000
2.67	0.12	0.024	18.540	8.251
2.67	0.12	0.030	17.800	9.506
2.67	0.12	0.040	16.690	11.140
2.67	0.12	0.060	14.830	13.200
2.67	0.12	0.080	13.350	14.260
2.67	0.12	0.120	11.13	14.850
2.67	0.12	0.149	9.926	14.680
2.67	0.12	0.240	7.417	13.200
2.67	0.12	0.360	5.563	11.140
2.67	0.12	0.480	4.450	9.506
2.67	0.12	0.600	3.708	8.251
2.67	0.12	0.720	3.179	7.274
2.67	0.12	0.840	2.781	6.498
2.67	0.12	0.960	2.472	5.867
2.67	0.12	1.080	2.225	5.347
2.67	0.12	1.200	2.023	4.910

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 350°C

ต่ออนุกรม 1 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.075	0.0044	0.00000	17.050	0.0000
0.075	0.0044	0.00088	14.210	0.1776
0.075	0.0044	0.00110	13.640	0.2045
0.075	0.0044	0.00147	12.780	0.2400
0.075	0.0044	0.00220	11.360	0.2841
0.075	0.0044	0.00293	10.230	0.3067
0.075	0.0044	0.00440	8.523	0.3196
0.075	0.0044	0.00505	7.937	0.3181
0.075	0.0044	0.00880	5.682	0.2841
0.075	0.0044	0.01320	4.261	0.2397
0.075	0.0044	0.01760	3.409	0.2045
0.075	0.0044	0.02200	2.841	0.1776
0.075	0.0044	0.02640	2.435	0.1565
0.075	0.0044	0.03080	2.131	0.1398
0.075	0.0044	0.03520	1.894	0.1263
0.075	0.0044	0.03960	1.705	0.1151
0.075	0.0044	0.04400	1.550	0.1057

ต่ออนุกรม 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
2.25	0.132	0.0000	17.050	0.0000
2.25	0.132	0.0264	14.210	5.3270
2.25	0.132	0.0330	13.640	6.1360
2.25	0.132	0.0440	12.780	7.1910
2.25	0.132	0.0660	11.360	8.5230
2.25	0.132	0.0880	10.230	9.2050
2.25	0.132	0.1320	8.523	9.588
2.25	0.132	0.1515	7.937	9.543
2.25	0.132	0.2640	5.682	8.5230
2.25	0.132	0.3960	4.261	7.1910
2.25	0.132	0.5280	3.409	6.1360
2.25	0.132	0.6600	2.841	5.3270
2.25	0.132	0.7920	2.435	4.6960
2.25	0.132	0.9240	2.131	4.1950
2.25	0.132	1.0560	1.894	3.7880
2.25	0.132	1.1880	1.705	3.4520
2.25	0.132	1.3200	1.550	3.1700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 400°C

ต่ออนุกรม 1 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.065	0.0043	0.0000	15.120	0.0000
0.065	0.0043	0.0009	12.500	0.1406
0.065	0.0043	0.0011	12.040	0.1594
0.065	0.0043	0.0014	11.400	0.1821
0.065	0.0043	0.0022	10.000	0.2200
0.065	0.0043	0.0029	9.028	0.2364
0.065	0.0043	0.0043	7.558	0.2456
0.065	0.0043	0.0048	7.143	0.2449
0.065	0.0043	0.0086	5.039	0.2183
0.065	0.0043	0.0129	3.779	0.1842
0.065	0.0043	0.0172	3.023	0.1572
0.065	0.0043	0.0215	2.519	0.1365
0.065	0.0043	0.0258	2.160	0.1203
0.065	0.0043	0.0301	1.890	0.1075
0.065	0.0043	0.0344	1.680	0.0970
0.065	0.0043	0.0387	1.512	0.0884
0.065	0.0043	0.0430	1.374	0.0812

ต่ออนุกรม 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
1.95	0.129	0.0000	15.12	0.000
1.95	0.129	0.0258	12.6	4.094
1.95	0.129	0.0323	12.09	4.721
1.95	0.129	0.0430	11.34	5.527
1.95	0.129	0.0645	10.08	6.55
1.95	0.129	0.0860	9.07	7.074
1.95	0.129	0.1290	7.558	7.369
1.95	0.129	0.1434	7.159	7.349
1.95	0.129	0.2580	5.039	6.55
1.95	0.129	0.3870	3.779	5.527
1.95	0.129	0.5160	3.023	4.716
1.95	0.129	0.6450	2.519	4.094
1.95	0.129	0.7740	2.16	3.609
1.95	0.129	0.9030	1.89	3.224
1.95	0.129	1.0320	1.68	2.911
1.95	0.129	1.1610	1.512	2.653
1.95	0.129	1.2900	1.374	2.436

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ต่อร่วมกันแบบขนาน

อุณหภูมิ 150°C

ต่อขนาน 1 คู่					ต่อขนาน 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P	V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.123	0.0027	0.0000	45.56	0.000	0.123	0.00009	0.00000	1366.80	0.00
0.123	0.0027	0.0005	38.44	0.739	0.123	0.00009	0.00002	1139.00	23.35
0.123	0.0027	0.0007	36.18	0.916	0.123	0.00009	0.00002	1089.00	27.25
0.123	0.0027	0.0009	34.17	1.051	0.123	0.00009	0.00003	1025.00	31.52
0.123	0.0027	0.0014	30.00	1.260	0.123	0.00009	0.00005	911.10	37.36
0.123	0.0027	0.0018	27.33	1.345	0.123	0.00009	0.00006	820.00	40.34
0.123	0.0027	0.0027	22.78	1.401	0.123	0.00009	0.00009	683.30	42.03
0.123	0.0027	0.0039	18.69	1.356	0.123	0.00009	0.00013	559.10	40.64
0.123	0.0027	0.0054	15.19	1.245	0.123	0.00009	0.00018	455.60	37.36
0.123	0.0027	0.0081	11.39	1.051	0.123	0.00009	0.00027	341.70	31.52
0.123	0.0027	0.0108	9.11	0.897	0.123	0.00009	0.00036	273.30	26.90
0.123	0.0027	0.0135	7.59	0.778	0.123	0.00009	0.00045	227.80	23.35
0.123	0.0027	0.0162	6.51	0.686	0.123	0.00009	0.00054	195.20	20.58
0.123	0.0027	0.0189	5.69	0.613	0.123	0.00009	0.00063	170.80	18.39
0.123	0.0027	0.0216	5.06	0.553	0.123	0.00009	0.00072	151.90	16.60
0.123	0.0027	0.0243	4.56	0.504	0.123	0.00009	0.00081	136.70	15.13
0.123	0.0027	0.0270	4.14	0.463	0.123	0.00009	0.00090	124.20	13.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 177°C

ต่อขนาน 1 คู่					ต่อขนาน 30 คู่				
V _{oc}	R	R _L	I _{RL}	P	V _{oc}	R	R _L	I _{RL}	P
0.128	0.0028	0.0000	45.71	0.000	0.128	9.33333E-05	0.00000	1371.3	0.00
0.128	0.0028	0.0006	38.01	0.813	0.128	9.33333E-05	0.00002	1140.0	24.67
0.128	0.0028	0.0007	36.57	0.936	0.128	9.33333E-05	0.00002	1100.0	27.85
0.128	0.0028	0.0009	34.32	1.095	0.128	9.33333E-05	0.00003	1030.0	32.86
0.128	0.0028	0.0014	30.48	1.300	0.128	9.33333E-05	0.00005	912.1	39.10
0.128	0.0028	0.0019	27.41	1.405	0.128	9.33333E-05	0.00006	824.0	42.10
0.128	0.0028	0.0028	22.86	1.463	0.128	9.33333E-05	0.00009	685.7	43.89
0.128	0.0028	0.0040	18.91	1.419	0.128	9.33333E-05	0.00013	568.0	42.59
0.128	0.0028	0.0056	15.24	1.300	0.128	9.33333E-05	0.00019	456.6	38.99
0.128	0.0028	0.0084	11.43	1.097	0.128	9.33333E-05	0.00028	342.9	32.91
0.128	0.0028	0.0112	9.14	0.936	0.128	9.33333E-05	0.00037	274.5	28.10
0.128	0.0028	0.0140	7.62	0.813	0.128	9.33333E-05	0.00047	228.4	24.37
0.128	0.0028	0.0168	6.53	0.717	0.128	9.33333E-05	0.00056	195.9	21.50
0.128	0.0028	0.0196	5.71	0.640	0.128	9.33333E-05	0.00065	171.5	19.21
0.128	0.0028	0.0224	5.08	0.578	0.128	9.33333E-05	0.00075	152.3	17.33
0.128	0.0028	0.0252	4.57	0.527	0.128	9.33333E-05	0.00084	137.1	15.80
0.128	0.0028	0.0280	4.16	0.484	0.128	9.33333E-05	0.00093	124.7	14.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 200°C

ต่อขนาน 1 คู่					ต่อขนาน 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P	V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.111	0.003	0.0000	37.000	0.0000	0.111	0.0001	0.00000	1110.0	0.00
0.111	0.003	0.0006	30.830	0.5704	0.111	0.0001	0.00002	925.0	17.11
0.111	0.003	0.0008	29.210	0.6826	0.111	0.0001	0.00003	888.0	19.71
0.111	0.003	0.0010	27.750	0.7701	0.111	0.0001	0.00003	834.6	22.99
0.111	0.003	0.0015	24.670	0.9127	0.111	0.0001	0.00005	740.0	27.38
0.111	0.003	0.0020	22.200	0.9857	0.111	0.0001	0.00007	664.7	29.60
0.111	0.003	0.0030	18.500	1.0270	0.111	0.0001	0.00010	555.0	30.80
0.111	0.003	0.0041	15.630	1.0020	0.111	0.0001	0.00014	466.4	30.02
0.111	0.003	0.0060	12.330	0.9127	0.111	0.0001	0.00020	370.0	27.38
0.111	0.003	0.0090	9.250	0.7701	0.111	0.0001	0.00030	277.5	23.10
0.111	0.003	0.0120	7.400	0.6571	0.111	0.0001	0.00040	222.0	19.71
0.111	0.003	0.0150	6.167	0.5704	0.111	0.0001	0.00050	185.0	17.11
0.111	0.003	0.0180	5.286	0.5029	0.111	0.0001	0.00060	158.6	15.09
0.111	0.003	0.0210	4.625	0.4492	0.111	0.0001	0.00070	138.8	13.48
0.111	0.003	0.0240	4.111	0.4056	0.111	0.0001	0.00080	123.3	12.17
0.111	0.003	0.0270	3.700	0.3696	0.111	0.0001	0.00090	111.0	11.09
0.111	0.003	0.0300	3.364	0.3394	0.111	0.0001	0.00100	100.9	10.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 250°C

ต่อขนาน 1 คู่					ต่อขนาน 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P	V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.101	0.0034	0.0000	29.71	0.000	0.101	0.000113	0.00000	891.30	0.00
0.101	0.0034	0.0007	24.63	0.425	0.101	0.000113	0.00002	740.80	12.62
0.101	0.0034	0.0009	23.49	0.497	0.101	0.000113	0.00003	714.60	14.30
0.101	0.0034	0.0011	22.44	0.554	0.101	0.000113	0.00004	667.40	16.93
0.101	0.0034	0.0017	19.80	0.667	0.101	0.000113	0.00006	593.00	20.04
0.101	0.0034	0.0023	17.72	0.722	0.101	0.000113	0.00008	533.50	21.63
0.101	0.0034	0.0034	14.85	0.750	0.101	0.000113	0.00011	446.20	22.50
0.101	0.0034	0.0046	12.63	0.733	0.101	0.000113	0.00015	380.70	22.02
0.101	0.0034	0.0068	9.90	0.667	0.101	0.000113	0.00023	296.80	19.99
0.101	0.0034	0.0102	7.43	0.563	0.101	0.000113	0.00034	222.80	16.88
0.101	0.0034	0.0136	5.94	0.480	0.101	0.000113	0.00045	178.30	14.41
0.101	0.0034	0.0170	4.95	0.417	0.101	0.000113	0.00057	148.50	12.50
0.101	0.0034	0.0204	4.24	0.367	0.101	0.000113	0.00068	127.30	11.02
0.101	0.0034	0.0238	3.71	0.328	0.101	0.000113	0.00079	111.40	9.85
0.101	0.0034	0.0272	3.30	0.296	0.101	0.000113	0.00091	98.99	8.89
0.101	0.0034	0.0306	2.97	0.270	0.101	0.000113	0.00102	89.12	8.10
0.101	0.0034	0.0340	2.70	0.248	0.101	0.000113	0.00113	81.04	7.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 300°C

ต่อขนาน 1 คู่					ต่อขนาน 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P	V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.089	0.004	0.0000	22.25	0.000	0.089	0.000133	0.00000	667.50	0.00
0.089	0.004	0.0008	18.54	0.275	0.089	0.000133	0.00003	555.10	8.32
0.089	0.004	0.0010	17.80	0.317	0.089	0.000133	0.00003	535.10	9.45
0.089	0.004	0.0013	16.79	0.367	0.089	0.000133	0.00004	501.90	11.08
0.089	0.004	0.0020	14.83	0.440	0.089	0.000133	0.00007	444.30	13.22
0.089	0.004	0.0027	13.28	0.476	0.089	0.000133	0.00009	400.30	14.26
0.089	0.004	0.0040	11.13	0.495	0.089	0.000133	0.00013	334.20	14.85
0.089	0.004	0.00495	9.94	0.490	0.089	0.000133	0.00017	298.30	14.69
0.089	0.004	0.0080	7.42	0.440	0.089	0.000133	0.00027	222.30	13.20
0.089	0.004	0.0120	5.56	0.371	0.089	0.000133	0.00040	166.90	11.14
0.089	0.004	0.0160	4.45	0.317	0.089	0.000133	0.00053	133.60	9.51
0.089	0.004	0.0200	3.71	0.275	0.089	0.000133	0.00067	111.20	8.25
0.089	0.004	0.0240	3.18	0.243	0.089	0.000133	0.00080	95.36	7.27
0.089	0.004	0.0280	2.78	0.217	0.089	0.000133	0.00093	83.46	6.50
0.089	0.004	0.0320	2.472	0.1956	0.089	0.000133	0.00107	74.15	5.90
0.089	0.004	0.0360	2.225	0.1782	0.089	0.000133	0.00120	66.75	5.35
0.089	0.004	0.0400	2.023	0.1637	0.089	0.000133	0.00133	60.70	4.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 350°C

ต่อขนาน 1 คู่					ต่อขนาน 30 คู่				
V _{oc}	R	R _L	I _{RL}	P	V _{oc}	R	R _L	I _{RL}	P
0.075	0.0044	0.0000	17.050	0.000	0.075	0.000147	0.00000	511.50	0.000
0.075	0.0044	0.0009	14.210	0.178	0.075	0.000147	0.00003	426.90	5.286
0.075	0.0044	0.0011	13.640	0.205	0.075	0.000147	0.00004	408.30	6.170
0.075	0.0044	0.0015	12.780	0.240	0.075	0.000147	0.00005	383.30	7.199
0.075	0.0044	0.0022	11.360	0.284	0.075	0.000147	0.00007	341.40	8.510
0.075	0.0044	0.0029	10.230	0.307	0.075	0.000147	0.00010	306.50	9.209
0.075	0.0044	0.0044	8.523	0.320	0.075	0.000147	0.00015	255.40	9.588
0.075	0.0044	0.0051	7.937	0.318	0.075	0.000147	0.00017	238.30	9.544
0.075	0.0044	0.0088	5.682	0.284	0.075	0.000147	0.00029	170.60	8.526
0.075	0.0044	0.0132	4.261	0.240	0.075	0.000147	0.00044	127.80	7.191
0.075	0.0044	0.0176	3.409	0.205	0.075	0.000147	0.00059	102.20	6.134
0.075	0.0044	0.0220	2.841	0.178	0.075	0.000147	0.00073	85.26	5.328
0.075	0.0044	0.0264	2.435	0.157	0.075	0.000147	0.00088	73.05	4.696
0.075	0.0044	0.0308	2.131	0.140	0.075	0.000147	0.00103	63.90	4.194
0.075	0.0044	0.0352	1.894	0.126	0.075	0.000147	0.00117	56.83	3.789
0.075	0.0044	0.0396	1.705	0.115	0.075	0.000147	0.00132	51.14	3.452
0.075	0.0044	0.0440	1.550	0.106	0.075	0.000147	0.00147	46.48	3.169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 400°C

ต่อขนาน 1 คู่					ต่อขนาน 30 คู่				
V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P	V_{oc}	R	R_L	I_{RL}	P
0.065	0.0043	0.0000	15.120	0.000	0.065	0.000143	0.00000	453.60	0.000
0.065	0.0043	0.0009	12.500	0.141	0.065	0.000143	0.00003	377.20	4.126
0.065	0.0043	0.0011	12.040	0.159	0.065	0.000143	0.00004	362.50	4.729
0.065	0.0043	0.0014	11.400	0.182	0.065	0.000143	0.00005	339.70	5.540
0.065	0.0043	0.0022	10.000	0.220	0.065	0.000143	0.00007	301.90	6.561
0.065	0.0043	0.0029	9.028	0.236	0.065	0.000143	0.00010	271.60	7.081
0.065	0.0043	0.0043	7.558	0.246	0.065	0.000143	0.00014	227.00	7.369
0.065	0.0043	0.0048	7.143	0.245	0.065	0.000143	0.00016	215.00	7.349
0.065	0.0043	0.0086	5.039	0.218	0.065	0.000143	0.00029	151.00	6.548
0.065	0.0043	0.0129	3.779	0.184	0.065	0.000143	0.00043	113.40	5.527
0.065	0.0043	0.0172	3.023	0.157	0.065	0.000143	0.00057	90.74	4.718
0.065	0.0043	0.0215	2.519	0.137	0.065	0.000143	0.00072	75.55	4.093
0.065	0.0043	0.0258	2.160	0.120	0.065	0.000143	0.00086	64.78	3.609
0.065	0.0043	0.0301	1.890	0.108	0.065	0.000143	0.00100	56.70	3.225
0.065	0.0043	0.0344	1.680	0.097	0.065	0.000143	0.00115	50.38	2.911
0.065	0.0043	0.0387	1.512	0.088	0.065	0.000143	0.00129	45.35	2.653
0.065	0.0043	0.0430	1.374	0.081	0.065	0.000143	0.00143	41.24	2.437

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้