

อุปกรณ์ไฮบริดเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์
อย่างมีประสิทธิภาพ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

SOLAR CELL/THERMOELECTRIC HYBRID DEVICE FOR EFFICIENT UTILIZATION OF SOLAR
ENERGY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ไฮบริดเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ
โดย	น.ส.สุทธิดา จงอุดมฤกษ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นิสิต ตัณฑวิเชฐ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.พิชญ พัฒนสัตยวงศ์)

สุพธิดา จงอุดมฤกษ์ : อุปกรณ์ไฮบริดเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการใช้พลังงาน
แสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ. (SOLAR CELL/THERMOELECTRIC HYBRID DEVICE
FOR EFFICIENT UTILIZATION OF SOLAR ENERGY) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ณัฐพล ภู
ตระกูลโชติ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย

ในงานวิจัยที่ผ่านมาเรามีแนวความคิดสร้างอุปกรณ์ร่วมระหว่างเซลล์สุริยะและเทอร์โมอิเล็กทริก
เพื่อใช้แปลงพลังงานจากแสงและความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม
ตาม อุปกรณ์ร่วมดังกล่าวผลิตจากวัสดุที่มีโลหะหนักและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้
ศึกษาสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดพอลิ(3,4เอททิลีนไดออกซีไทโอฟีน):
พอลิ(สไตรีนซัลโฟเนต) (PEDOT:PSS) เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทดแทนวัสดุที่เป็นพิษ
ดังกล่าวข้างต้น จากผลการทดสอบเบื้องต้น พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS เมื่อเติมสารเจือชนิด
เอททิลีนไกลคอล (EG) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณร้อยละของ EG เพิ่มขึ้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์ซีเบกมีค่าคงที่
และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $20.0 \pm 0.1 \mu\text{V/K}$ เมื่อเติมสารเจือชนิดไฮดราซีนไฮเดรต ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก
อย่างไรก็ตาม สภาพนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS เจือด้วย EG ร้อยละ 48 โดยน้ำหนักมีค่าลดลงอย่างมี
นัยสำคัญเมื่อเติมสารเจือชนิดไฮดราซีนไฮเดรต เมื่อพิจารณาผลของแพกเตอร์กำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่
 $4.38 \pm 0.40 \mu\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^2$ เมื่อเติมสารเจือ EG ร้อยละ 48 โดยน้ำหนักและปราศจากการเจือด้วยสารเจือ
ชนิดไฮดราซีนไฮเดรต ผลการนำสารละลาย PEDOT:PSS ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก
มาขึ้นรูปเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อใช้ในอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า อุปกรณ์ร่วม
เซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าเซลล์สุริยะเดี่ยวได้ถึง ร้อยละ 15 ที่
ผลต่างอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสระหว่างฝั่งด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ผลงานวิจัยที่ได้
สามารถใช้เป็นพื้นฐานเพื่อต่อยอดแนวคิดสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก
สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกฐานพอลิ
เมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6072006323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD:

Suthida Chongudomlerk : SOLAR CELL/THERMOELECTRIC HYBRID DEVICE FOR EFFICIENT UTILIZATION OF SOLAR ENERGY. Advisor: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Somchai Kiatgamolchai, Ph.D.

To generate electrical power from both sunlight and sun heat simultaneously, the concept of hybrid photovoltaic (PV) and thermoelectric (TE) solar converter has been proposed. Recent research on PV/TE devices are based on heavy metals which are toxic to environment. This research investigates the thermoelectric properties of the functional polymer; poly (3,4-ethylenedioxythiophene) - poly (styrenesulfonate) (PEDOT:PSS), and its use as thermoelectric materials incorporate with the PV device to obtain the efficient hybrid PV/TE solar converter. Preliminary results reveal that the electrical conductivity of PEDOT:PSS proportionally increases with an addition of 0-48% weight of ethylene glycol(EG); the Seebeck coefficient remains unchanged. The Seebeck coefficient of PEDOT:PSS reads $20.0 \pm 0.1 \mu\text{V/K}$ when 1.58% weight of hydrazine hydrate was added. However, the electrical conductivity of PEDOT:PSS mixed with 48% of EG drops significantly with increasing hydrazine hydrate content in it. The maximum power factor of $4.38 \pm 0.40 \mu\text{W/m} \cdot \text{K}^2$ was obtained from PEDOT:PSS with 48% weight of EG without hydrazine hydrate. The results suggest that EG modified PEDOT:PSS can be further applied to produce the hybrid solar cell/thermoelectric device. Preliminary tests showed that this hybrid solar cell/thermoelectric device generates the power output 15% higher than solar cell alone at different temperature 35°C between cold side and hot side of thermoelectric material. The results provide the novel strategy to utilize solar energy to generate power effectively using an environmental-friendly, polymer-based hybrid device.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะความช่วยเหลือและการให้คำแนะนำของอาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและคอยชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานคณะกรรมการบริหารหลักสูตรมหาบัณฑิตเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประธานสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นิสิต ตัมทิวีเชฐ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.พิชญ พัฒนสัตยวงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ สำนักวิชาวิทยาโมเลกุล สถาบันวิทยสิริเมธี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิจงศ์ ฉัตรภรณ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบสมรรถนะของเซลล์สุริยะ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความรู้และให้การสนับสนุนตลอดมา

ขอขอบคุณทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากกลุ่มวิจัยด้านวัสดุพลังงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Physics of Energy Materials Research Unit) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ ตลอดจนช่างเทคนิคทั้งในส่วนของภาควิชาเคมีเทคนิคและคณะวิทยาศาสตร์ในคำแนะนำและการอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณบิดา- มารดา พี่ เพื่อนและน้องทั้งในภาควิชาเคมีเทคนิคและภายนอก สำหรับกำลังใจ การสนับสนุนและความช่วยเหลือที่มีให้ตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุทธิดา จงอุดมฤกษ์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริก.....	5
2.2 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	8
2.2.1 รูปแบบการจัดวางตัวของวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก.....	8
2.2.2 รูปแบบลวดลายวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก.....	8
2.2.3 การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก.....	9
2.2.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	9

2.2.5 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	11
2.3 เซลล์สุริยะ.....	15
2.3.1 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน.....	15
2.3.2 การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน	15
2.4 ระบบร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก	17
2.4.1 สมบัติของเซลล์สุริยะเนื่องจากฟังก์ชันของอุณหภูมิ	17
2.4.2 สมบัติของเซลล์สุริยะเนื่องจากฟังก์ชันของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์	18
2.4.3 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	19
2.4.4 มอดูลโฟโตวอลเทจิกและมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรม	19
2.5 ตารางสรุปงานวิจัยทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์สุริยะและระบบ ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	22
3.1 วิธีการเตรียมสาร (Preparation method)	23
3.1.1 การปรับปรุงสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS (Modifying the electrical properties of PEDOT:PSS solution).....	23
3.1.2 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางของสารละลาย PEDOT:PSS (Forming the PEDOT:PSS thin film).....	23
3.2 สมบัติเชิงไฟฟ้า (Electrical properties).....	24
3.2.1 การทดสอบสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง (electrical conductivity and Seebeck coefficient at room temperature).....	24
3.3 การวางชุดลายวงจรไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module patterning).26	
3.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics)	27
3.4.1 การออกแบบเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	27

3.4.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน.....	29
3.4.3 การออกแบบเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	31
4.1 สมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Electrical properties of conductive polymer)	32
4.1.1 สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (Electrical conductivity at room temperature) .	32
4.1.2 สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง (Seebeck coefficient at room temperature)..	34
4.1.3 แฟกเตอร์กำลัง (Power factor: PF).....	35
4.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	36
4.2.1 ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์	37
4.2.2 ทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล	38
4.3 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของเซลล์สุริยะ.....	42
4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ.....	42
4.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก	46
4.4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก.....	46
4.4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเซลล์สุริยะ.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุปผลการทดลอง	53
5.1.1 สมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Electrical properties of conductive polymer).....	53
ก. สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (Electrical conductivity at room temperature)	53

ข. สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง (Seebeck coefficient at room temperature)
53

ค. แฟกเตอร์กำลัง(Power factor: PF)53

5.1.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก54

 ก. ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก.....54

 ข. ผลของจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....54

5.1.3 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของเซลล์สุริยะ55

5.1.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก55

 ก. ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก.....55

 ข. ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเซลล์สุริยะ55

5.2 ข้อเสนอแนะ56

5.3 อภิปรายผล57

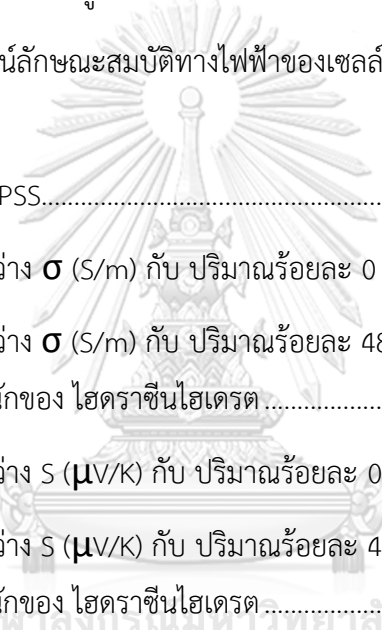
บรรณานุกรม59

ภาคผนวก61

ประวัติผู้เขียน74

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 การเคลื่อนที่ของโฟนอนและอิเล็กตรอนในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	5
รูปที่ 2. 2 วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหล	6
รูปที่ 2. 3 รูปแบบการจัดวางตัวของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำแบบพี [8].....	8
รูปที่ 2. 4 การเชื่อมต่อและลวดลายวงจรเทอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรมและแบบขนาน [9].....	8
รูปที่ 2. 5 รูปแบบวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายของเทอร์โมอิเล็กทริก [12].....	10
รูปที่ 2. 6 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (เส้นโค้ง V-I และ P-I) [12].....	11
รูปที่ 2. 7 การเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรมของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก [12].....	12
รูปที่ 2. 8 การเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรมของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก [12].....	12
รูปที่ 2. 9 วงจรสมมูลของเทวินิน [13].....	13
รูปที่ 2. 10 วงจรแรงดันเทวินิน [13].....	13
รูปที่ 2. 11 วงจรหาความต้านทานเทวินิน [13].....	14
รูปที่ 2. 12 วงจรกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด [13].....	14
รูปที่ 2. 13 การเกิดคู่อิเล็กตรอน – หลุมด้วยแสงที่ตกกระทบ [15].....	15
รูปที่ 2. 14 วงจรไฟฟ้าสมมูล [16].....	16
รูปที่ 2. 15 สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [17].....	16
รูปที่ 2. 16 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [18].....	18
รูปที่ 2. 17 ผลของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่อลักษณะเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [18].....	18
รูปที่ 2. 18 กราฟลักษณะสมบัติ I-V และ P-V ของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลต่างอุณหภูมิต่าง ๆ [20].....	19
รูปที่ 3. 1 กระบวนการเตรียมสารละลาย PEDOT:PSS สำหรับใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	23
รูปที่ 3. 2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง PEDOT:PSS.....	24
รูปที่ 3. 3 8 รูปแบบการเก็บข้อมูลวัดแบบวิธี แวน เดอ พาว [21]	25

รูปที่ 3. 4 การวัดสัมประสิทธิ์ของแผ่นฟิล์มบาง PEDOT:PSS.....	26
รูปที่ 3. 5 แผนภาพแสดงการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง	26
รูปที่ 3. 6 แผนภาพขั้นตอนการวางชุดลายวงจรไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS.....	27
รูปที่ 3. 7 แผนภาพขั้นตอนการเชื่อมต่อทางวงจรไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS.....	27
รูปที่ 3. 8 แผนภาพของเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	28
รูปที่ 3. 9 ชุดเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก	29
รูปที่ 3. 10 แผนภาพของเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก 30	
รูปที่ 3. 11 ชุดเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก	30
	
รูปที่ 4. 1 แผ่นฟิล์ม PEDOT:PSS.....	32
รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ (S/m) กับ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนักของ EG.....	33
รูปที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ (S/m) กับ ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนักของ EG และ ปริมาณ ร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนักของ ไฮดราซีนไฮเดรต	33
รูปที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง S ($\mu\text{V/K}$) กับ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนักของ EG	34
รูปที่ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง S ($\mu\text{V/K}$) กับ ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนักของ EG และ ปริมาณ ร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนักของ ไฮดราซีนไฮเดรต	35
รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง PF ($\mu\text{W/mK}^2$) กับ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนักของ EG....	35
รูปที่ 4. 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง PF ($\mu\text{W/mK}^2$) กับ ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนักของ EG และ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนักของ ไฮดราซีนไฮเดรต	36
รูปที่ 4. 8 เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด PEDOT:PSS	36
รูปที่ 4. 9 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ ผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C ตามลำดับ.....	37
รูปที่ 4. 10 เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด PEDOT:PSS	39
รูปที่ 4. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด กระแสไฟฟ้า ลัดวงจรและความต้านทานภายในของมอดูลกับผลต่างอุณหภูมิ	40

รูปที่ 4. 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่สภาวะความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ 0.1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิห้องในช่วง 25°C - 27°C.....	43
รูปที่ 4. 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่ความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงคงที่อยู่ในช่วง 21,980 - 22,100 lx ที่สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะแตกต่างกัน.....	44
รูปที่ 4. 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์สุริยะกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ	45
รูปที่ 4. 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงคงที่อยู่ในช่วง 21,980 - 22,100 lx ที่สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะแตกต่างกัน	47
รูปที่ 4. 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด ของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ.....	48
รูปที่ 4. 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงให้คงที่อยู่ในช่วง 21,980 - 22,100 lx ที่สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ $85\pm 3^{\circ}\text{C}$	49
รูปที่ 4. 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะเทียบกับเซลล์สุริยะ	50
รูปที่ 4. 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์สุริยะเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ	51
รูปที่ 5. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อปรับอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 4. 17.....	58

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1	ข้อดีและข้อเสียของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน	15
ตารางที่ 2. 2	ตารางสรุปงานวิจัยทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์สุริยะและระบบรวมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก	20
ตารางที่ 4. 1	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C	38
ตารางที่ 4. 2	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในงานวิจัยทั้งหมด 5 เซลล์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C	38
ตารางที่ 4. 3	ข้อมูลลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลที่ประกอบจากเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 2 เซลล์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C	41
ตารางที่ 4. 4	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลในงานวิจัย 2, 3, 4 และ 5 มอดูลที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C	42
ตารางที่ 4. 5	กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่สภาวะความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ 0.1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิห้องในช่วง 25°C - 27°C	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกกำลังเผชิญกับวิกฤตขาดแคลนพลังงาน พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลกำลังจะหมดไปนำไปสู่การขาดแคลนพลังงานในอีกไม่ช้า พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพเพียงพอที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่มีวันหมด พลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ พลังงานแสงและพลังงานความร้อน เซลล์สุริยะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่เซลล์สุริยะทั่วไปไม่สามารถแปลงพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า [1]

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากเสนอแนวทางพัฒนาเซลล์สุริยะให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจากทั้งพลังงานแสงและความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์ เช่น การพัฒนาประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะและเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีการอย่างง่าย ผลลัพธ์ที่ได้คือเมื่อผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 15 องศาเซลเซียส อุปกรณ์ร่วมดังกล่าวให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์สุริยะทั่วไปถึงร้อยละ 30 [2] นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยอื่นในสาขาเดียวกันนำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะและเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ทุกช่วงความยาวคลื่นและพลังงานความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์ [3] อย่างไรก็ตาม วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในงานวิจัยเหล่านี้ประกอบด้วยโลหะหนัก อาทิ บิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) เลดเทลลูไรด์ (PbTe) และอื่น ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม [4]

เพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องดังกล่าว งานวิจัยในช่วงหลายปีต่อมา จึงสนใจพัฒนาวัสดุอินทรีย์เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ พอลิอะนิลีน พอลิ(3,4เอททิลีนไดออกซีไทโอฟีน) (PEDOT) และอนุพันธ์ ทดแทนการใช้โลหะหนัก เนื่องจากขึ้นรูปง่าย ราคาไม่สูงมากนัก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และที่สำคัญคือมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (0.028 ถึง 0.6 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน) ซึ่งเป็นสมบัติที่เหมาะสมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [5]

ในบรรดาพอลิเมอร์นำไฟฟ้างกล่าว พอลิ(3,4เอททิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิ(สไตรีนซัลโฟเนต) (PEDOT:PSS) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าสูง แต่ค่าการนำความร้อนต่ำ (0.6 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน) ซึ่งเป็นสมบัติที่เหมาะสมของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่รายงานวิธีการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้สารละลายอินทรีย์ เช่น เอททิลีนไกลคอล (EG) ไดเมทิลซัลโฟลไซด์ (DMSO) [6] รวมถึงการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีการอย่าง

ง่าย เช่น การพิมพ์สกรีน (screen printing) ดอกรเตอร์เบลต (doctor blade) การหยดหล่อ (drop casting) เป็นต้น[5]

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติและผลของรูปแบบการจัดวางของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
2. ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์สุริยะเมื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดพอลิ(3,4เอททีลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิ(สไตรีนซัลโฟเนต)มาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าร่วมกับเซลล์สุริยะเพื่อการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัย
3. เตรียมวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
 - เตรียมหมึกพอลิเมอร์ประกอบด้วยสารละลาย PEDOT:PSS ผสมด้วยสารละลายอินทรีย์ ได้แก่ เอททีลีนไกลคอล (Ethylene glycol) และ ไฮดราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate)
4. จัดวางรูปแบบของฟิล์มเทอร์โมอิเล็กทริก
 - สร้างเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยวิธีการหยดหล่อ (Drop casting) หมึกพอลิเมอร์ลงบนกระดาษหนา 260 แกรมลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางด้วยรูปทรงขนาด 2.5×40×5 มิลลิเมตร
 - เชื่อมต่อฟิล์ม PEDOT:PSS ในแต่ละเซลล์ให้เป็นวงจรอนุกรมด้วยสีฟันทเงิน
 - ใช้เทปหรือกาวนำความร้อนยึดติดเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์เข้าด้วยกันโดยใช้สีฟันทเงินเพื่อเชื่อมต่อระหว่างเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์เข้าด้วยกันเพื่อประกอบเป็นมอดูล
5. ประกอบอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะและเทอร์โมอิเล็กทริก
 - ติดตั้งแผงเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกเข้าที่ด้านหลังของเซลล์สุริยะโดยกาวนำความร้อนเป็นตัวประสานเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากเซลล์สุริยะมาสู่แผงเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในส่วน

ของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลถูกประกบด้วยแผ่นอลูมิเนียม 2 แผ่นที่ฝั่งด้านร้อนเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากเซลล์สุริยะมาสู่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมากขึ้น

6. วิเคราะห์เซลล์สุริยะและวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก

- วิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเทคนิค Van der Pauw
- วิเคราะห์สัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้เข็มร้อน (hot probe)
- วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ วงจรเทอร์โมอิเล็กทริกและ อุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics)

7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดพอลิ(3,4เอททิลีนไดออกซีไทโอเฟน):พอลิ(สไตรีนซัลโฟเนต)เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อประกอบเป็นอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะและเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานแสงและความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้อธิบายสมบัติ หลักการพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ วัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์สุริยะและระบบร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีหัวข้อในการนำเสนอ ดังนี้

2.1 วัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริก

2.2 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

2.2.1 รูปแบบการจัดวางตัวของวงจรถอร์โมอิเล็กทริก

2.2.2 รูปแบบลวดลายวงจรถอร์โมอิเล็กทริก

2.2.3 การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

2.2.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

2.2.5 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

2.3 เซลล์สุริยะ

2.3.1 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์สุริยะ

2.3.2 การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน

2.4 ระบบร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

2.4.1 สมบัติของเซลล์สุริยะเนื่องจากฟังก์ชันของอุณหภูมิ

2.4.2 สมบัติของเซลล์สุริยะเนื่องจากฟังก์ชันของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

2.4.3 สมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเนื่องจากฟังก์ชันของอุณหภูมิ

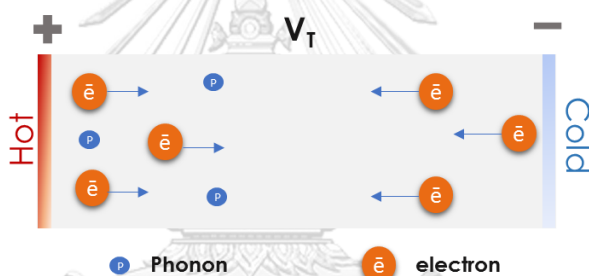
2.4.4 มอดูลโฟโตวอลเทอิกและมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรม

2.5 ตารางสรุปงานวิจัยทางวัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์สุริยะและระบบร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

โดยหัวข้อทั้งหมดสามารถแสดงรายละเอียดได้ตามหัวข้อข้างต้นดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุทางเทอร์โมอิเล็กทริก

คำว่า“เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric)” เกิดจากการผสมกันระหว่างคำว่า เทอร์โม (thermo) ซึ่งแปลว่า ความร้อน และอิเล็กทริก (electric) ซึ่งแปลว่า ไฟฟ้า กล่าวคือเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องระหว่างความร้อนและไฟฟ้า เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างปลายทั้ง 2 ข้าง พลังงานความร้อนในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดการสั่นสะเทือนของอนุภาคภายในโครงสร้างของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ในเชิงควอนตัมฟิสิกส์ การสั่นสะเทือนดังกล่าวเรียกว่า โฟนอน(phonon) จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1821 นักฟิสิกส์ชาวเอสโทเนีย นามว่า Thomas Johann Seebeck ได้ค้นพบปรากฏการณ์บางอย่างโดยบังเอิญว่า ในโลหะหลายชนิด ความร้อนส่วนหนึ่งสามารถถ่ายเทโดยประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect)

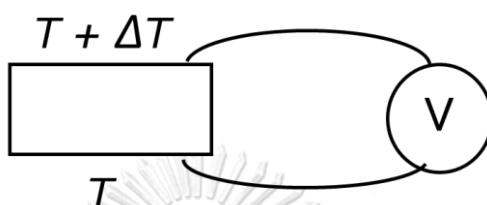


รูปที่ 2. 1 การเคลื่อนที่ของโฟนอนและอิเล็กตรอนในวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 2.1 แสดงกลไกการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก จะเห็นว่า โฟนอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าสู่บริเวณที่เย็นกว่า ในขณะที่ อิเล็กตรอนอิสระที่มีโมเมนตัมขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกันจะสามารถเคลื่อนที่ได้สองทิศทาง โดยอิเล็กตรอนกลุ่มแรกได้รับอิทธิพลจากพลังงานความร้อนและจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าไปสู่ที่เย็นกว่า จนเกิดการสะสมของอิเล็กตรอนที่บริเวณฝั่งเย็นส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้า (V_T) ระหว่างฝั่งร้อนและฝั่งเย็นกลายเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและลบตามลำดับ แรงดันไฟฟ้านี้ก่อให้เกิดกระแสของอิเล็กตรอนไหลย้อนกลับจากฝั่งเย็นกลับสู่ฝั่งร้อน ซึ่งเกิดจากความไม่สมดุลของอุณหภูมิเป็นเหตุให้เกิดแรงดันไฟฟ้า เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้างกล่าวหารด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิ ณ ขณะนั้น จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นสมบัติเฉพาะตัวของสาร เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient)

ปรากฏการณ์ซีเบกเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้า เริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายของตัวพาหะประจุอย่างสม่ำเสมอ แต่ภายใต้อุณหภูมิเกรเดียนต์หนึ่ง พาหะ

อิสระต่าง ๆ ที่ปลายด้านร้อน (hot end) จะมีพลังงานจลน์สูงกว่าที่ปลายด้านเย็น (cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น ก่อให้เกิดการสะสมของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (back electromotive force หรือ back emf) ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลของประจุ ที่สภาวะสมดุลผลรวมของทั้งสองสนามเป็นศูนย์และประจุสุทธิที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่ง ๆ เป็นศูนย์ ความต่างศักย์วงจรถัดเมื่อไม่มีกระแสไหลเกิดขึ้น เรียกว่า ความต่างศักย์ซีเบก (Seebeck voltage) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหล

สำหรับสมการของปรากฏการณ์ซีเบก (Seebeck effect) ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจะได้ว่า

$$S = \frac{dV}{dT} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

โดย ΔV = แรงดันไฟฟ้า (V)

S = สัมประสิทธิ์ซีเบก (V/K)

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิ (K)

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์จะเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุนั้น ๆ เช่น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด N จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นลบเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระที่ไม่สามารถจับตัวกับบอระดอมข้างเคียงเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิเกิดขึ้น ในขณะที่ชนิด P จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกเป็นบวกเนื่องจากหลุมว่างของอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกหลุมว่างนี้ว่าโฮลและมีประจุเป็นบวกเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิเกิดขึ้น เป็นต้น

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องมีสมบัติ ดังนี้

1. สามารถให้สภาพนำไฟฟ้าสูงแต่เกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดขึ้นจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า) สามารถพิจารณาจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งแปรผกผันกับสภาพนำไฟฟ้า
2. สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้มาก (แปลง ΔT เป็น ΔV) สามารถพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกที่สูง
3. มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุซึ่งจะทำให้คงสภาพ ΔT ไว้ได้ สามารถพิจารณาจากค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ

สมบัติทั้ง 3 ประการนี้ มีความสัมพันธ์กันด้วยหลักการทางฟิสิกส์ตามสมการ (2.2) สำหรับใช้บ่งชี้สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ (Z)

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

เมื่อ Z คือ ฟิกเกอร์ ออฟ เมอร์ริท ($1/K$)

S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก (V/K)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)

K คือ สภาพนำความร้อน ($W/m \cdot K$)

เนื่องจาก Z มีหน่วยเป็นต่ออุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติค่าบ่งชี้ที่เปรียบเทียบกันได้ง่ายควรจะมีหน่วย เรียกว่า figure of merit ดังนั้นจึงมีการคูณสมการ (2.2) ด้วย T ได้สมการใหม่เป็น ZT โดยที่ T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขณะทำงาน ค่า ZT จึงเป็นค่า figure of merit ที่ใช้บ่งบอกถึงสมบัติการเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และสมบัติการทำความเย็นสูงสุดของวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนของประกอบ (Thermo-element) ของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก แต่สภาพนำความร้อนจะไม่ถูกนำมาพิจารณามากนัก เนื่องจากในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพนำความร้อนทำได้ค่อนข้างยาก ทำให้ตัวแปรที่สนใจมีเพียง 2 ตัวแปร และนิยามเป็นปริมาณใหม่เรียกว่า Power factor สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.3) [7]

$$P = \frac{S^2}{\rho} \quad (2.3)$$

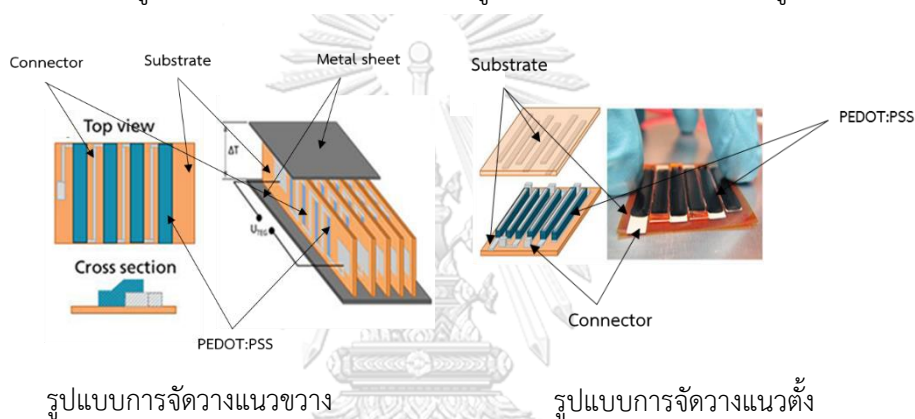
เมื่อ P คือ Power factor ($W/m \cdot K^2$)

2.2 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

2.2.1 รูปแบบการจัดวางตัวของวงจรถอร์โมอิเล็กทริก

รูปแบบวงจรถอร์โมอิเล็กทริกทั่วไปเมื่อแบ่งตามชนิดของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบพีและเอ็น (P type – N type) และ รูปแบบที่ใช้เฉพาะชนิดสารกึ่งตัวนำแบบพี

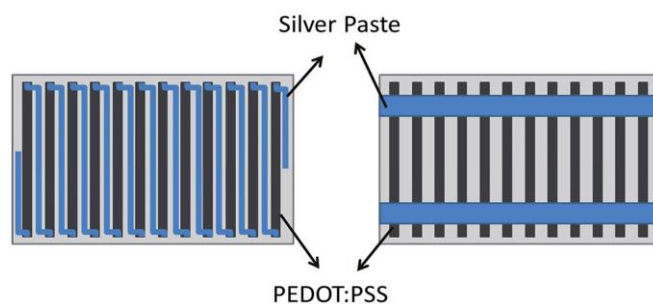
เนื่องจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้ในงานวิจัย คือ PEDOT:PSS ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำแบบพี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเฉพาะรูปแบบวงจรถอร์โมอิเล็กทริกที่ใช้เฉพาะเฉพาะชนิดสารกึ่งตัวนำแบบพีเท่านั้น ซึ่งรูปแบบวงจรถอร์โมอิเล็กทริกชนิดนี้สามารถแบ่งรูปแบบการจัดวางตัวของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกเป็น 2 รูปแบบย่อย ได้แก่ รูปแบบการจัดวางแนวขวาง และรูปแบบการจัดวางแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.3[8]



รูปที่ 2. 3 รูปแบบการจัดวางตัวของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำแบบพี [8]

2.2.2 รูปแบบลวดลายวงจรถอร์โมอิเล็กทริก

Qingshuo Wei และคณะ (2557)[9] ได้ศึกษาวิธีการขึ้นรูปและเชื่อมต่อลวดลายวงจรถอร์โมอิเล็กทริกเริ่มต้นจากการสกรีนสารละลาย PEDOT:PSS ลงบนตัวรองรับที่ทำจากกระดาษหนา 300 ไมโครเมตรจากนั้นใช้สีพิมพ์เงินเชื่อมต่อระหว่าง PEDOT:PSS แต่ละแท่งเป็นลวดลายวงจรถอร์มูกรมและวงจรถอนานให้เป็นวงจรไฟฟ้าเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2. 4 การเชื่อมต่อและลวดลายวงจรถอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรมและแบบขนาน [9]

2.2.3 การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

เมื่อนำพลังงานความร้อนถ่ายเทให้กับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ฝั่งด้านร้อนและระบายความร้อนออกจากฝั่งด้านเย็น เพื่อให้เกิดผลต่างอุณหภูมิระหว่างทั้งสองฝั่ง ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพาหะ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นวัสดุที่มีพาหะโฮลอิสระมากหรือแสดงประจุบวกซึ่งทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอมแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกันหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันได้ครบ ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ขาดอิเล็กตรอน 1 ตัวที่จะจับตัวกับอะตอมข้างเคียงทำให้เกิดหลุมว่างของอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกหลุมว่างนี้ว่า “โฮล” ซึ่งมีประจุเป็นบวก เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัสดุจะทำให้โฮลเกิดการเคลื่อนที่ ก่อให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรงได้[10]

2.2.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

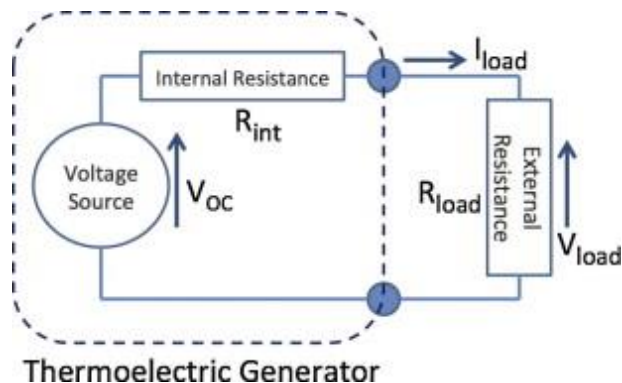
การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำได้โดยต่อตัวนำเข้ากับเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายทั้งสองเทอร์โมอิเล็กทริกจะให้พลังงานออกมา พลังงานนี้จะจ่ายให้กับอิเล็กตรอนให้พาประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปจึงเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปร ได้แก่ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์ ความต่างศักย์ภายในเซลล์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์ นิยามว่า “ถ้าประจุไฟฟ้าจำนวน 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่จากขั้วบวกไปยังขั้วลบของเซลล์ โดยผ่านเส้นลวดหรือความต้านทานภายนอกเซลล์ จำนวนพลังงานเป็นจูลที่ลื่นไป คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์ มีหน่วยเป็น จูล/คูลอมบ์ หรือโวลต์”[11]

ความต่างศักย์ภายในเซลล์ นิยามว่า “ถ้าประจุไฟฟ้าจำนวน 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้า โดยผ่านภายในเซลล์นั้นจำนวนพลังงานเป็นจูลที่ลื่นไป คือ ค่าความต่างศักย์ภายในเซลล์ มีหน่วยเป็น จูล/คูลอมบ์ หรือโวลต์”[11]

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (E) นิยามว่า “ถ้าประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่ในวงจรไฟฟ้าจนครบพอดี”[จากขั้วบวกไปยังขั้วลบผ่านตัวต้านทาน (R) ภายนอกเซลล์ และจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ผ่านเซลล์ไฟฟ้าภายใน (r)] จำนวนพลังงานที่ลื่นไป คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์นั้น มีหน่วยเป็นจูลต่อคูลอมบ์ หรือโวลต์ [11]

จากนิยามของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์ และความต่างศักย์ภายในเซลล์ ในการเคลื่อนประจุ 1 หน่วย ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.5[11]



รูปที่ 2.5 รูปแบบวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายของเทอร์โมอิเล็กทริก [12]

พลังงานทั้งหมด = พลังงานที่ใช้ภายนอก + พลังงานที่ใช้ภายใน

จะได้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้า = ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์ + ความต่างศักย์ภายในเซลล์

เมื่อ I คือ กระแสที่ไหลในวงจร

E คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า

$V_{\text{ภายนอก}}$ คือ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์

$V_{\text{ภายใน}}$ คือ ความต่างศักย์ภายในเซลล์

จะได้ว่า

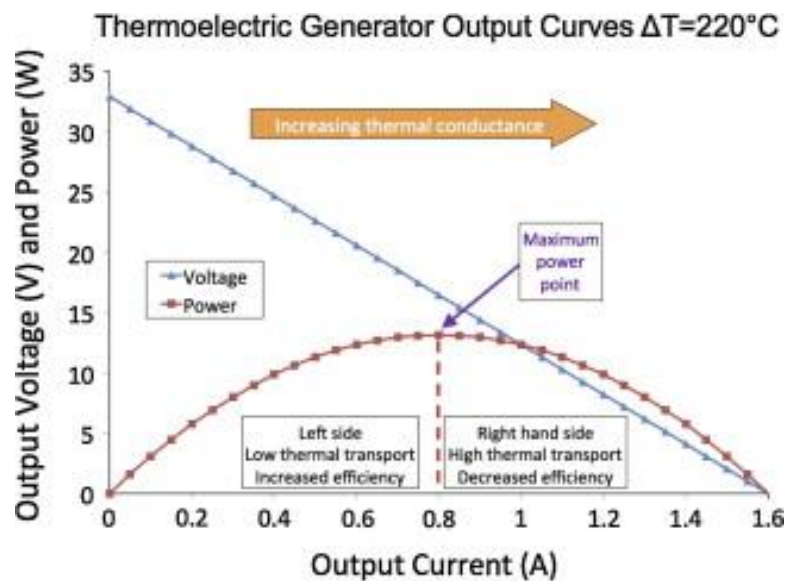
$$E = V_{\text{ภายนอก}} + V_{\text{ภายใน}}$$

$$E = IR + Ir$$

$$IR = -Ir + E$$

(2.4)

จากสมการที่ 2.4 หากสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{\text{ภายนอก}}$ และ I ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (กราฟเส้นสีน้ำเงิน) จะสามารถหาค่า r และ E ได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟ ตามลำดับ และเมื่อนำค่า $V_{\text{ภายนอก}}$ และ I ในแต่ละจุดมาคูณกันจะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้า (P) และ กระแสไฟฟ้า (I) ดังแสดงรูปที่ 2.6 (กราฟเส้นสีแดง) [12]



รูปที่ 2. 6 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (เส้นโค้ง V-I และ P-I) [12]

2.2.5 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

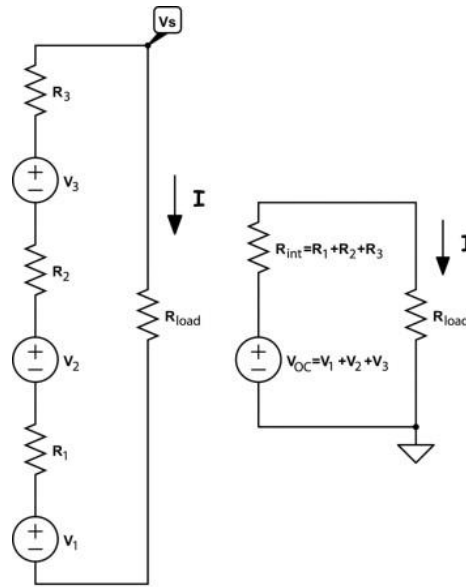
Andrea Montecucco และคณะ (2557) [12] ได้ศึกษาผลของการเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลซึ่งเกิดจากการนำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นย่อยมาต่อรวมกัน กล่าวว่า การเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้สภาวะผลต่างอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันสามารถเชื่อมต่อกันได้ 2 วิธี ได้แก่ การเชื่อมต่อเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรมและขนาน

- การเชื่อมต่อเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรม

การเชื่อมต่อเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรม คือ การนำเอาเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกมาเรียงต่อกัน โดยนำขั้วของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีขั้วต่างกันมาต่อเข้าด้วยกันแล้วนำเอาขั้วที่เหลือไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับผลรวมแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์รวมกัน และค่าความต้านทานรวมของวงจรมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าความต้านทานแต่ละเซลล์รวมกัน ดังนั้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.5 [12]

$$I = \frac{V_{oc} - V_s}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.5)$$

เมื่อ V_s คือ แรงดันไฟฟ้าที่ปลายแถว (array's terminals)



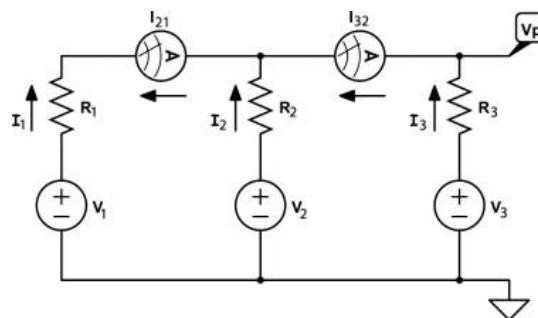
รูปที่ 2. 7 การเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรมของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก [12]

- การเชื่อมต่อเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบขนาน

การเชื่อมต่อเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบขนาน คือ การนำเอาเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์ที่เหมือนกันมาต่อเข้าด้วยกันแล้วนำเอาขั้วของเซลล์ที่ต่อขนานไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์ และค่าความต้านทานรวมของวงจรมีค่าเท่ากับส่วนผกผันของผลรวมของค่าความต้านทานแต่ละเซลล์รวมกัน ดังนั้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.6 [12]

$$I_1 = \frac{V_1 - V_p}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2 - V_p}{R_2}, \quad I_3 = -I_1 - I_2 \quad (2.6)$$

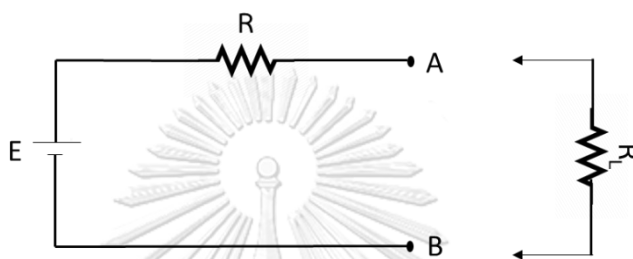
เมื่อ V_p คือ แรงดันไฟฟ้าที่ปลายแฉว (array's terminals)



รูปที่ 2. 8 การเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรมของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก [12]

เนื่องจากในการแก้ปัญหาวงจรไฟฟ้าทั้งการเชื่อมต่อเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรมและขนานมีความยุ่งยากและซับซ้อน เพื่อคาดการณ์ผลวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าจากเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อนำมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนาน สามารถใช้ทฤษฎีของเทวินิน (ผศ.ดร. วิษณุ บัวเทศ และคณะ, 2558) [13] ช่วยในการพิจารณา ดังมีรายละเอียด ดังนี้

ทฤษฎีเทวินิน เหมาะสำหรับหาค่ากระแสไหลผ่านตัวต้านทานตัวใดตัวหนึ่งที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป แต่ก็ยังสามารถหาค่ากระแสไหลผ่านความต้านทานนั้นได้ โดยไม่ต้องตั้งสมการใหม่

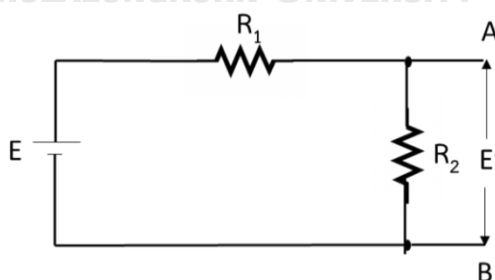


รูปที่ 2. 9 วงจรสมมูลของเทวินิน [13]

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าวงจรไฟฟ้าสามารถยุบหรือรวมวงจรไฟฟ้า ให้อยู่ในรูปของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งตัวและตัวต้านทานหนึ่งตัวได้ เรียกว่า วงจรสมมูลของเทวินิน

การเขียนสมการของวงจรสมมูลเทวินิน พิจารณาตามขั้นตอนได้ดังนี้

1. ปลดโหลด R_L ออกจากจุด A และ B
2. หาค่าแรงดันเทวินิน E' ซึ่งเป็นแรงดันระหว่างจุด A และ B นั้นเอง คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_2



รูปที่ 2. 10 วงจรแรงดันเทวินิน [13]

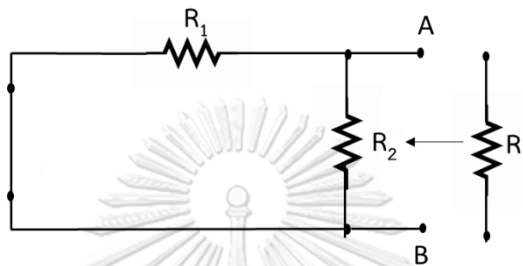
จากรูปที่ 2.10 สามารถหาค่าต่าง ๆ ในวงจรแรงดันเทวินิน ได้จากสมการ

$$\text{ค่ากระแสไฟฟ้าในวงจร} \quad I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

$$\text{ค่าแรงดันตกคร่อมที่ } R_2 = E' = I \times R_2 = \frac{E}{R_1+R_2} \times R_2$$

$$\text{ค่าแรงดันเทวินิน } E' = E \times \frac{R_2}{R_1+R_2} \quad (2.7)$$

3. ถัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันหรือเปิดวงจรแหล่งจ่ายกระแสแล้วแต่กรณี
4. หาค่าความต้านทานเทวินิน R' โดยมองเข้าไปที่จุด A และ B

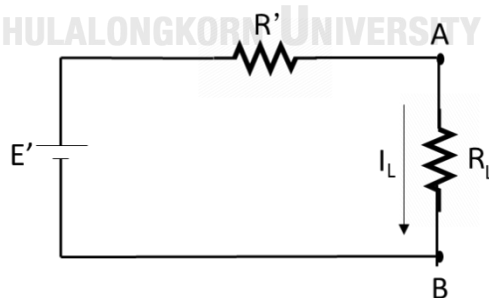


รูปที่ 2. 11 วงจรหาความต้านทานเทวินิน [13]

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าเมื่อมอง เข้าจุด A และ B จะเห็นตัวต้านทาน R_1 ขนานกับ R_2 จะได้ค่าความต้านทานเทวินิน R'

$$\text{ค่าความต้านทานเทวินิน } R' = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.8)$$

5. นำค่าแรงดันไฟฟ้าเทวินิน E' และค่าความต้านทานเทวินิน R' มาเขียนวงจรสมมูลของเทวินิน แล้วนำโหลด R_L ที่ปลดออกในตอนแรกมาต่ออีกครั้งหนึ่ง เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_L ตามที่ต้องการ



รูปที่ 2. 12 วงจรกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด [13]

จากรูปที่ 2.12 คำนวณหาค่ากระแสไหลผ่าน R_L ได้จากสมการ

$$\text{ค่ากระแสไฟฟ้า } I_L = \frac{E'}{R' + R_L} \quad (2.9)$$

2.3 เซลล์สุริยะ

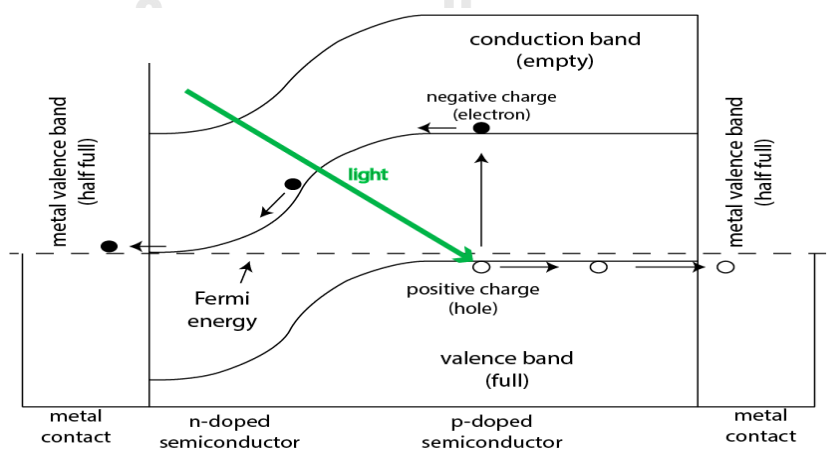
2.3.1 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน

ตารางที่ 2. 1 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน

ข้อดีของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน	ข้อเสียของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน
มีค่าใช้จ่ายในการทำงานและบำรุงรักษาต่ำ	มีข้อจำกัดของระบบ เช่น สามารถแปลงพลังงานแสงหรือความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์เพียงทางใดทางหนึ่งเท่านั้น
ไม่มีค่าใช้จ่ายของแหล่งพลังงานเนื่องจากใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติ	มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูงและต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมาก
พลังงานสะอาดและมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	ประสิทธิภาพขึ้นกับภูมิประเทศ

2.3.2 การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน

สมชาย กฤตพลวิวัฒน์และคณะ (2549) [14] กล่าวว่าเซลล์สุริยะเปรียบเสมือนไดโอดขนาดใหญ่ที่อยู่ในสภาวะถูกแสง เมื่อแสงตกกระทบลงบนรอยต่อพีเอ็นของไดโอดจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสพาหะผ่านบริเวณรอยต่อ เมื่อมีตัวนำไฟฟ้าสัมผัสอยู่บริเวณด้านนอกของสารพีและสารเอ็นจะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่ภายนอก รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะจะสูญเสียพลังงานบางส่วนก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ทุกวินาทีโฟตอนของแสงเหล่านี้บางตัวที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์สุริยะ เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าอาจถูกดูดกลืนและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบการนำไฟฟ้า กระบวนการดูดกลืนแสงจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-Hole Pair) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2. 13 การเกิดคู่อิเล็กตรอน - หลุมด้วยแสงที่ตกกระทบ [15]

วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์สุริยะดังรูปที่ 2.14 กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์เกิดจากตัวกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่และต่อขนานอยู่กับรอยต่อพีเอ็น จะได้ว่ากระแสไฟฟ้าลัพธ์ (I) ของเซลล์สุริยะมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์ (I_{ph}) กับกระแสไฟฟ้าไดโอด (I_D) ดังสมการที่ 2.10

$$I = I_D - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

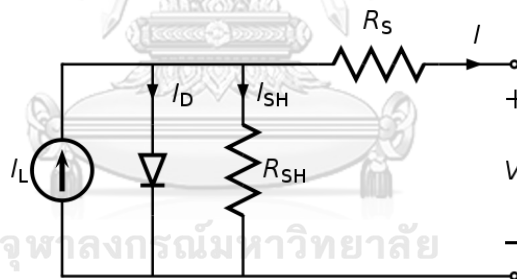
เมื่อ I_0 คือ กระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัว

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน ค่าคงที่ 1.6×10^{-19} C

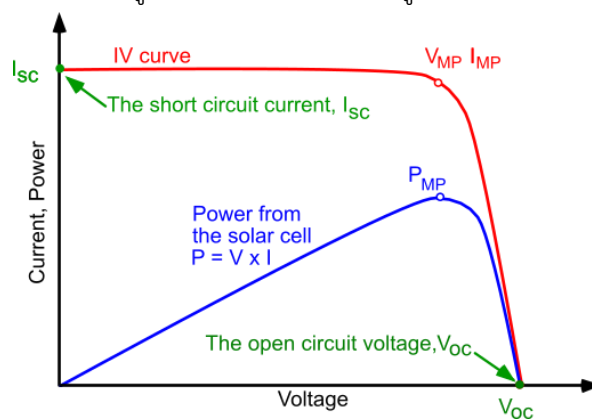
k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ 1.38×10^{-23} J/K

T คือ อุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ (K)

ภายใต้สภาวะวงจรไฟฟ้าเปิด I มีค่าเท่ากับ 0 กระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดจะไหลผ่านไดโอด ในขณะที่ภายใต้สภาวะลัดวงจรไฟฟ้า V มีค่าเท่ากับ 0 กระแสไฟฟ้าทั้งหมดจะไหลผ่านโหลดไฟฟ้าภายนอก ได้กราฟแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2. 14 วงจรไฟฟ้าสมมูล [16]



รูปที่ 2. 15 สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [17]

จากรูปที่ 2.15 แสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะประกอบด้วยตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ค่ากระแสไฟฟ้่าล้ดว้จระ (I_{SC}) จะม้ค่าก้ล้ค้ยงก้บกระแสไฟฟ้่าท้เก้ดจากรพลังงานแสงอาทิตย์ (I_{ph}) และค่าแรงดันไฟฟ้่าวงจระเป้ด (V_{OC}) ณ สภาวะท้กระแสไฟฟ้่าเท้ก้บศูนย์ สามารถค้านวณจากรสมการท้ 2.11 และ 2.12 ตามล้ด้บ

$$I_{SC} = I_D - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_D}{I_0} + 1 \right) \quad (2.12)$$

ค่า I_{ph} และค่า I_0 (กระแสไฟฟ้่าอ้มด้วยอ้นกล้บ) ขึ้นอย้ก้บรูปทรงของอุปกรณ์ในส่วนของกระบวนการผลิตและโครงสร้างของวัสดุเป็นด้ว้กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้่าวงจระเป้ด จุดท้กำลังไฟฟ้่าของเซลล์สุริยะม้ค่าสูงท้สุด (Maximum power point: P_{MP}) หาได้จากรค้ดค่ากำลังไฟฟ้่าท้จุดต่าง ๆ บนเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว้างกระแสไฟฟ้่าและแรงดันไฟฟ้่า โดยเป็นจุดท้ผลคูณของกระแสไฟฟ้่า (I_{MP}) ก้บแรงดันไฟฟ้่า (V_{MP}) ม้ค่าสูงท้สุดและมีพื้นที่ใต้กราฟมากท้สุด เมื่อเทียบก้บจุดอื่นภายใต้สภาวะแวดล้อมเด้ยว้กัน

ในความเป็นจริงเซลล์สุริยะไม่ได้ทำงานภายใต้สภาวะมาตรฐาน จึงท้ให้ค่ากำลังไฟฟ้่าสูงท้สุดท้วัดได้จริงม้ค้าน้อยกว้าค่ากำลังไฟฟ้่าท้ค้านวณได้ อัตราส่วนระหว้างค่ากำลังไฟฟ้่าสูงท้สุดท้วัดได้และค่ากำลังไฟฟ้่าท้ค้านวณได้ เรียกว้่า ฟ้ลแพกเตอร์ (fill factor) เป็นค่าท้บอกล้ถึงพื้นที่จุดกำลังไฟฟ้่าสูงท้สุดเป็นก้เท้ของกำลังไฟฟ้่าท้ค้านวณได้จากผลคูณของ V_{OC} ก้บ I_{SC} ซ้งสามารถค้านวณได้จากสมการ

$$FF = \frac{P_{MP}}{I_{SC}V_{OC}} = \frac{I_{MP}V_{MP}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (2.13)$$

และประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (PCE) สามารถค้านวณได้ด้งสมการ

$$PCE = \frac{I_{MP}V_{MP}}{P_{in}} = \frac{I_{SC}V_{OC}FF}{P_{in}} \quad (2.14)$$

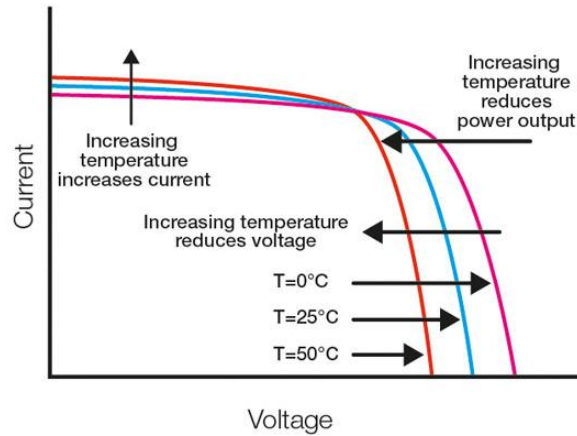
โดยท้ P_{in} ค้ือค่าพลังค์พลังงาน แสงอาทิตย์ท้ตกกระทบบนเซลล์สุริยะ การใช้งานเซลล์สุริยะในทางปฏิบัติไม่ได้ด้าเนินการภายใต้สภาวะมาตรฐานอันเนื่องมาจากปัจจัยท้สำคัญอย้ 2 ประการ ได้แก่ อุณหภูมิของเซลล์สุริยะและความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ซ้งจะกล่าวในห้ว้ข้อถัดไป

2.4 ระบบร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอ้เล้กทริง

2.4.1 สมบัติของเซลล์สุริยะเนื่องจากรังค์ชนของอุณหภูมิ

สมชาย กฤตพลวิวัฒน์และคณะ (2549) [14] กล่าวว้่า ผลของอุณหภูมิต่อค่ากำลังไฟฟ้่าล้ฟ้ของเซลล์สุริยะ แรงดันไฟฟ้่าของเซลล์สุริยะจะมีค้าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากรสภาวะท้มีอุณหภูมิสูง

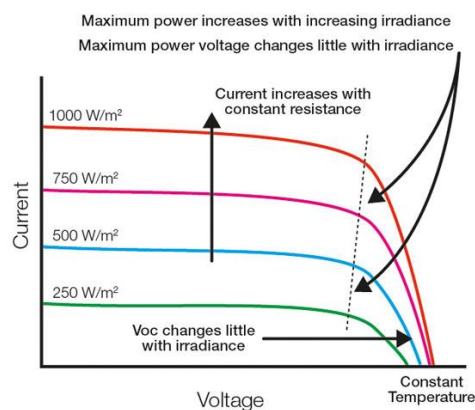
ระยะห่างของแถบพลังงานจะลดลงเป็นผลให้แรงดันขาออกของเซลล์สุริยะมีค่าน้อยลง ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูปที่ 2. 16 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [18]

2.4.2 สมบัติของเซลล์สุริยะเนื่องจากฟังก์ชันของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

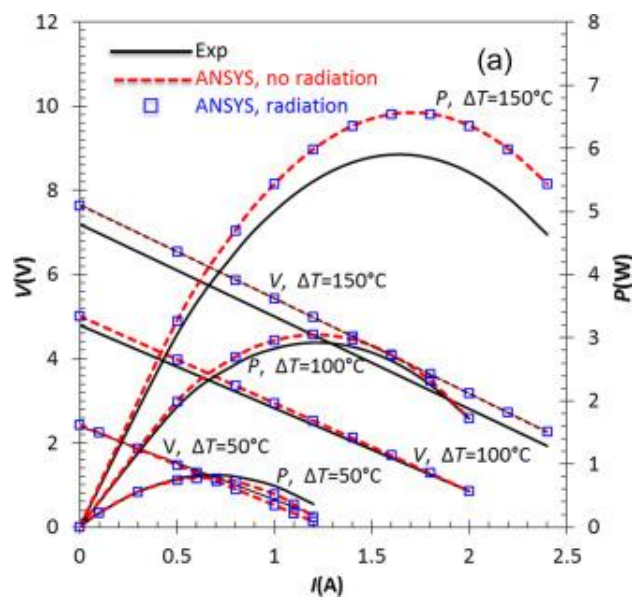
สมชาย กฤตพลวิวัฒน์และคณะ (2549) [14] กล่าวว่า ผลของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่อลักษณะเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่มีระดับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์แตกต่างกัน เมื่อความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ฟลักซ์โฟตอนของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะมีค่าเพิ่มขึ้น หมายถึง จำนวนโฟตอนที่มากขึ้น ในขณะที่พลังงานของโฟตอนมีค่าเท่าเดิม ก่อให้เกิดพลังงานกระตุ้นที่สูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุมมากขึ้น ส่งผลให้มีค่ากระแสไฟฟ้าไหลออกจากวงจรเพิ่มสูงขึ้น จึงสามารถสรุปว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าแปรผันตรงกับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ในขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและในทางปฏิบัติจะไม่พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับในกรณีดังกล่าว



รูปที่ 2. 17 ผลของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่อลักษณะเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [18]

2.4.3 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ไพบูลย์ โกวิทเจริญกุลและคณะ (2550) [19] ได้ทดสอบความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยนำ โหลดตัวต้านทานมาต่อกับเทอร์โมอิเล็กทริก พร้อมกับควบคุมแหล่งกำเนิดความร้อนที่แต่ละผลต่างอุณหภูมิ โดยแต่ละอุณหภูมิแปรเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทานและบันทึกความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันและ กระแสไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อความต้านทานภายในเซลล์เท่ากับค่าความต้านทานโหลด เรียกว่า “ภาวะแมชชิง (matching)” พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับผลต่างอุณหภูมิ



รูปที่ 2. 18 กราฟลักษณะสมบัติ I-V และ P-V ของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลต่างอุณหภูมิต่าง ๆ [20]

2.4.4 มอดูลโฟโตวอลเทจและมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรม

Tae Park และคณะ (2556) [2] ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ร่วม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด 0.592 โวลต์ ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 30 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีประสิทธิภาพร้อยละ 12.5 ภายใต้ความเข้ม รังสีแสงอาทิตย์ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง และเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 4 ตาราง เซนติเมตรและมีค่าความต้านทานภายใน 2.1 โอห์ม ด้วยการเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าแบบอนุกรม พบว่า ใน สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่างกัน 20 องศาเซลเซียส ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ตรวจวัดได้ 50 มิลลิวัตต์และอุปกรณ์ร่วมเซลล์แสงอาทิตย์/เทอร์โมอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าแบบ อนุกรมสามารถตรวจวัดได้ 79 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าอุปกรณ์ร่วมดังกล่าวให้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์ แสงอาทิตย์ทั่วไปถึง 1.6 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของประจุที่แต่ละฝั่งของเทอร์โมอิเล็กทริกมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์และค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงขึ้น

2.5 ตารางสรุปงานวิจัยทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์สุริยะและระบบร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ 2. 2 ตารางสรุปงานวิจัยทางวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์สุริยะและระบบร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

ผู้วิจัย	วัตถุประสงค์ในการศึกษา	สิ่งที่ได้จากงานวิจัย
ไพบูลย์ โกวิทเจริญกุล และคณะ (2550)	ทดสอบลักษณะสมบัติของกระบวนการย้อนกลับของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เพื่อใช้เป็นเซลล์ความร้อนจากความร้อนที่อุณหภูมิน้ำเดือด	วิธีพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและการวิเคราะห์ผลของเซลล์และมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก
วิศิษฐ์ มหานิล และคณะ (2550)	ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าและความร้อนของมอดูลเซลล์สุริยะ	แนวทางการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ
Kwang-Tae Park และคณะ (2556)	ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยวิธีการอย่างง่าย	วิธีการประกอบและวิเคราะห์ผลของวงจรร่วมอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์/เทอร์โมอิเล็กทริก
Gun-Ho Kim และคณะ (2556)	ศึกษาผลของสารละลายอินทรีย์ 2 ชนิด ได้แก่ เอททิลีนไกลคอล (EG) และ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดพี คือ PEDOT:PSS	เอททิลีนไกลคอล (EG) และ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) เป็นสารละลายอินทรีย์ที่สามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS ได้
Qingshuo Wei และคณะ (2557)	ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตจากวัสดุ PEDOT:PSS ที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์สกรีนบนตัวรองรับกระดาษหนา 300 ไมครอน	กระดาษสามารถใช้เป็นตัวรองรับของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS และสามารถประกอบเป็นวงจรของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้
Andrea Montecucco และคณะ (2557)	ศึกษาการเชื่อมต่อกันเชิงไฟฟ้าของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งวงจรอนุกรมและขนาน	วิธีการเชื่อมต่อและการวิเคราะห์ผลเชิงไฟฟ้าของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกวงจรรอนุกรม

ผู้วิจัย	วัตถุประสงค์ในการศึกษา	สิ่งที่ได้จากงานวิจัย
Nicolas Massonnet และคณะ (2557)	ศึกษาวิธีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด PEDOT:PSS ด้วยการรีดักชันทางเคมีบนแผ่นฟิล์มบาง	ไฮโดรราซินไฮเดรตเป็นตัวรีดิวซ์อินทรีย์ที่สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด PEDOT:PSS ได้ด้วยการรีดักชันทางเคมีบนแผ่นฟิล์มบาง
Teahoon Park และคณะ (2558)	ศึกษาวิธีการเปลี่ยนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่น 700 ถึง 1,000 นาโนเมตรและพลังงานความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ให้สามารถทำงานในภาวะที่ไม่มีแสงแต่ยังคงมีความร้อนหลงเหลืออยู่ตลอดจนผลิตกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นในช่วงเวลาที่มีแสง	ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกควรใช้วัสดุที่นำความร้อนประสานระหว่างรอยต่อเพื่อดึงเอาพลังงานความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
Renee Kroon และคณะ (2559)	ศึกษาวิธีการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกฐานพอลิเมอร์ ตลอดจนกระบวนการขึ้นรูปและความสัมพันธ์ของสมบัติทางโครงสร้าง	เอททิลีนไกลคอล (EG) เป็นสารละลายอินทรีย์ที่สามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS ได้ด้วยเหตุผลการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง
Lukas Stepien และคณะ (2559)	ศึกษาการออกแบบรูปแบบการจัดวางฟิล์มเทอร์โมอิเล็กทริก โดยพิมพ์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดพี คือ PEDOT:PSS และชนิดเอ็น คือ พอลิ[แมกนีเซียม(นิเกิล-เอททิลีนเตตระไทโอเลต)] (negatively charged poly(Nickel-ethylenetetrahiolate) with potassium counter cations) ลงบนตัวรองรับพอลิเอไมด์ (PI) ด้วยเทคนิคดิสเพนส์ (dispense technique)	รูปแบบการจัดวางวงจรรวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS ภายในอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
วินัส เทศถมยา และคณะ (2561)	ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบกของสารไอออนไดซัลไฟด์ทั้งที่เจือด้วยดีบุกและที่ไม่ได้เจือดีบุก	วิธีพิสูจน์ลักษณะสมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 3 เป็นการนำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยและหลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก รวมถึงการออกแบบเครื่องมือเพื่อพิสูจน์ลักษณะสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์สุริยะ และอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีหัวข้อในการนำเสนอ ดังนี้

3.1 วิธีการเตรียมสาร (Preparation method)

3.1.1 การปรับปรุงสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารละลายพอลิ(3,4-เอททิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิ(สไตรีนซัลโฟเนต) (PEDOT:PSS)

3.1.2 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางของสารละลาย PEDOT:PSS

3.2 สมบัติเชิงไฟฟ้า (Electrical properties)

3.2.1 การทดสอบสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และสัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) ที่อุณหภูมิห้อง

3.3 การวางชุดลายวงจรไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module patterning)

3.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic)

3.4.1 การออกแบบเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

3.4.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ

3.4.3 การออกแบบเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

โดยหัวข้อทั้งหมดสามารถแสดงรายละเอียดได้ตามหัวข้อข้างต้นดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการเตรียมสาร (Preparation method)

3.1.1 การปรับปรุงสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS (Modifying the electrical properties of PEDOT:PSS solution)

เพื่อให้สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และสัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) ของสารละลาย PEDOT:PSS เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จึงได้ปรับปรุงลักษณะสมบัติดังกล่าว โดยสารเคมีตั้งต้นที่ใช้มีรายละเอียดดังนี้

- สารละลายพอลิ(3,4-เอททีลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิ(สไตรีนซัลโฟเนต) (PEDOT:PSS), 1.0 wt.% in H₂O, high-conductivity grade, Sigma Aldrich
- เอททีลีนไกลคอล (Ethylene glycol) AR grade, Qrec
- ไฮดราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate) reagent grade, N₂H₄ 50-60%, Sigma Aldrich

โดยเติมสารเจือชนิดเอททีลีนไกลคอล (EG) ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนัก และ ไฮดราซีนไฮเดรต ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่คาดว่าจะเพียงพอสามารถทำให้เห็นแนวโน้มของการวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าในขั้นตอนถัดไปได้ ผสมลงในสารละลาย PEDOT:PSS เพื่อเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบก ตามลำดับ จากนั้นกวนสารละลายผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

3.1.2 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางของสารละลาย PEDOT:PSS (Forming the PEDOT:PSS thin film)

เปิดสารละลายผสมในหัวข้อ 3.1.1 ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ใส่ลงในแม่พิมพ์อะลูมิเนียมขนาด 2x1x0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำเข้าเตาอบเพื่อทำให้แห้ง เป็นเวลา 18 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมทำให้แผ่นฟิล์มสามารถคงรูปเพื่อสามารถนำไปตรวจวัดในขั้นตอนถัดไปได้ หลังจากนั้น ลอกแผ่นฟิล์มบางของสารละลาย PEDOT:PSS ออกจากแม่พิมพ์และวางลงบนกระดาษซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ



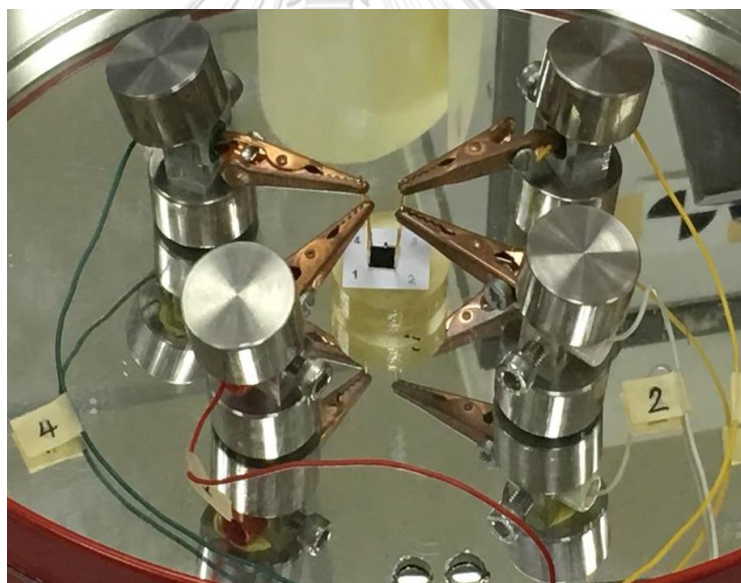
รูปที่ 3. 1 กระบวนการเตรียมสารละลาย PEDOT:PSS สำหรับใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

3.2 สมบัติเชิงไฟฟ้า (Electrical properties)

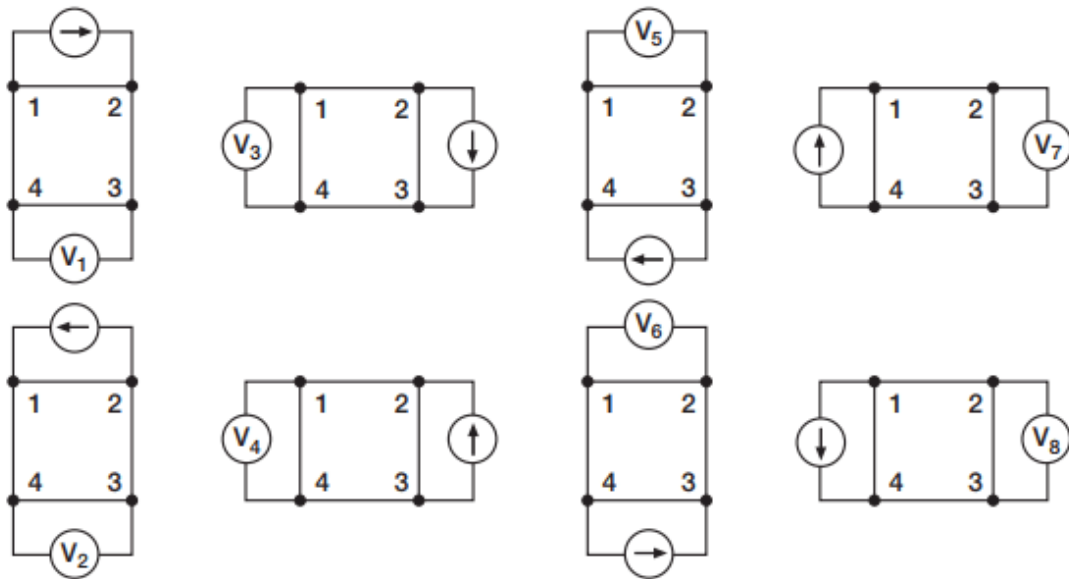
3.2.1 การทดสอบสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง (electrical conductivity and Seebeck coefficient at room temperature)

- สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

นำสารตัวอย่างมาวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าดังรูปที่ 3.2 ด้วยวิธีของ แวน เดอ พาว (Van der Pauw method) ซึ่งเป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นจากวิชาคณิตศาสตร์ conformal mapping เป็นการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างแผ่นบางที่มีขอบเป็นรูปร่างใดๆ ทำให้สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำโดยไม่คำนึงถึงลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นสารตัวอย่าง ที่ควบคุมด้วยโปรแกรม Matlab (วินัส เทศมยา และคณะ, 2561) โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่างและวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้ 1 ค่าต่อกระแส 1 ค่า โดยเพิ่มค่ากระแสขึ้นครั้งละ $1\ \mu\text{A}$ จนถึง $5\ \mu\text{A}$ รวมถึงสลับทิศของกระแสและวัดค่าความต่างศักย์ในแต่ละกระแสจนครบ โดยทำทั้งหมด 8 รูปแบบ (configuration) ดังรูป 3.3



รูปที่ 3. 2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง PEDOT:PSS



รูปที่ 3. 3 8 รูปแบบการเก็บข้อมูลวัดแบบวิธี แวน เดอ พาว [21]

จากรูปที่ 3.2 สภาพนำไฟฟ้าสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\rho = \left[\frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{R_{32,14} + R_{43,12}}{2} \right) F \left(\frac{R_{43,12}}{R_{32,14}} \right) \right] d \quad (3.1)$$

โดย d คือความหนาของแผ่นฟิล์มบาง PEDOT:PSS

$F(R_{43,12}/R_{32,14})$ คือ แฟกเตอร์แก้ค่า (correction factor)

$R_{43,12} = V_{43}/I_{12}$ และ $R_{32,14} = V_{32}/I_{14}$ คือความต้านทานที่เกิดจากการจ่ายกระแสและวัดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมในแต่ละด้านของสารตัวอย่าง เมื่อ V_{43} หมายถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างด้านที่ 1 และ ด้านที่ 2 ในสภาวะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

และสามารถหาสภาพนำไฟฟ้าได้จากความสัมพันธ์

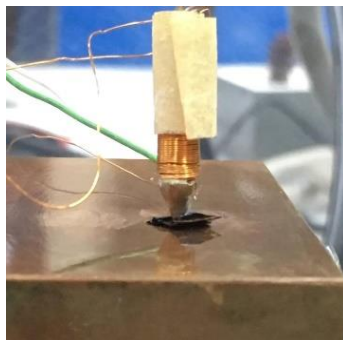
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.2)$$

โดย ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า

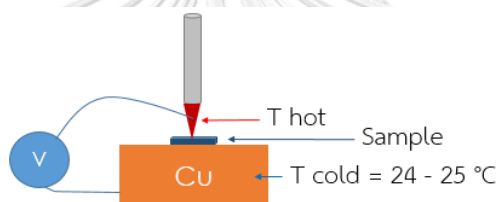
- สัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient)

นำสารตัวอย่างมาวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกดังรูปที่ 3.4 ด้วยวิธีเข็มร้อน(hot probe) ควบคุมด้วยโปรแกรม Matlab (วินัส เทศมยา และคณะ, 2561) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้หัวจ่ายความร้อนเพื่อทำให้

อุณหภูมิหัวจ่ายสูงขึ้นและวัดผลต่างอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค(Thermocouple Type k) ซึ่งเป็นไปตามแนวความหนาของสารตัวอย่างกับความต่างศักย์ตกคร่อมสารตัวอย่าง โดยวัดซ้ำวิธีเดิมกระจายบนบริเวณพื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่างทั้งหมด 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 3. 4 การวัดสัมประสิทธิ์ของแผ่นฟิล์มบาง PEDOT:PSS



รูปที่ 3. 5 แผนภาพแสดงการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 3.4 สัมประสิทธิ์ซีเบกสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3.3)$$

โดย ΔV คือความต่างศักย์ไฟฟ้า

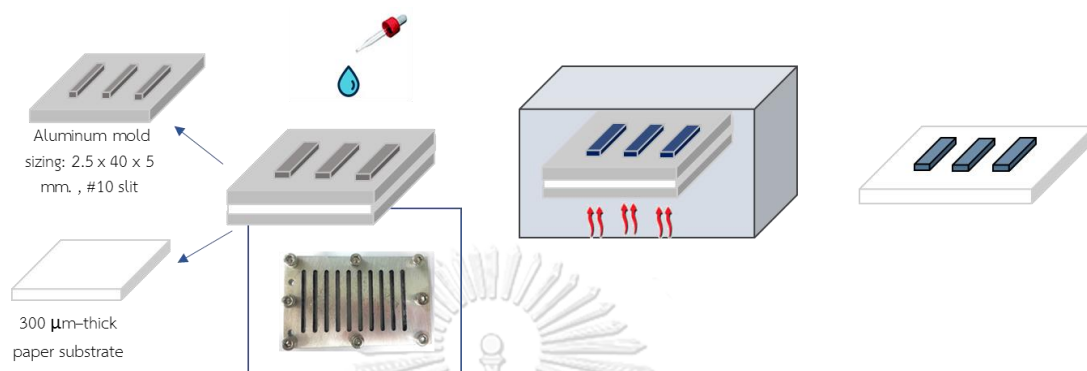
ΔT คือผลต่างอุณหภูมิ

3.3 การวางชุดลายวงจรไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module patterning)

- การวางชุดลายวงจรไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS

เปิดสารละลายผสมในหัวข้อ 3.1.1 ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในแม่พิมพ์อะลูมิเนียมเซาะร่องขนาดร่องละ 2.5×40 มิลลิเมตร และมีความหนาร่องละ 5 มิลลิเมตร จำนวน 10 ร่อง โดยมีกระดาษหนา 300 ไมครอน เป็นตัวรองรับ จากนั้นยึดแม่พิมพ์ให้แน่นด้วยสกรูดังรูปที่ 3.6 จากนั้นเอียงแม่พิมพ์ให้

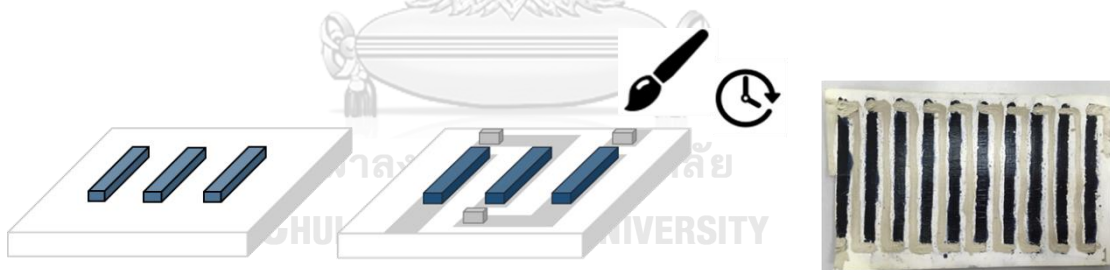
สารละลายกระจายอย่างทั่วถึง อบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมทำให้ชุดลายวงจรไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS สามารถยึดเกาะกับตัวรองรับได้สนิทมากพอที่จะนำไปใช้ทดสอบในขั้นตอนถัดไป จากนั้นทำซ้ำขั้นตอนเดิมจำนวน 1 รอบ แล้วจึงยกแม่พิมพ์ออกจากกระดาษซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ



รูปที่ 3. 6 แผนภาพขั้นตอนการวางชุดลายวงจรไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS

- การเชื่อมต่อทางวงจรไฟฟ้าด้วยสีเพ้นท์เงิน (Silver paste)

นำชุดลายวงจรของสารละลาย PEDOT:PSS มาเชื่อมต่อกันทางวงจรไฟฟ้าด้วยสีเพ้นท์เงิน (Conductive silver paste, SPI) ดังรูปที่ 3.7 จากนั้นรอให้แห้งเป็นเวลา 2 นาที



รูปที่ 3. 7 แผนภาพขั้นตอนการเชื่อมต่อทางวงจรไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS

3.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics)

3.4.1 การออกแบบเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

จากการศึกษาข้อมูลเฉพาะทางของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าข้อมูลหลักที่จำเป็นสำหรับการออกแบบชุดทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกมี 7 ชนิด ได้แก่

V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage) (V)

I_{sc} = กระแสลัดวงจร (short circuit current) (A)

I_{load} = กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานภายนอก (load current) (A)

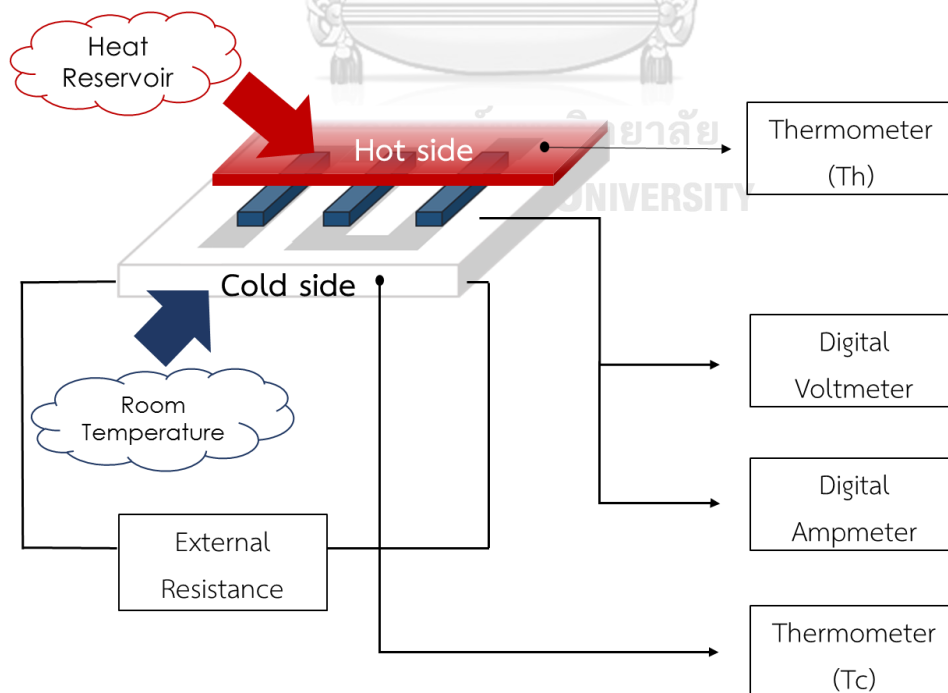
V_{load} = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานภายนอก (V)

R_{load} = ความต้านทานของตัวต้านทานภายนอก (Ω)

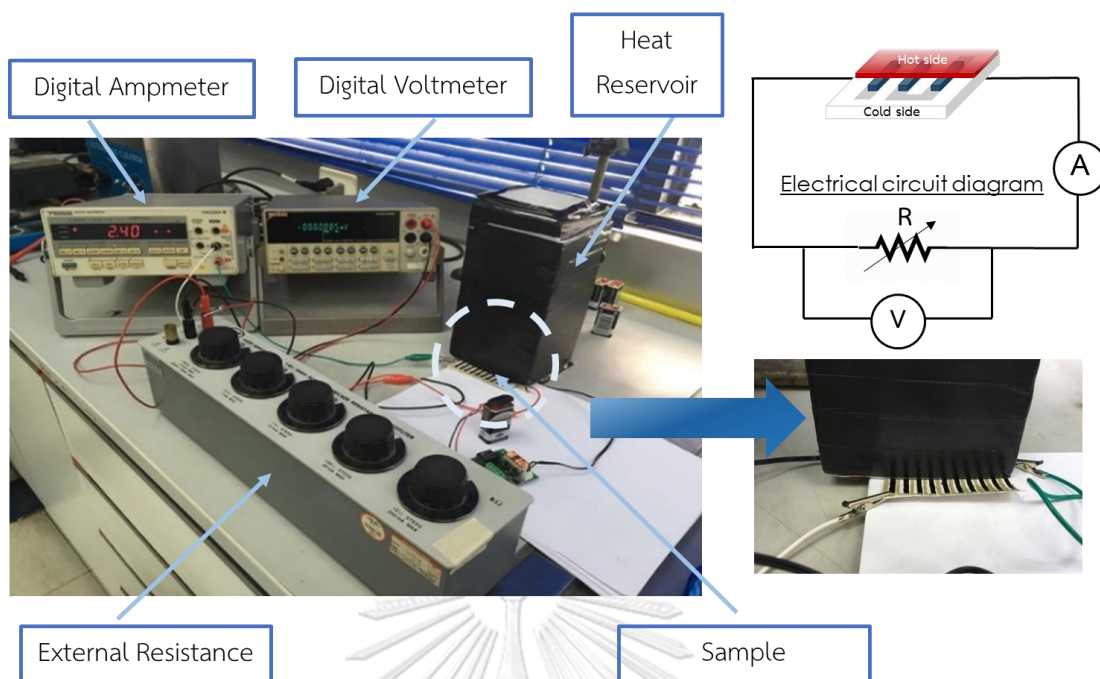
R_c = ความต้านทานภายในของเซลล์ (internal resistance) (Ω)

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิของเซลล์ (temperature difference) ($^{\circ}\text{C}$)

ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ใช้สำหรับคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้ที่มีความต่างของอุณหภูมิใด ๆ ดังนั้นระบบพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้านี้ จึงประกอบด้วยระบบย่อยต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูล ได้แก่ แหล่งกำเนิดความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในช่วง $25^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความร้อนจากน้ำเดือดเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและรอให้อุณหภูมิลดลงอย่างช้า ๆ ตามธรรมชาติ ควบคุมไปกับระบบย่อยอื่น ๆ อาทิ ระบบอ่านข้อมูลของอุณหภูมิและตัวแปรทางไฟฟ้า สำหรับศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแต่ละจุดจากการปรับค่าความต้านทานภายนอก ดังแสดงในแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



รูปที่ 3. 8 แผนภาพของเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 3. 9 ชุดเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

3.4.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน

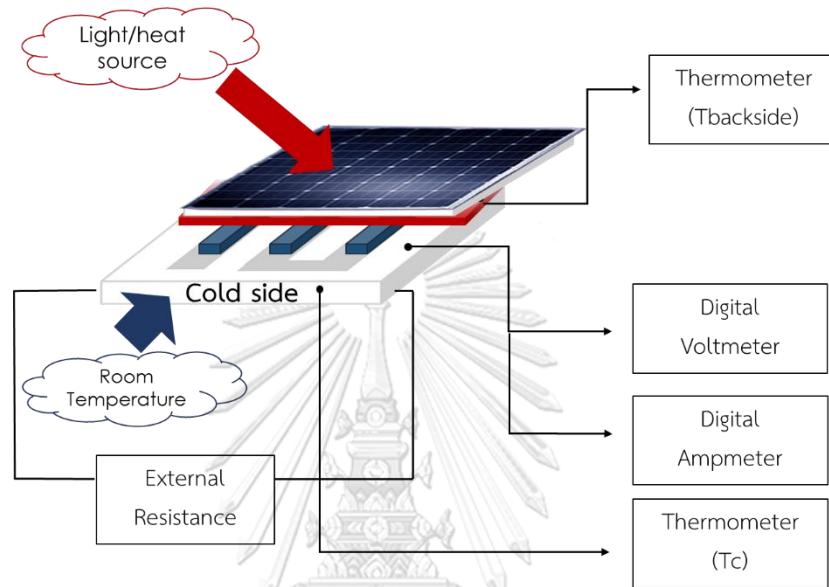
การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอนที่มีพื้นที่รับแสง 29.16 ตารางเซนติเมตรด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar Simulator, Sun 3000, ABET Technologies, USA.) และมัลติมิเตอร์ (IV characteristic, B2901A, Keysight, USA.) ภายใต้ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 0.1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

3.4.3 การออกแบบเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

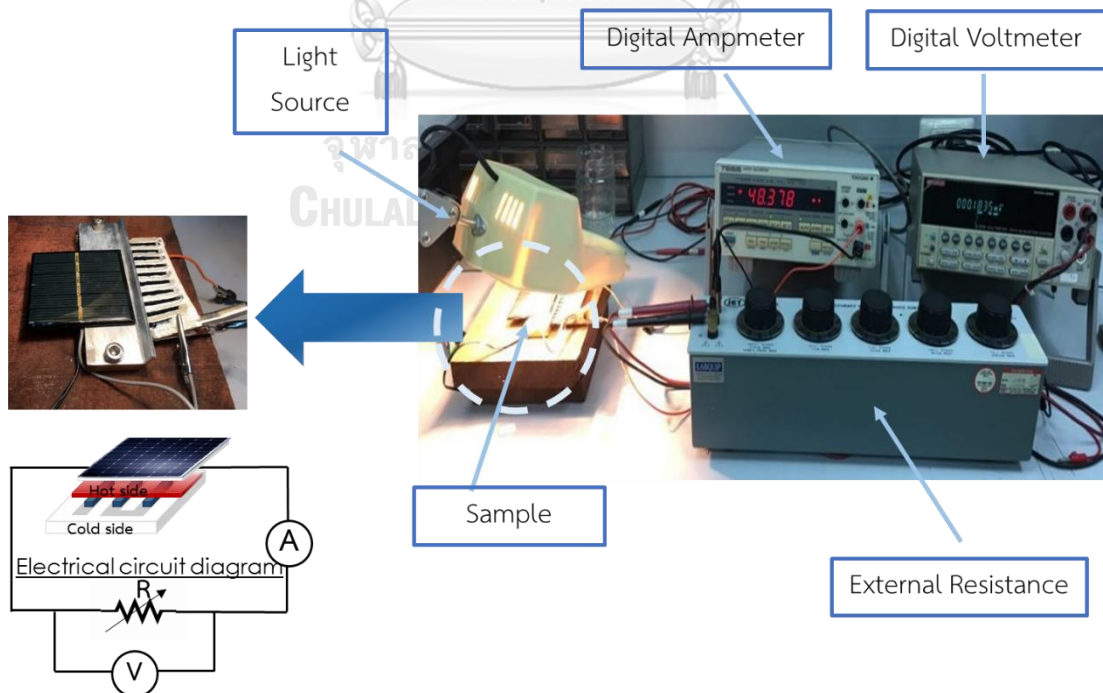
จากการศึกษาข้อมูลเฉพาะทางของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าข้อมูลหลักที่จำเป็นสำหรับการออกแบบชุดทดสอบมี 7 ชนิด เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.1 หากแต่เพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติด้านหลังแผ่นเซลล์สุริยะ (temperature at backside of photovoltaic, T_{backside}) ($^{\circ}\text{C}$)

ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ใช้สำหรับคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้ที่ผลต่างของอุณหภูมิใด ๆ ซึ่งเป็นไปตามแนวความยาวของแถบวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ดังนั้นระบบพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้านี้ จึงประกอบด้วยระบบย่อยต่าง ๆ เพื่อนำมาซึ่งข้อมูลดังกล่าว ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงที่ควบคุมความสว่างให้คงที่ในช่วง 21,980 – 22,100 lx ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้หลอดไฟทั้งสแตนด์เป็นแหล่งกำเนิดแสงและควบคุมความเข้มแสงโดยปรับระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและ

อุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกโดยอ่านค่าผ่านอุปกรณ์วัดความเข้มแสง (UNI-T UT383) ควบคู่ไปกับระบบย่อยอื่น ๆ อาทิ ระบบอ่านข้อมูลของอุณหภูมิและตัวแปรทางไฟฟ้า สำหรับศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแต่ละจุดจากการปรับค่าความต้านทานภายนอก ดังแสดงในแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11



รูปที่ 3. 10 แผนภาพของเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 3. 11 ชุดเครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทที่ 4 เป็นการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าและผลของรูปแบบการจัดวางของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์สุริยะเมื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดดังกล่าวข้างต้น โดยมีหัวข้อในการนำเสนอ ดังนี้

4.1 สมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Electrical properties of conductive polymer)

4.1.1 สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (Electrical conductivity at room temperature)

4.1.2 สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง (Seebeck coefficient at room temperature)

4.1.3 แฟกเตอร์กำลัง (Power factor: PF)

4.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

4.2.1 ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

4.2.2 ทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล

4.3 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของเซลล์สุริยะ

4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ

4.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

4.4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

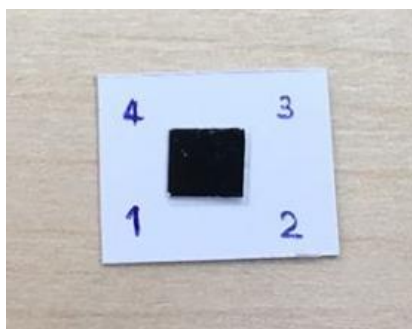
4.4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับ

เซลล์สุริยะ

โดยหัวข้อทั้งหมดสามารถแสดงรายละเอียดได้ตามหัวข้อข้างต้นดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Electrical properties of conductive polymer)

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดพอลิ(3,4-เอททีลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิ(สไตร์เร็นซัลโฟเนต) (PEDOT:PSS) มาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

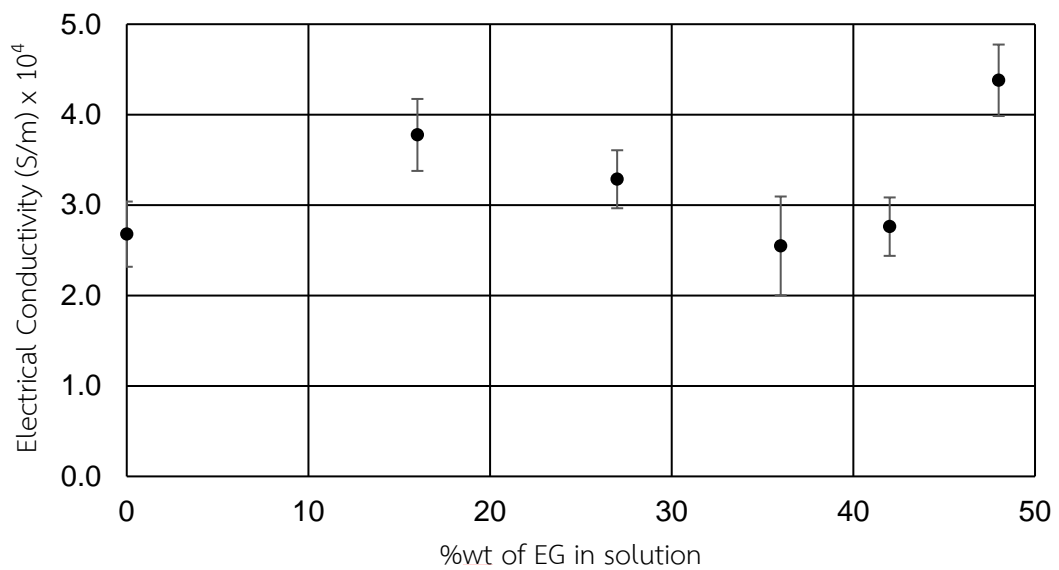


รูปที่ 4.1 แผ่นฟิล์ม PEDOT:PSS

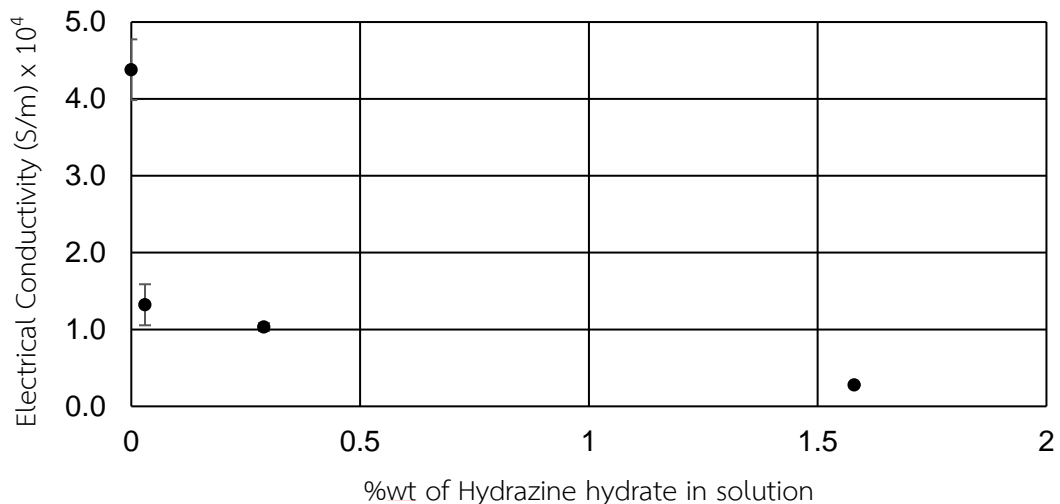
4.1.1 สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (Electrical conductivity at room temperature)

รูปที่ 4.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS เมื่อเติมสารเจือชนิดเอททีลีนไกลคอล (EG) ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนัก และ ไฮดราซีนไฮเดรต ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนัก เข้าไปในโครงสร้างตามลำดับ พิจารณาจากค่าที่วัดจากสภาพนำไฟฟ้า (σ) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณร้อยละของ EG เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ช่วงปริมาณร้อยละของ EG ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ยังไม่สามารถให้แนวโน้มของค่า σ ได้ชัดเจนนัก โดยมีค่า σ มากที่สุดคือ 440 ± 4.00 S/cm ที่ EG ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนัก และมีค่าลดลงเมื่อเติมสารเจือชนิดไฮดราซีนไฮเดรต ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้เกิดจากการทำซ้ำวิธีเดิมทั้งหมด 3 ครั้งซึ่งเกิดจากสารตัวอย่างต่างกัน สันนิษฐานว่า เกิดจากความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการเตรียมสารตัวอย่างแต่ละขั้นที่ไม่เท่ากันในแต่ละครั้ง ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ปรากฏในแต่ละสภาวะมีค่าน้อยแตกต่างกัน ดังนั้นจากรูปที่ 4.1และ4.2 จึงสรุปได้ว่าการเจือ EG เข้าไปในโครงสร้างของ PEDOT:PSS ส่งผลให้ค่า σ มีแนวโน้มที่ยังไม่ชัดเจนมากนักสันนิษฐานว่า เกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความแปรปรวนของชิ้นงานแต่ละขั้นที่ขึ้นรูปต่างครั้ง อย่างไรก็ตามในช่วงร้อยละปริมาณการเจือ EG ปรากฏค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดคือ 440 ± 4.00 S/cm ที่ปริมาณการเจือร้อยละ 48 โดยน้ำหนักเนื่องจาก EG ที่เจือเข้าไปในโครงสร้างมีส่วนช่วยทำให้โครงสร้างระหว่างส่วนของ PEDOT และ PSS เกิดการเชื่อมต่อได้ดีขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของ PSS จัดวางในตำแหน่งที่สามารถดึงอิเล็กตรอนจากโครงสร้าง PEDOT ทำให้เกิดพาหะหลุมในโครงสร้างส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโครงสร้างใช้พลังงานกระตุ้นน้อยลงและสะดวกขึ้น [22] อย่างไรก็ตาม หากเจือปริมาณร้อยละของ EG มากกว่าร้อยละ 48 จะทำให้ปริมาณร้อยละของ EG มีปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณของ PEDOT:PSS จะทำให้ผลของค่าการนำไฟฟ้าที่ได้เป็นผลมาจาก EG เป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งขัดแย้งกับวัตถุประสงค์ของผู้ทำวิจัยที่ต้องการ

ศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของ PEDOT:PSS เมื่อเติมสารเจือ EG เข้าไปในโครงสร้างเพื่อช่วยให้การนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ดีขึ้น ในขณะที่ การเจือไฮดราซีนไฮเดรต เข้าไปในโครงสร้างร่วมด้วย ส่งผลให้ค่า σ ลดลง ทุกช่วงปริมาณร้อยละของไฮดราซีนไฮเดรตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากไอออนที่เป็นประจุบวกของไฮดราซีน($N_2H_5^+$) จะเกิดพันธะร่วมกับโครงสร้างของ PSS ส่งผลให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างโครงสร้าง PEDOT และ PSS มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ความหนาแน่นของพาหะลดลงซึ่งเป็นผลให้อิเล็กตรอนในโครงสร้างเคลื่อนได้ลำบากขึ้น [23]



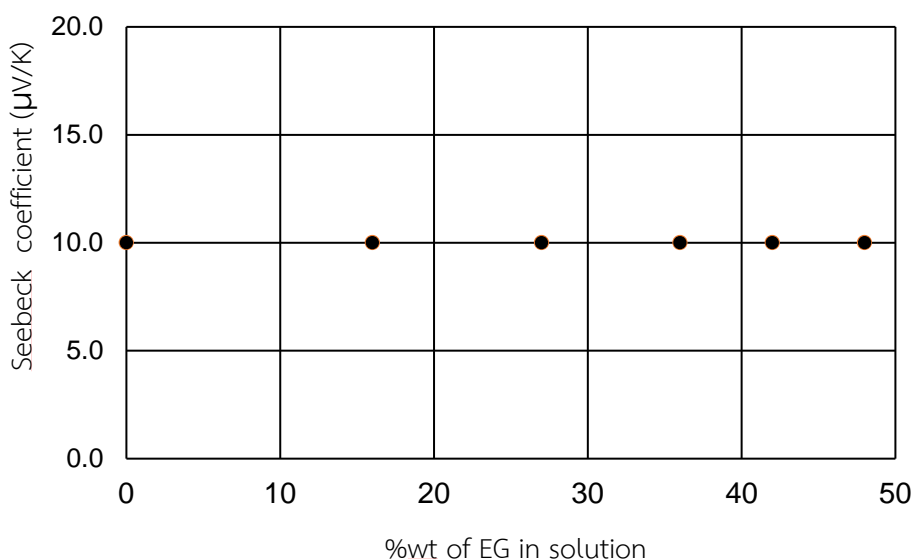
รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ (S/m) กับ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนักของ EG



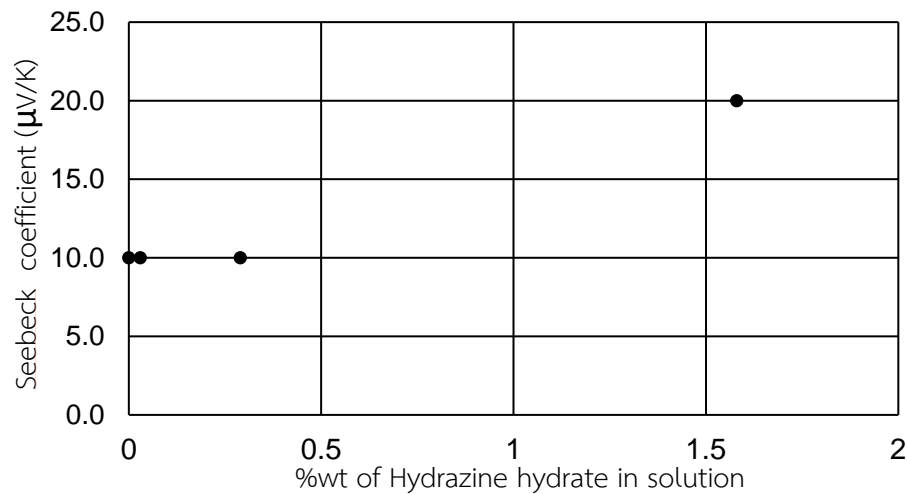
รูปที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ (S/m) กับ ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนักของ EG และ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนักของ ไฮดราซีนไฮเดรต

4.1.2 สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง (Seebeck coefficient at room temperature)

รูปที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ซีเบกของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS เมื่อเติมสารเจือชนิดเอททีลีนไกลคอล (EG) ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนัก และ ไฮโดรควิโนลีนไฮเดรต ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนัก เข้าไปในโครงสร้างตามลำดับแสดงค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) โดยมีพาหะอิสระส่วนใหญ่เป็นหลุมอิเล็กตรอน โดยทุกปริมาณการเจือด้วย EG มีค่า สัมประสิทธิ์ซีเบก (S) คงที่ $10.00 \pm 0.03 \mu\text{V/K}$ แสดงให้เห็นว่าการเจือ EG เข้าไปในโครงสร้างของ PEDOT:PSS ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก อย่างไรก็ตาม เมื่อเจือไฮโดรควิโนลีนไฮเดรตปริมาณร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก ค่า S เพิ่มขึ้นเป็น $20.0 \pm 0.1 \mu\text{V/K}$ และมีค่าคงที่ $10.00 \pm 0.03 \mu\text{V/K}$ ที่ปริมาณร้อยละไฮโดรควิโนลีนในช่วงปริมาณร้อยละที่เหลือในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกที่ได้จากขั้นตอนนี้เกิดจากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและผลต่างอุณหภูมิซึ่งเกิดจากชุดข้อมูลทั้งหมด 20 จุดโดยทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความชันของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง จึงไม่ปรากฏค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละสถานะที่ทำการทดลองในขั้นตอนนี้



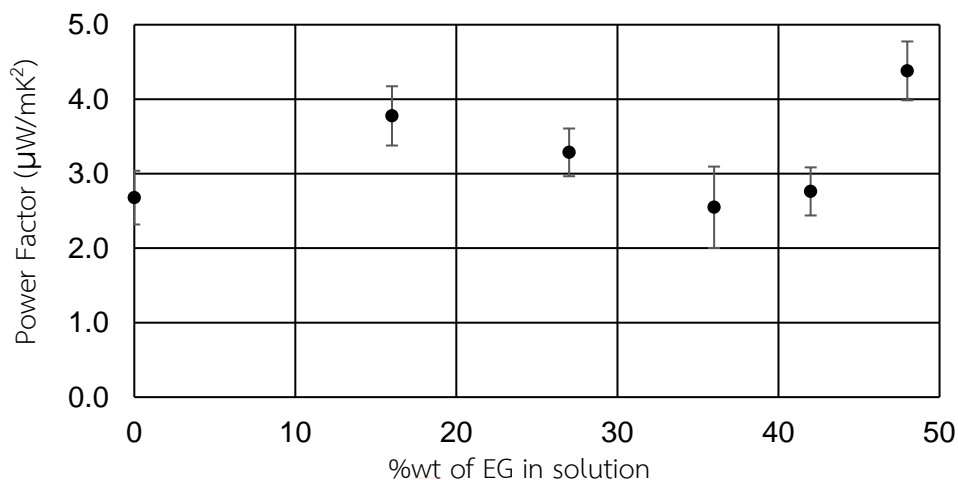
รูปที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง S ($\mu\text{V/K}$) กับ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนักของ EG



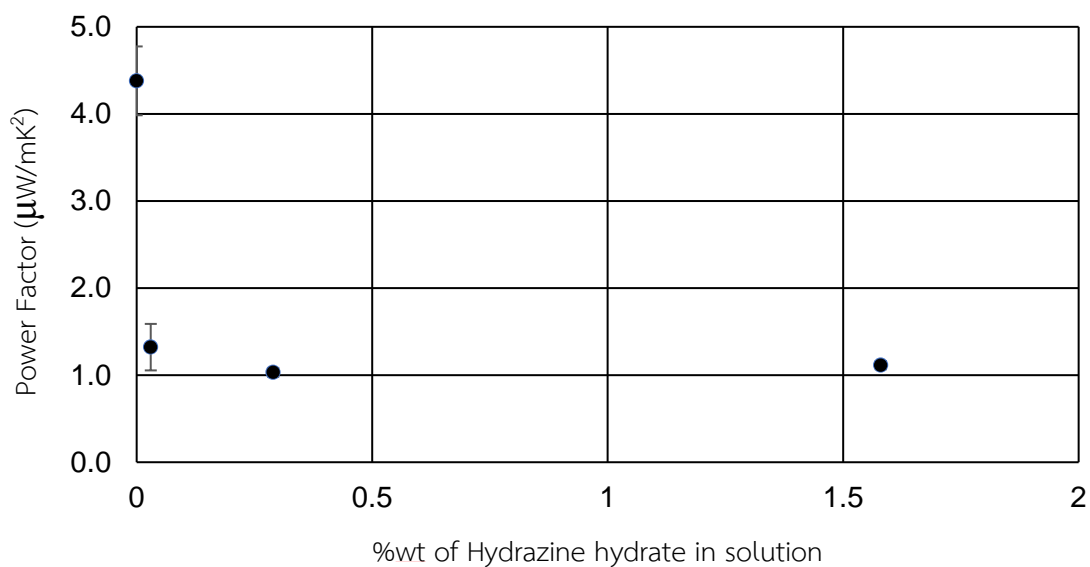
รูปที่ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง S ($\mu\text{V/K}$) กับ ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนักของ EG และ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนักของ ไฮดราซีนไฮเดรต

4.1.3 แฟกเตอร์กำลัง (Power factor: PF)

การพิจารณาแฟกเตอร์กำลัง PF เพื่อดูว่าสารชนิดใดมีความเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อพิจารณาทุกปริมาณร้อยละการเจือด้วยเอททิลีนไกลคอล (EG) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณร้อยละของ EG ที่เพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมเพิ่มขึ้นลักษณะเดียวกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยมีค่า PF มากที่สุด $4.38 \pm 0.40 \mu\text{W/mK}^2$ ที่ปริมาณร้อยละของ EG 48 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม ค่า PF ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเติมสารเจือชนิดไฮดราซีนไฮเดรต ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปว่า หากต้องการนำสารนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นสารเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องเจือด้วย EG ที่ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนักและไม่ผสมด้วยสารเจือชนิดไฮดราซีนไฮเดรต



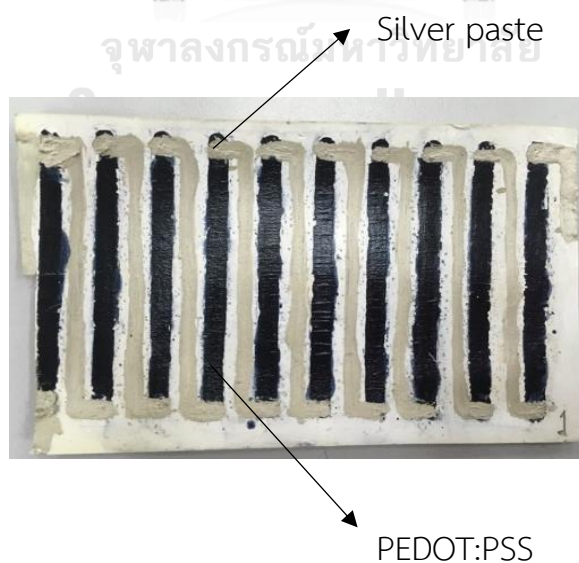
รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง PF ($\mu\text{W/mK}^2$) กับ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 48 โดยน้ำหนักของ EG



รูปที่ 4. 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง PF ($\mu\text{W}/\text{mK}^2$) กับ ปริมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนักของ EG และ ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1.58 โดยน้ำหนักของ ไฮดราซีนไฮเดรต

4.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

การทดสอบเพื่อหาข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด PEDOT:PSS เพื่อนำมาดัดแปลงใช้เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ด้วยเครื่องพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

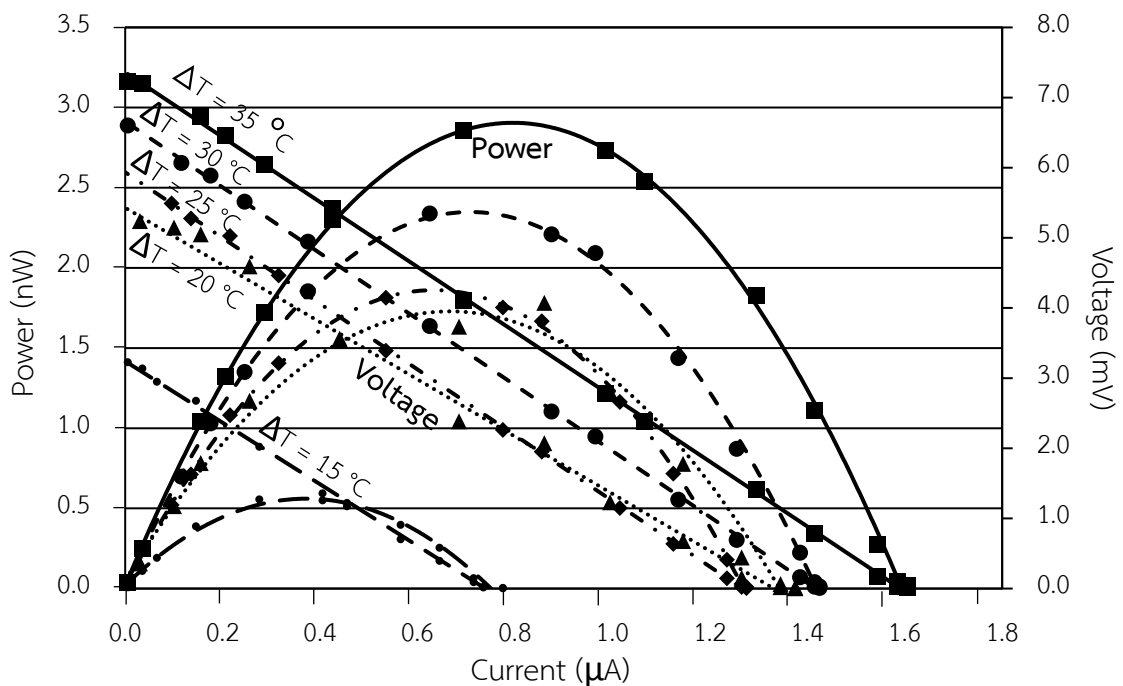


รูปที่ 4. 8 เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด PEDOT:PSS

4.2.1 ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์

จากระบบทดสอบตามรูปที่ 3.8 ทดสอบความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยนำโหนดตัวต้านทานปรับค่าได้มาต่อกับเทอร์โมอิเล็กทริก พร้อมกับควบคุมแหล่งกำเนิดความร้อนให้ได้ผลต่างอุณหภูมิที่ 35 °C, 30 °C, 25°C, 20°C และ 15°C ตามลำดับ โดยต้านเย็นปล่อยอิสระไปตามอุณหภูมิห้องประมาณ 25 °C แต่ละอุณหภูมิปรับเปลี่ยนขนาดโหนดตัวต้านทานภายนอกและบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับกระแสไฟฟ้าและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.9

จากเส้นกราฟกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 4.9 เมื่อความต้านทานภายในเซลล์ (R_c) เท่ากับความต้านทานของตัวต้านทานภายนอก (R_{load}) จะสามารถอ่านค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ที่เกิดขึ้นได้ตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 4. 9 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อผลต่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าเกิดจากปัจจัยอยู่ 2 ส่วน ได้แก่ ผลของความต้านทานภายในเซลล์ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า และผลของแรงดันไฟฟ้าที่ผลต่างอุณหภูมิใด ๆ อย่างไรก็ตาม ในช่วงผลต่างอุณหภูมิที่ทำการทดลอง จะเห็นว่าผลของความต้านทานภายในเซลล์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ยังไม่ชัดเจนมากนัก จึงสันนิษฐานว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่มีผลมาจากปัจจัย

ของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากผลต่างอุณหภูมิที่สูงขึ้น ตามความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ซีเบกที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1

ตารางที่ 4. 1 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C

ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	35	30	25	20	15
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ (nW)	2.86±0.17	2.32±0.17	1.82±0.13	1.59±0.53	0.52±0.37
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเปิด (mV)	7.228	6.602	5.980	5.285	3.228
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (µA)	1.605	1.425	1.275	1.375	0.775
ความต้านทานภายใน เซลล์ (kΩ)	4.62±0.02	4.69±0.02	4.69±0.02	4.08±0.10	4.38±0.08

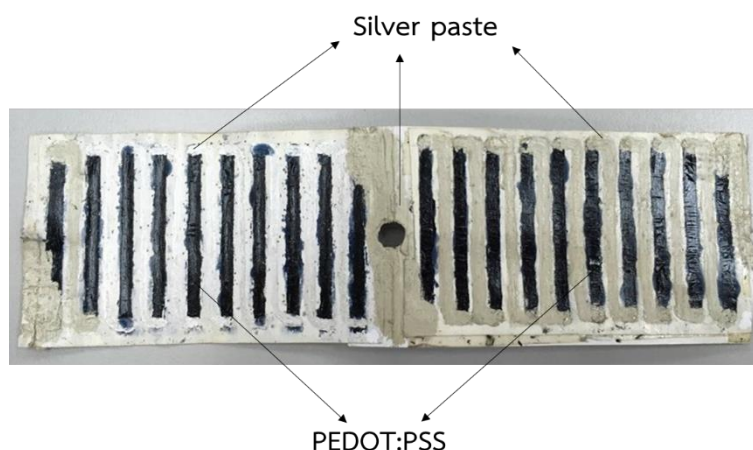
ในงานวิจัยนี้ ได้ทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกตั้งตัวอย่างข้างต้นทั้งหมด 5 เซลล์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C ได้ข้อมูลสรุปในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในงานวิจัยทั้งหมด 5 เซลล์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C

ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ (nW)					
	เซลล์ที่1	เซลล์ที่2	เซลล์ที่3	เซลล์ที่4	เซลล์ที่5	ค่าเฉลี่ย
35	1.83±0.17	2.86±0.17	0.96±1.00	1.58±0.21	1.30±0.12	1.72±0.24
30	0.86±0.11	2.32±0.17	0.90±0.53	0.47±0.21	1.30±0.27	1.18±0.16
25	0.66±0.12	1.82±0.13	0.78±0.55	0.36±0.18	0.74±0.15	0.88±0.13
20	0.27±0.13	1.59±0.53	0.35±0.48	0.15±0.42	0.27±0.15	0.57±0.20
15	0.10±0.47	0.52±0.37	0.20±0.43	0.06±0.39	0.04±0.35	0.21±0.21

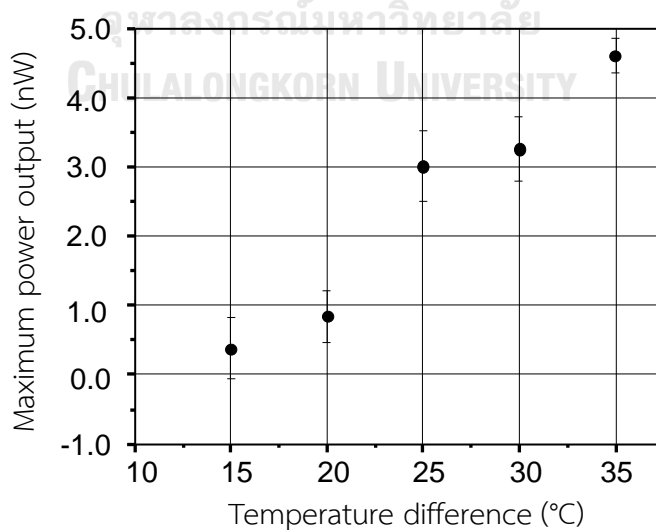
4.2.2 ทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูล

การทดสอบการผลิตกระแสไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลเป็นการทดสอบโดยนำเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากหัวข้อที่ 4.2.1 มาประกอบกันเป็นมอดูลเพื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์สำหรับทำงานร่วมกับเซลล์สุริยะ โดยเป็นการทดสอบเพื่อหาลักษณะสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

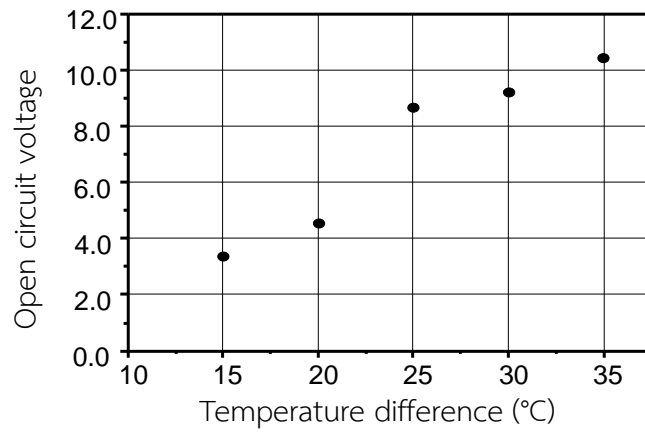


รูปที่ 4. 10 เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบขึ้นจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด PEDOT:PSS

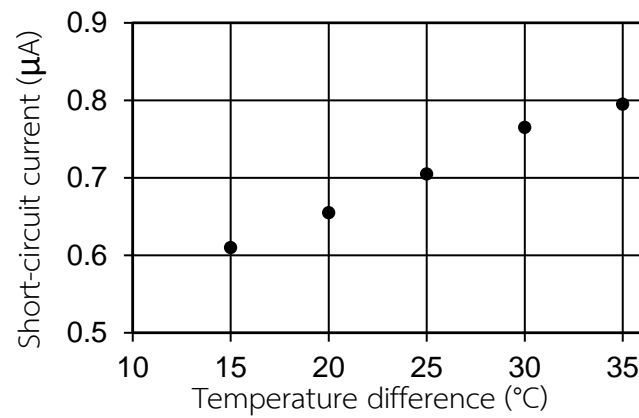
จัดระบบทดสอบตามรูปที่ 3.9 เติมน้ำร้อนเข้าสู่ระบบควบคุมอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง $25^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ และ $25^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และรอให้ระบบเสถียรเป็นเวลา 10 – 15 นาทีในช่วงเริ่มต้นการทดสอบ จากนั้นบันทึกค่าลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลได้แก่ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายในเซลล์ รวมถึงทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของมอดูลเมื่อแปรเปลี่ยนค่าความต้านทานภายนอกและบันทึกค่าหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ดังตัวอย่างข้อมูลความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก. และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดของมอดูล แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และความต้านทานภายในของมอดูลกับผลต่างอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.11 ก., ข., ค., และง. และได้ข้อมูลสรุปในตารางที่ 4.3



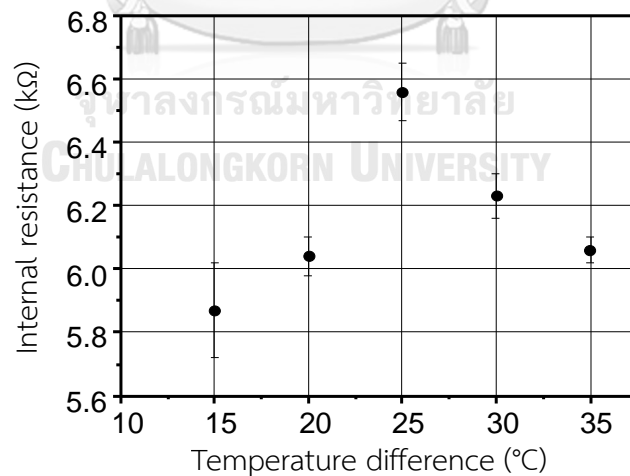
ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดของมอดูลกับผลต่างอุณหภูมิ



ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดกับผลต่างอุณหภูมิ



ค. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับผลต่างอุณหภูมิ



ง. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในของมอดูลกับผลต่างอุณหภูมิ

รูปที่ 4. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และความต้านทานภายในของมอดูลกับผลต่างอุณหภูมิ

ผลการทดสอบพบว่าเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลที่ทดสอบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 0.439 – 4.613 nW ทุกช่วงผลต่างอุณหภูมิที่เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลซึ่งเกิดจากเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่1และ2 นำมาต่ออนุกรมกัน สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากปัจจัยของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ที่เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ซีเบกเมื่อผลต่างอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1 และผลจากการต่ออนุกรมกันของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งทำให้เกิดการรวมกันของแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่เมื่อพิจารณา ค่าความต้านทานภายในมอดูลมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ยังไม่ชัดเจนทุกช่วงผลต่างอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในวงจรมากขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีแนวโน้มลดลงทุกช่วงผลต่างอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 สันนิษฐานว่าเกิดจากค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์มีค่าไม่เท่ากัน เมื่อนำมาต่ออนุกรมกันจึงก่อให้เกิดการหน่วงซึ่งกันและกัน เป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไม่ใช่กระแสไฟฟ้าสูงสุด และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด สันนิษฐานว่า เมื่อมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีความหนาเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนไม่ทั่วถึงเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกทุกเซลล์ในวงจร เป็นผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนและต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

ตารางที่ 4. 3 ข้อมูลลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลที่ประกอบจากเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 2 เซลล์ที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C

ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	35	30	25	20	15
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของมอดูล (nW)	4.60±0.25	3.26±0.47	3.01±0.50	0.84±0.37	0.38±0.45
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด(mV)	10.45±0.05	9.22±0.06	8.68±0.08	4.57±0.03	3.36±0.06
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (µA)	1.72±0.00	1.48±0.01	1.32±0.01	0.76±0.00	1.75±0.01
ความต้านทานภายในของมอดูล (kΩ)	6.06±0.04	6.23±0.07	6.56±0.09	6.04±0.06	5.87±0.15

ตารางที่ 4. 4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลในงานวิจัย 2, 3, 4 และ 5 มอดูลที่ผลต่างอุณหภูมิ 35°C, 30°C, 25°C, 20°C และ 15°C

ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของมอดูล (nW)			
	2 มอดูล (เซลล์ที่1และ2)	3 มอดูล (เซลล์ที่1 2 และ3)	4 มอดูล (เซลล์ที่1 2 3 และ4)	5 มอดูล (เซลล์ที่1 2 3 4 และ5)
35	4.60±0.25	4.53±0.38	1.99±0.50	0.13±0.20
30	3.26±0.47	2.58±1.12	1.62±0.33	0.06±0.80
25	3.01±0.50	1.61±0.55	1.14±0.49	0.05±1.65
20	0.84±0.37	0.82±0.73	0.58±0.45	0.03±1.44
15	0.38±0.45	0.54±0.47	0.41±0.12	0.02±0.80

4.3 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของเซลล์สุริยะ

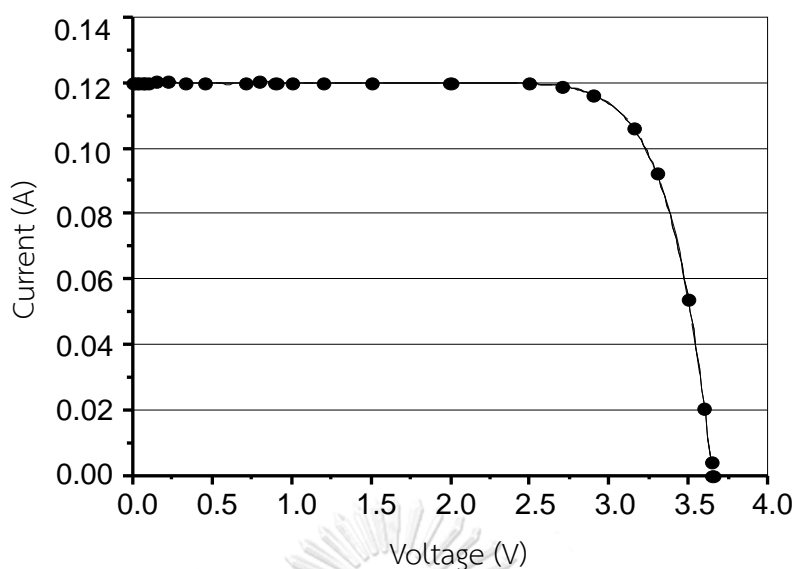
การทดสอบเพื่อหาข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเซลล์สุริยะด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ

การทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดซิลิคอนที่มีพื้นที่รับแสง 29.16 ตารางเซนติเมตรควบคุมที่อุณหภูมิห้องในช่วง 25°C - 27°C กำหนดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ 0.1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และพื้นที่รับแสง 29.16 ตารางเซนติเมตร บันทึกค่าหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ดังตัวอย่างข้อมูลความสัมพันธ์ในภาคผนวก ข. และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 4.12 รวมถึงทราบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าได้ข้อมูลดังสรุปในตารางที่ 4.5

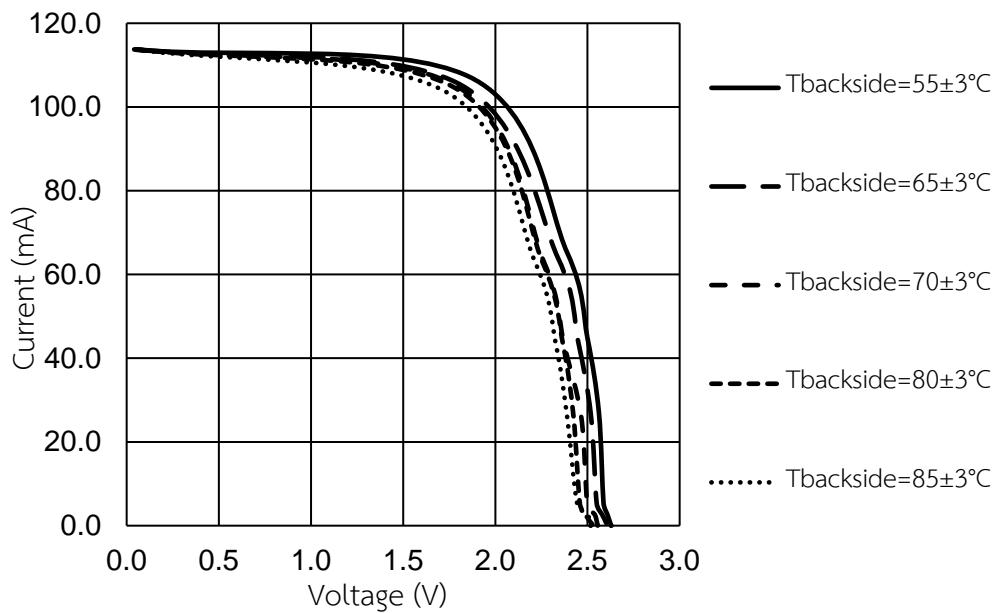
ตารางที่ 4. 5 กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่สภาวะความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ 0.1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรอุณหภูมิห้องในช่วง 25°C - 27°C

กำลังไฟฟ้าสูงสุด	(W)	0.341
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด	(V)	3.649
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร	(A/cm ²)	0.004
ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า	(%)	11.694

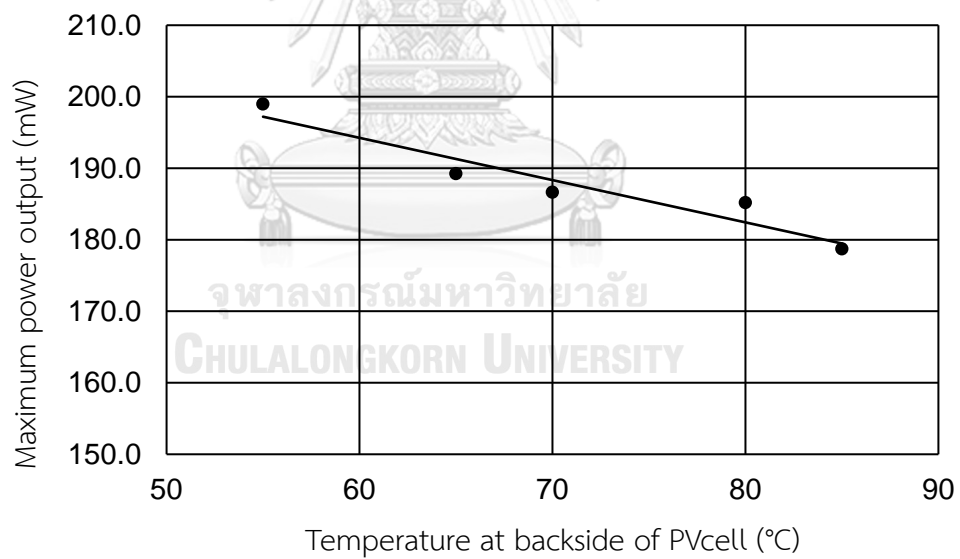


รูปที่ 4. 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่สภาวะความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ 0.1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิห้องในช่วง 25°C - 27°C

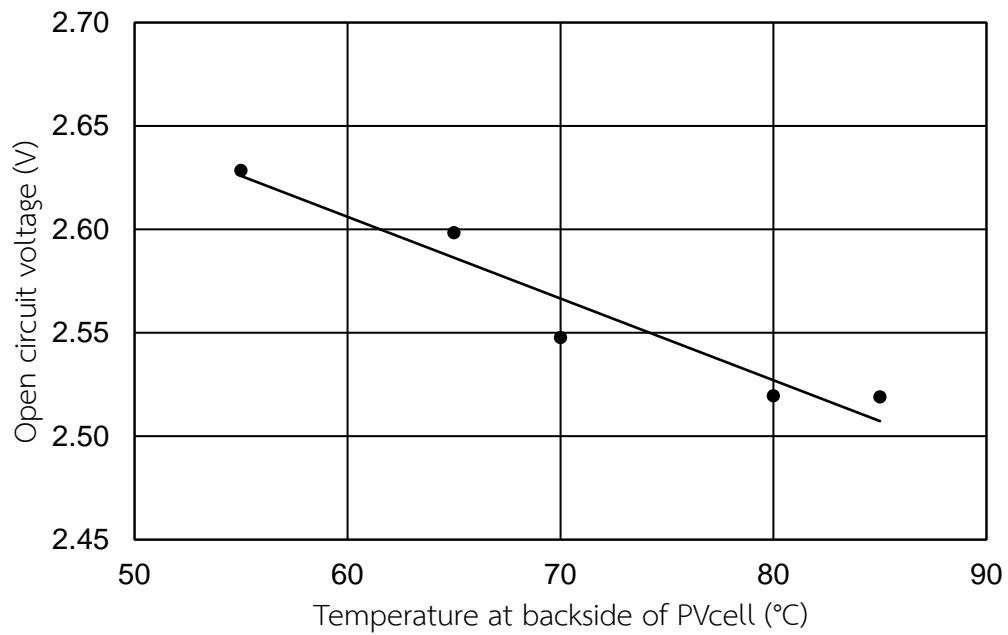
อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันระหว่างเซลล์สุริยะและเทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน และเนื่องจากระบบทดสอบตามหัวข้อที่ 3.4.2 ซึ่งเป็นระบบวัดมาตรฐานไม่สามารถสร้างผลต่างอุณหภูมิให้เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองฝั่งของเทอร์โมอิเล็กทริก ดังนั้นจึงต้องออกแบบเครื่องมือเพื่อพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าดังระบบทดสอบตามรูปที่ 3.11 กำหนดความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงให้คงที่ในช่วง 21,980 – 22,100 lx และพื้นที่รับแสง 29.16 ตารางเซนติเมตร จึงมีความจำเป็นที่ต้องทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะภายใต้สภาวะและระบบทดสอบดังกล่าว โดยบันทึกค่าหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ดังตัวอย่างข้อมูลความสัมพันธ์ในภาคผนวก ค. และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 4.13 รวมถึงหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ ดังกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.14 ก., ข., และค. เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากระบบรวมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกดังกล่าวในหัวข้อถัดไป



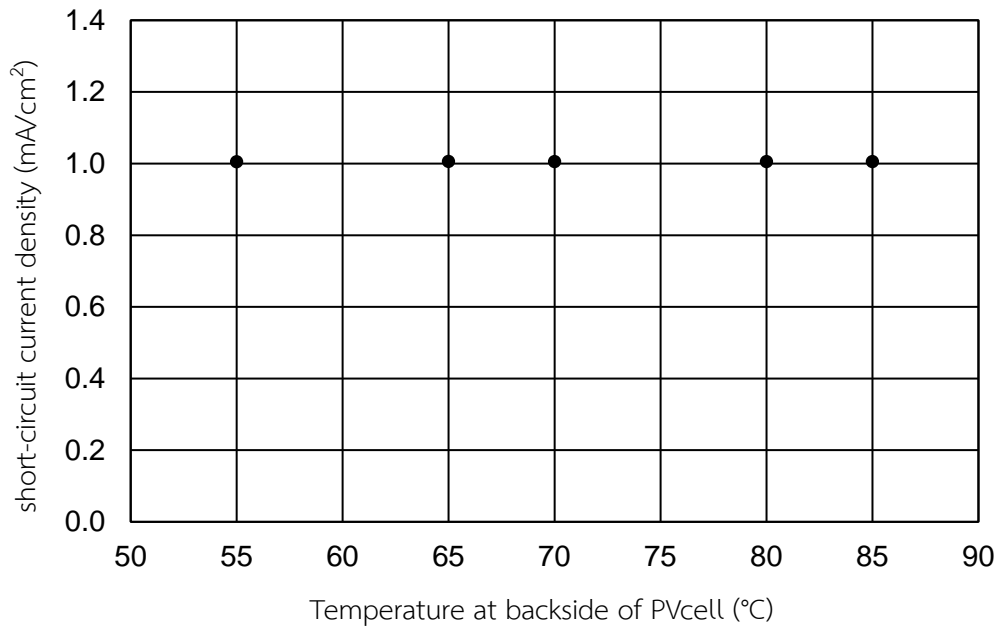
รูปที่ 4. 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่ความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงคงที่อยู่ในช่วง 21,980 – 22,100 lx ที่สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะแตกต่างกัน



ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ



ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ



ค. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ

รูปที่ 4. 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์สุริยะกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ

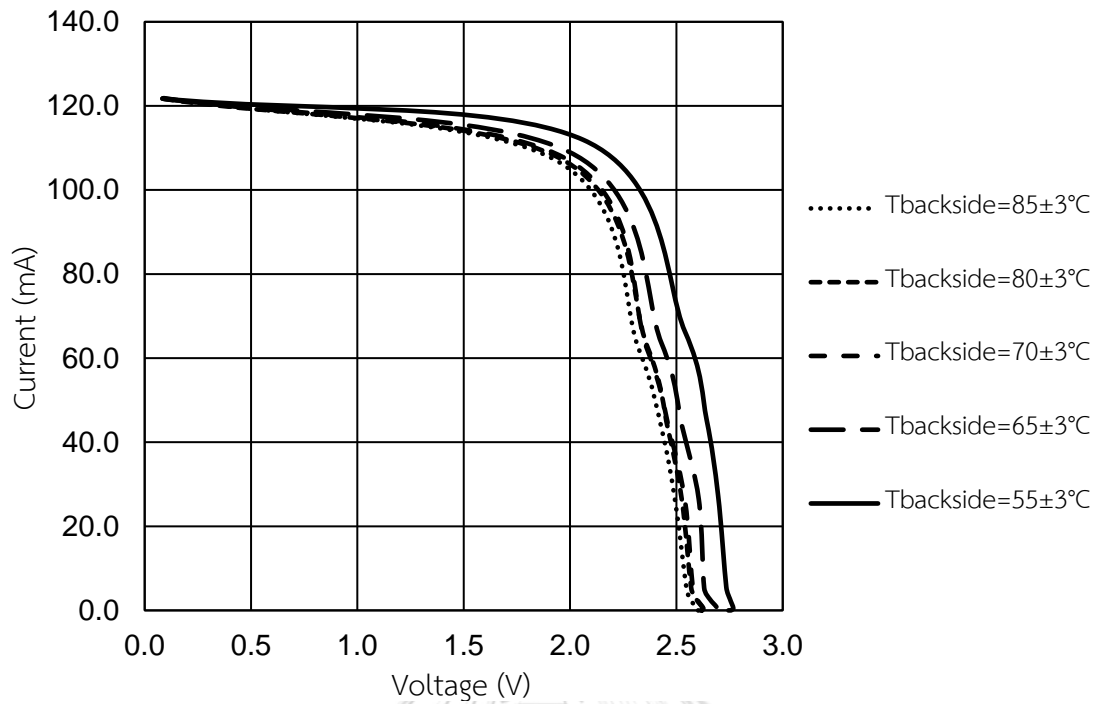
จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะไม่แปรตามอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ ในทางกลับกันแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะเมื่อจำลองความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ให้คงที่ผ่านการควบคุมความสว่างของแหล่งกำเนิดแสง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์สุริยะมีสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวิศิษฐ์ มหานิลและคณะ (2550)[24] ได้ศึกษาผลระหว่างลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะดังกล่าวกับอุณหภูมิของเซลล์สุริยะ กล่าวว่า ปริมาณของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์แต่จะไม่แปรตามอุณหภูมิของเซลล์สุริยะ เนื่องจากขณะทำงานเซลล์สุริยะจำเป็นต้องมีพลังงานมากระตุ้น ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุม ดังนั้นหากแสงที่มาจากกระทบบมีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงมากจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุมสูงมากขึ้นด้วย ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิของเซลล์สุริยะเมื่อความเข้มรังสีแสงอาทิตย์คงที่ เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์สุริยะที่ลดลงมีผลต่อการเพิ่มช่องว่างแถบพลังงาน และการลดจำนวนคู่อิเล็กตรอน-หลุม ทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนช่องว่างพลังงานเพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิใด ๆ

4.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

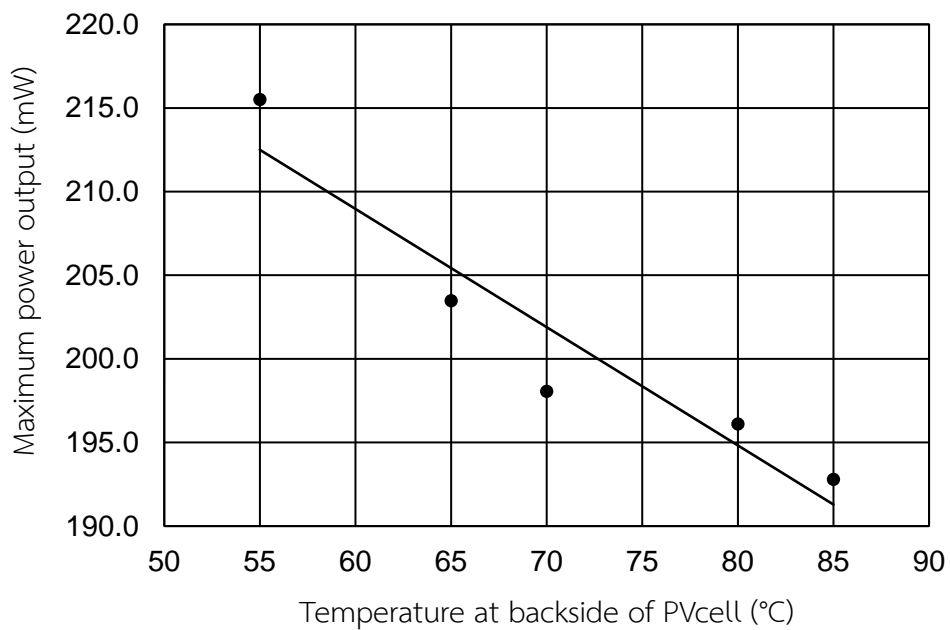
การทดสอบเพื่อหาข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

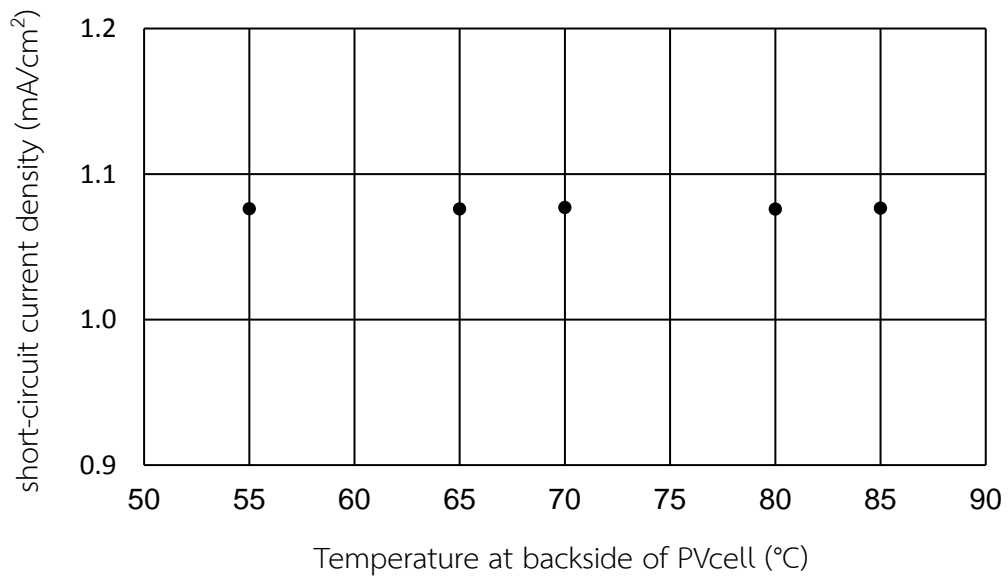
การทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากการนำเซลล์สุริยะชนิดซิลิกอนต่ออนุกรมกับมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกตั้งระบบทดสอบตามรูปที่ 3.10 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน กำหนดความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงให้คงที่ในช่วง 21,980 – 22,100 lx และพื้นที่รับแสง 29.16 ตารางเซนติเมตร บันทึกค่าหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ดังตัวอย่างข้อมูลความสัมพันธ์ในภาคผนวก ค. และกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.15 รวมถึงทราบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ดังกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.16 ก., ข., และค.



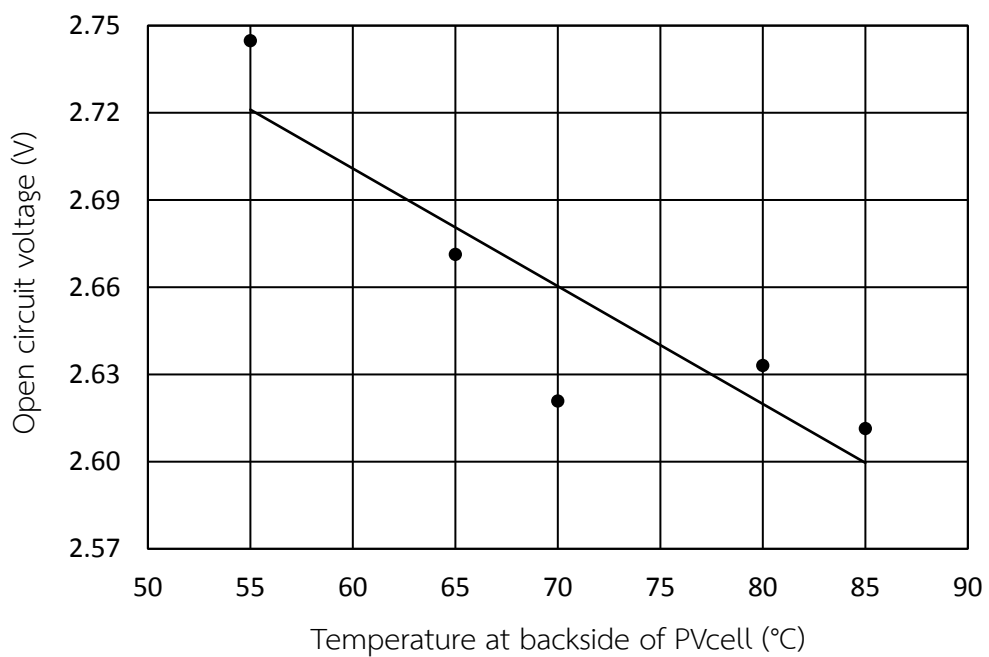
รูปที่ 4. 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงคงที่ที่อยู่ในช่วง 21,980 – 22,100 lx ที่สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะแตกต่างกัน



ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ



ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ



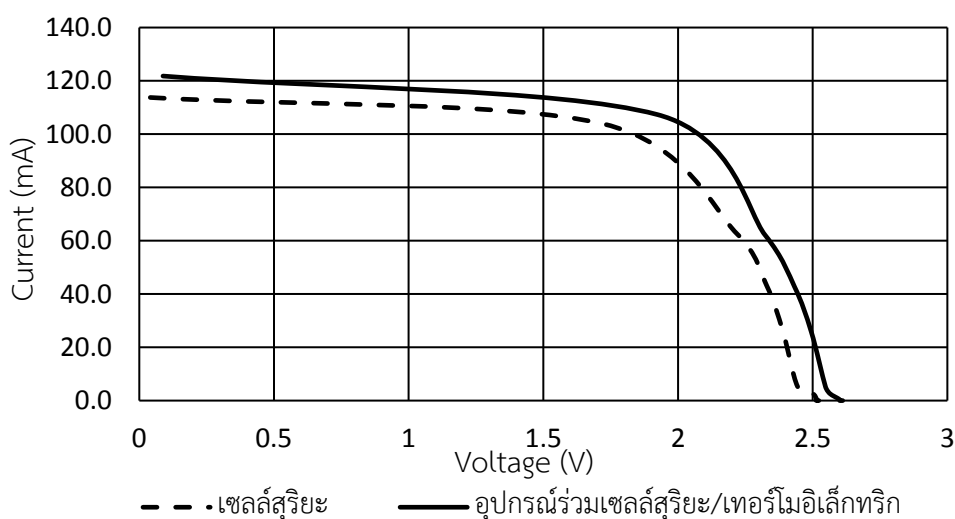
ค. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ

รูปที่ 4. 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด ของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ

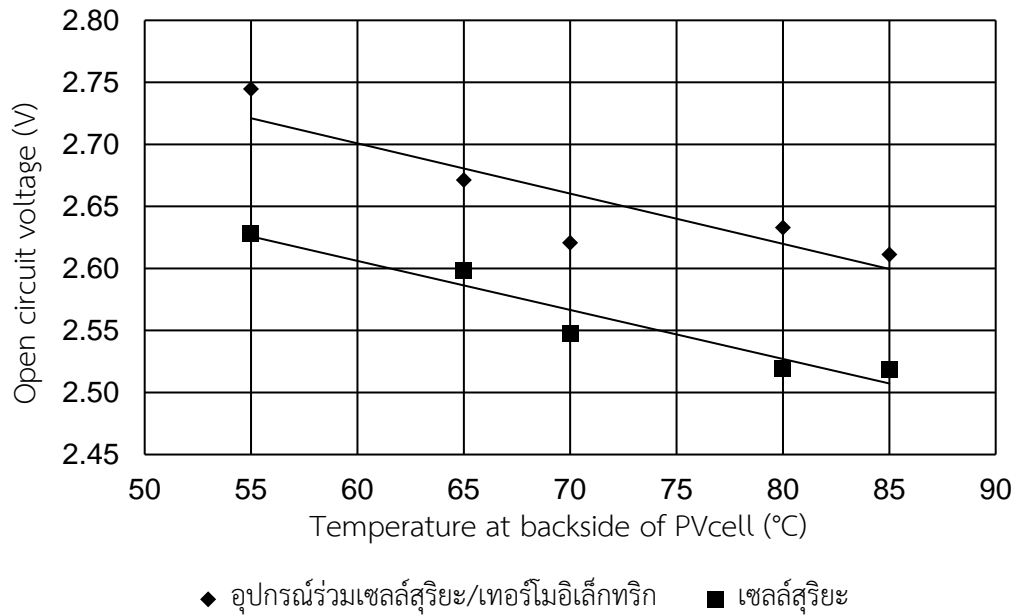
จากรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณา กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับผลการทดลองของเซลล์สุริยะ แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะในระบบอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกแสดงอิทธิพลเหนือกว่าสมบัติเชิงไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก อย่างไรก็ตาม เพื่อทราบถึงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อระบบอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก จึงมีความจำเป็นต้องนำข้อมูลสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเซลล์สุริยะดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเซลล์สุริยะ

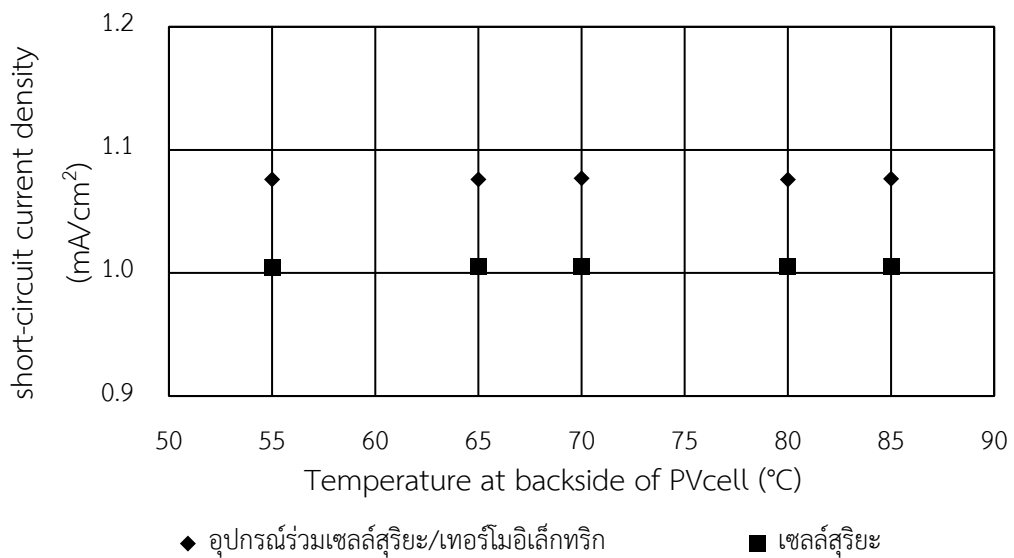
จากผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะและอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกในหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.4.1 ตามลำดับ สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับกระแสไฟฟ้าดังตัวอย่างรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นข้อมูลที่สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ $85 \pm 3^{\circ}\text{C}$ จากกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.13 และ 4.15 และสมบัติเชิงไฟฟ้าภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ ดังกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.18 ก. ข. และค. และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดดังกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4. 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกที่ความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงให้คงที่อยู่ที่ในช่วง 21,980 – 22,100 lx ที่สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ $85 \pm 3^{\circ}\text{C}$



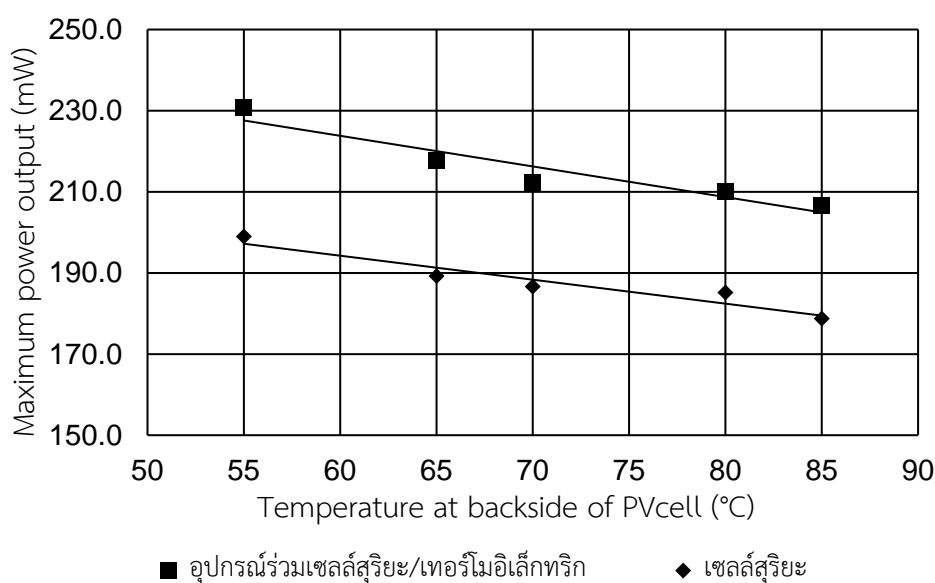
ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ



ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ

รูปที่ 4. 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะเทียบกับเซลล์สุริยะ

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรถูกเปิดที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน สันนิษฐานว่า เป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะหลุมอิเล็กตรอนจากปลายด้านเย็นสู่ปลายด้านร้อน ก่อให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างปลายทั้งสองด้าน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรถูกเปิดที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าเซลล์สุริยะภายใต้สภาวะเดียวกัน อย่างไรก็ตาม จากสมมติฐานข้างต้นมีความเป็นไปได้ไม่สูงที่จะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรถูกเปิดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยสันนิษฐานว่ามีปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ที่ช่วยเสริมให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรถูกเปิดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ หนึ่งในปัจจัยที่สันนิษฐาน คือ การสะสมความร้อนของโลหะที่บริเวณปลายฝั่งร้อนของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ก่อให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่าที่เทอร์โมมิเตอร์วัดได้ ส่งผลให้เกิดผลต่างอุณหภูมิที่สูงกว่าที่คาดการณ์ไว้เป็นผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรถูกเปิดมีค่าสูงกว่าที่ควรจะเป็น ในขณะที่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน เนื่องจากผลของความสว่างที่ใช้ในการทดสอบ ณ สภาวะที่ทดสอบอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีความคลาดเคลื่อนจากเซลล์สุริยะเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่จำลองผ่านการควบคุมความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงมีความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 4. 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์สุริยะเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะ สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อผลต่างอุณหภูมิสูงขึ้นตามปรากฏการณ์ซีเบกที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1 ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์สุริยะ อย่างไรก็ตาม จากสมมติฐานข้างต้นมีความเป็นไปได้ไม่สูงที่จะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยสันนิษฐานว่ามีปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ที่ช่วยเสริมให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติและผลของรูปแบบการจัดวางของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกและศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์สุริยะเมื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก พร้อมทั้งวิจารณ์และเสนอข้อเสนอนี้เพื่อเป็นแนวทางพัฒนาต่อไป โดยผลการตรวจสอบมีดังนี้

5.1.1 สมบัติเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Electrical properties of conductive polymer)

ก. สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (Electrical conductivity at room temperature)

สภาพนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS เมื่อเติมสารเจือชนิดเอททีลีนไกลคอล (EG) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณร้อยละของ EG เพิ่มขึ้น โดยปริมาณ EG ร้อยละ 48 โดยน้ำหนักให้ค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) มากที่สุดคือ 0.044 ± 0.004 MS/m และมีค่าลดลงเมื่อเติมสารเจือชนิดไฮดราซีนไฮเดรตทุกช่วงปริมาณร้อยละของไฮดราซีนไฮเดรตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ข. สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง (Seebeck coefficient at room temperature)

สัมประสิทธิ์ซีเบกของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS เมื่อเติมสารเจือชนิดเอททีลีนไกลคอล (EG) และ ไฮดราซีนไฮเดรต เข้าไปในโครงสร้างตามลำดับแสดงค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำชนิด p โดยมีพาหะอิสระส่วนใหญ่เป็นหลุมอิเล็กตรอน โดยทุกปริมาณการเจือด้วย EG มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก (S) คงที่ 10.00 ± 0.03 $\mu\text{V/K}$ แสดงให้เห็นว่าการเจือ EG เข้าไปในโครงสร้างของ PEDOT:PSS ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบก อย่างไรก็ตาม เมื่อเจือไฮดราซีนไฮเดรตปริมาณร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก ค่า S เพิ่มขึ้นเป็น 20.0 ± 0.1 $\mu\text{V/K}$ และมีค่าคงที่ที่ 10.00 ± 0.03 $\mu\text{V/K}$ ที่ปริมาณร้อยละไฮดราซีนในช่วงปริมาณร้อยละที่เหลือในงานวิจัยนี้

ค. แฟกเตอร์กำลัง (Power factor: PF)

แฟกเตอร์กำลัง PF ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิด PEDOT:PSS เมื่อเติมสารเจือชนิดเอททีลีนไกลคอล (EG) และ ไฮดราซีนไฮเดรต เมื่อพิจารณาทุกปริมาณร้อยละการเจือด้วยเอททีลีนไกลคอล (EG) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละของ EG ที่เพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมเพิ่มขึ้นลักษณะเดียวกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) โดยมีค่า PF มากที่สุด 4.38 ± 0.40 $\mu\text{W/mK}^2$ ที่ปริมาณร้อยละของ EG 48

โดยน้ำหนัก และลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเติมสารเจือชนิดไฮดราซีนไฮเดรตทุกช่วงปริมาณร้อยละของไฮดราซีนไฮเดรตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

5.1.2 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

ก. ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	35	30	25	20	15
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ (nW)	2.86±0.17	2.32±0.17	1.82±0.13	1.59±0.53	0.52±0.37
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเปิด (mV)	7.228	6.602	5.980	5.285	3.228
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (μ A)	1.605	1.425	1.275	1.375	0.775
ความต้านทานภายในเซลล์ (k Ω)	4.62±0.02	4.69±0.02	4.69±0.02	4.08±0.10	4.38±0.08

ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่มีผลมาจากปัจจัยของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดที่เพิ่มขึ้นจากผลต่างอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ซีเบกที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1

ข. ผลของจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (nW)			
	2 มอดูล (เซลล์ที่1และ2)	3 มอดูล (เซลล์ที่1 2 และ3)	4 มอดูล (เซลล์ที่1 2 3 และ4)	5 มอดูล (เซลล์ที่1 2 3 4 และ5)
35	4.60±0.25	4.53±0.38	1.99±0.50	0.13±0.20
30	3.26±0.47	2.58±1.12	1.62±0.33	0.06±0.80
25	3.01±0.50	1.61±0.55	1.14±0.49	0.05±1.65
20	0.84±0.37	0.82±0.73	0.58±0.45	0.03±1.44
15	0.38±0.45	0.54±0.47	0.41±0.12	0.02±0.80

จากผลการทดลองพบว่า เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลที่ทดสอบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 0.439 – 4.613 nW ทุกช่วงผลต่างอุณหภูมิที่เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลซึ่งเกิดจากเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ 1 และ 2 นำมาต่ออนุกรมกัน ในขณะที่เมื่อจำนวนเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกในวงจรเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ลดลงทุกช่วงผลต่างอุณหภูมิ ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเกิดจากค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์มีค่าไม่เท่ากัน เมื่อนำมาต่ออนุกรมกันจึงก่อให้เกิดการหน่วงซึ่งกันและกัน เป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไม่ใช่กระแสไฟฟ้าสูงสุด และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด สันนิษฐานว่า เมื่อมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมีความหนาเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนไม่ทั่วถึงเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกทุกเซลล์ในวงจร เป็นผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนและต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

5.1.3 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของเซลล์สุริยะ

จากผลการทดสอบพบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะไม่แปรตามอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ ในทางกลับกันแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะเมื่อความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่จำลองผ่านการควบคุมความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงคงที่ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์สุริยะมีสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะ

5.1.4 การพิสูจน์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

ก. ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน มีลักษณะสมบัติแนวโน้มในทิศทางเดียวกับผลการทดลองของเซลล์สุริยะ แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะในระบบอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกแสดงอิทธิพลเหนือกว่าสมบัติเชิงไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก

ข. ผลการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเทียบกับเซลล์สุริยะ

- **แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด** ที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน สันนิษฐานว่า เป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะหลุม-อิเล็กตรอนระหว่างปลายด้านเย็นและปลายด้านร้อนในทิศทางตรงกันข้ามดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก่อให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่าง

ปลายทั้งสองด้าน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าเซลล์สุริยะภายใต้สภาวะเดียวกัน อย่างไรก็ตาม จากสมมติฐานข้างต้นมีความเป็นไปได้ไม่สูงที่จะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยสันนิษฐานว่ามีปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ที่ช่วยเสริมให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ หนึ่งในปัจจัยที่สันนิษฐาน คือ การสะสมความร้อนของโลหะที่บริเวณปลายฝั่งร้อนของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ก่อให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่าที่เทอร์โมมิเตอร์วัดได้ ส่งผลให้เกิดผลต่างอุณหภูมิที่สูงกว่าที่คาดการณ์ไว้เป็นผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิดมีค่าสูงกว่าที่ควรจะเป็น

- **ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร** ที่วัดได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะภายใต้สภาวะอุณหภูมิด้านหลังเซลล์สุริยะและผลต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน เนื่องจากผลของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่จำลองผ่านการควบคุมความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดสอบตามหัวข้อที่ 3.4.3 ณ สภาวะที่ทดสอบอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีความคลาดเคลื่อนจากเซลล์สุริยะ
- **กำลังไฟฟ้าสูงสุด** ที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อผลต่างอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์สุริยะ อย่างไรก็ตาม จากสมมติฐานข้างต้นมีความเป็นไปได้ไม่สูงที่จะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยสันนิษฐานว่ามีปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ที่ช่วยเสริมให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าเซลล์สุริยะอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำจากกระดามีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก สันนิษฐานว่ามาจากการปนเปื้อนจากสภาวะภายนอก เช่น การหลุดลอกของผิวหน้าสัมผัสของเนื้อสารทำให้มีความจำเป็นต้องซ่อมแซมวงจรอยู่บ่อยครั้ง ดังนั้นควรหาวิธีการป้องกันหรือห่อหุ้มเทอร์โมอิเล็กทริกไม่ให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกแต่ไม่รบกวนการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในระบบ อาจจะช่วยลดการปนเปื้อนจากสภาวะภายนอกและเพิ่มประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกได้

5.2.2 ควรมีการสร้างแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อใช้ทำนายลักษณะสมบัติของเซลล์สุริยะและเทอร์โมอิเล็กทริกก่อนเริ่มทำการทดลอง เช่น ความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับเซลล์สุริยะที่เลือกใช้ ตลอดจนการเชื่อมต่อทางวงจรไฟฟ้าของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์ทั้งแบบอนุกรมและขนานก่อนเริ่มประกอบเป็นมอดูล

5.2.3 การต่อวงจรร่วมกันระหว่างเซลล์สุริยะกับเทอร์โมอิเล็กทริก ใช้แผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นประกบบริเวณปลายฝั่งร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อดึงความร้อนจากบริเวณด้านหลังเซลล์สุริยะสู่เทอร์โมอิเล็กทริก อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวมีการระบายความร้อนที่ไม่ดีมากนักก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายในระหว่างแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่น ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณปลายฝั่งร้อนสู่บริเวณปลายฝั่งเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้ผลต่างอุณหภูมิระหว่างปลายทั้งสองฝั่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณได้จากการอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ที่บริเวณปลายทั้งสองฝั่ง ดังนั้นการพัฒนาในส่วนของกระบวนการระบายความร้อนระหว่างรอยต่อของทั้งสองอุปกรณ์เป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเพื่อลดผลของการสะสมความร้อนที่บริเวณดังกล่าว

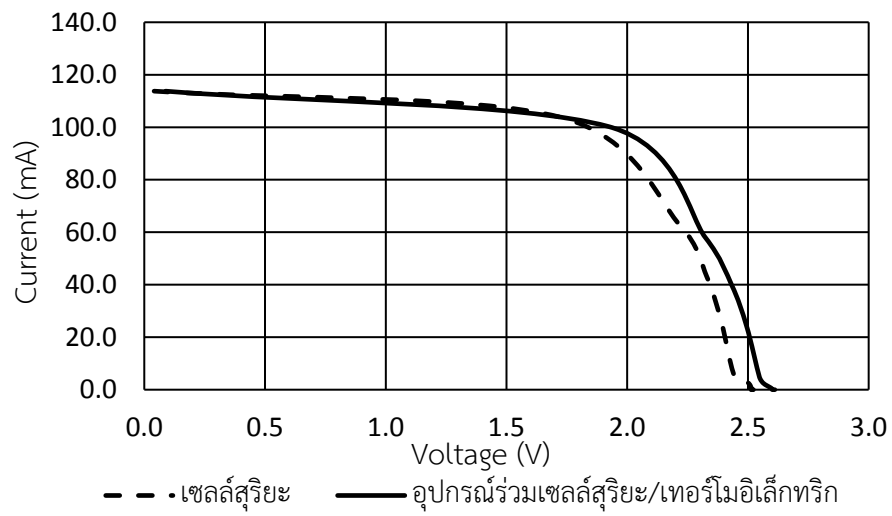
5.2.4 เนื่องจาก PEDOT:PSS มีน้ำเป็นส่วนประกอบเป็นจำนวนมาก ทำให้มีความคงทนต่ำและยากต่อการขึ้นรูป ดังนั้นควรหาพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีความคงทนเพิ่มขึ้น เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พร้อมทั้งผสมผงคาร์บอนเพื่อช่วยในการเพิ่มสภาพนำไฟฟ้า

5.2.5 การประกอบมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกระหว่างเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละเซลล์ควรเพิ่มแผ่นทองแดงระหว่างแผ่นกระดาษเพื่อกระจายความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนให้ทั่วถึงทุกแผ่นกระดาษ

5.2.6 จากทฤษฎีเทวินิน สามารถใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานเพื่อใช้ยู่บวงจรให้มีความสะดวกต่อการคำนวณสำหรับคาดการณ์การเชื่อมต่อทางวงจรไฟฟ้าของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบขนานดังแสดงในภาคผนวก ง

5.3 อภิปรายผล

5.3.1 จากงานวิจัยของวิศิษฐ์ มหานิลและคณะ (2550)[24] ได้ศึกษาผลระหว่างลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะดังกล่าวกับอุณหภูมิของเซลล์สุริยะ กล่าวว่า ปริมาณของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์แต่จะไม่แปรตามอุณหภูมิของเซลล์สุริยะ เพื่อให้สมบัติเชิงไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกและเซลล์สุริยะสามารถเปรียบเทียบกันได้ อาจสามารถปรับอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกให้เทียบเท่ากับเซลล์สุริยะจากรูปที่ 4.17 ดังแสดงในรูปที่ 5.1. เพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานสำหรับการเปรียบเทียบสมบัติเชิงไฟฟ้าเมื่อประกอบเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลเข้าไปในวงจรของอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 5. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ร่วมเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อปรับอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 4. 17

บรรณานุกรม

- [1] Wasfi M. et.al, *Solar Energy and Photovoltaic Systems*. 2011: Journal of Selected Areas in Renewable Energy.
- [2] Park K.T. et.al, *Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices*. Scientific Reports, 2013. **3**: p. 2123.
- [3] Park T. et.al, *Photothermally Activated Pyroelectric Polymer Films for Harvesting of Solar Heat with a Hybrid Energy Cell Structure*. ACS Nano, 2015. **9**(12): p. 11830-9.
- [4] Jiang Q. et.al, *Improved thermoelectric performance of PEDOT:PSS films prepared by polar-solvent vapor annealing method*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013. **24**(11): p. 4240-4246.
- [5] Sun K. et.al, *Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015. **26**(7): p. 4438-4462.
- [6] Kim G.H. et.al, *Engineered doping of organic semiconductors for enhanced thermoelectric efficiency*. Nature Material, 2013. **12**(8): p. 719-23.
- [7] วินัส เทศมยา, สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารโอรอนโดซิลไซด์ที่เจือด้วยดีบุก. 2561, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] Stepien L. et.al, *Progress in Polymer Thermoelectrics*. 2016.
- [9] Wei Q. et.al, *Polymer thermoelectric modules screen-printed on paper*. RSC Adv., 2014. **4**(54): p. 28802-28806.
- [10] *Toshiba Giga Topaz thermoelectric module*. Available from: <http://museum.toshiba.co.jp/06energy/newtech141.html>.
- [11] แรงเคลื่อนไฟฟ้า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์ ความต่างศักย์ภายในเซลล์. Available from: <https://orapanwaipan.wordpress.com>.
- [12] Montecucco A. et.al, *The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel*. Elsevier, 2014. **123**: p. 47-54.
- [13] ผศ. ดร. วิษณุ บัวเทศ, ทฤษฎีเทวินิน, การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรง, สำนักพิมพ์ปัญญาชน: 747

- ชอยโลต์สเอ็ชเพรสแยกวงหิน ถนน ลาดพร้าว-วังหิน แขวง/เขต ลาดพร้าว กทม. 10230.
- [14] สมชาย กฤตพลวิวัฒน์, พลังงานแสงอาทิตย์. 2549, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [15] *Schottky junction solar cell*. 2019; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Schottky_junction_solar_cell.
- [16] แร่งเคลื่อนไฟฟ้า. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/แร่งเคลื่อนไฟฟ้า>.
- [17] *IV curve*. 2019; Available from: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>.
- [18] *Curve Tracing*. Available from: <https://www.seaward.com/gb/support/solar/faqs/29495-curve-tracing-faq-s>.
- [19] ไพบุลย์ โกวิทเจริญกุล, การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550: ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- [20] W.Li, M.C.P. et.al, *Multiphysics simulations of thermoelectric generator modules with cold and hot blocks and effects of some factors*. Elsevier, 2017. **10**: p. 63-72.
- [21] Limbu, T.B., *Developing a novel approach for layer controlled graphene synthesis and tailoring the properties for applications*, in *Physics*. 2017, Puerto Rico, Rio Piedras Campus.
- [22] Kroon R. et.al, *Thermoelectric plastics: from design to synthesis, processing and structure–property relationships*. Royal Society of Chemistry, 2016. **45**: p. 6147-6164.
- [23] Massonnet N. et.al, *Improvement of the Seebeck coefficient of PEDOT:PSS by chemical reduction combined with a novel method for its transfer using free-standing thin films*. RSC Advances, 2014: p. 1279.
- [24] วิศิษฐ์ มหานิล, การศึกษาและออกแบบระบบผลิตพลังงานร่วมเซลล์สุริยะ/ความร้อน. 2550, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลที่ประกอบด้วย 2 เซลล์

ผลต่างอุณหภูมิ 35°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (mV)	Output current (μ A)
0	0.005	1.715
10	0.021	1.695
100	0.184	1.685
500	0.855	1.585
1,000	1.581	1.455
2,000	2.788	1.285
2,500	3.272	1.195
5,000	5.098	0.905
10,000	7.039	0.595
15,000	7.915	0.425
20,000	8.425	0.315
25,000	8.945	0.245
50,000	10.025	0.085
80,000	10.285	0.015
100,000	10.318	-0.005
200,000	10.755	-0.065
500,000	10.953	-0.095
1,000,000	10.961	-0.105

ผลต่างอุณหภูมิ 30°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (mV)	Output current (μA)
0	0.006	1.515
10	0.021	1.505
100	0.166	1.465
500	0.750	1.355
1,000	1.367	1.235
2,000	2.385	1.075
2,500	2.801	0.995
5,000	4.426	0.765
10,000	6.108	0.485
15,000	7.009	0.345
20,000	7.648	0.265
25,000	8.053	0.195
50,000	9.007	0.055
80,000	9.310	-0.005
100,000	9.323	-0.025
200,000	9.690	-0.075
500,000	9.895	-0.105
1,000,000	9.910	-0.115

ผลต่างอุณหภูมิ 25°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (mV)	Output current (μA)
0	0.004	1.305
10	0.016	1.285
100	0.146	1.275
500	0.680	1.205
1,000	1.276	1.145
2,000	2.249	1.005
2,500	2.674	0.945
5,000	4.206	0.715
10,000	5.785	0.455
15,000	6.705	0.325
20,000	7.187	0.235
25,000	7.459	0.175
50,000	8.269	0.045
80,000	8.525	-0.015
100,000	8.615	-0.025
200,000	8.859	-0.075
500,000	8.919	-0.105
1,000,000	8.850	-0.115

ผลต่างอุณหภูมิ 20°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (mV)	Output current (μA)
0	0.004	0.775
10	0.012	0.755
100	0.092	0.735
500	0.417	0.675
1,000	0.764	0.645
2,000	1.338	0.535
2,500	1.567	0.485
5,000	2.430	0.345
10,000	3.352	0.205
15,000	3.865	0.125
20,000	4.135	0.075
25,000	4.310	0.045
50,000	4.782	-0.035
80,000	4.823	-0.065
100,000	4.825	-0.075
200,000	4.932	-0.095
500,000	4.997	-0.105
1,000,000	4.960	-0.115

ผลต่างอุณหภูมิ 15°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (mV)	Output current (μA)
0	0.004	0.590
10	0.010	0.580
100	0.075	0.555
500	0.337	0.515
1,000	0.626	0.460
2,000	1.098	0.400
2,500	1.259	0.320
5,000	1.954	0.205
10,000	2.724	0.110
15,000	3.112	0.060
20,000	3.327	0.025
25,000	3.473	-0.020
50,000	3.870	-0.020
80,000	4.027	-0.040
100,000	4.074	-0.090
200,000	4.185	-0.105
500,000	4.238	-0.115
1,000,000	4.223	-0.115

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ

ผลต่างอุณหภูมิ 35°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.041	113.755
20	1.721	103.871
40	2.218	62.684
60	2.329	43.137
100	2.389	26.072
500	2.444	5.28
1,000	2.500	2.672
5,000	2.514	0.539
100,000	2.513	0.027
500,000	2.523	0.005
1,000,000	2.519	0.002

ผลต่างอุณหภูมิ 30°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.050	113.752
20	1.764	104.964
40	2.258	62.776
60	2.368	43.176
100	2.424	26.069
500	2.458	5.279
1,000	2.488	2.672
5,000	2.522	0.538
100,000	2.536	0.027
500,000	2.515	0.005
1,000,000	2.520	0.002

ผลต่างอุณหภูมิ 25°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.050	113.742
20	1.770	105.449
40	2.266	62.793
60	2.374	43.181
100	2.466	26.088
500	2.499	5.280
1,000	2.539	2.673
5,000	2.553	0.539
100,000	2.556	0.027
500,000	2.546	0.005
1,000,000	2.548	0.002

ผลต่างอุณหภูมิ 20°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.056	113.786
20	1.788	105.860
40	2.341	63.846
60	2.450	43.917
100	2.510	26.515
500	2.550	5.363
1,000	2.579	2.715
5,000	2.602	0.546
100,000	2.597	0.020
500,000	2.597	0.005
1,000,000	2.598	0.002

ผลต่างอุณหภูมิ 15°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.049	113.675
20	1.854	107.312
40	2.390	65.222
60	2.500	44.810
100	2.562	27.008
500	2.587	5.453
1,000	2.608	2.745
5,000	2.618	0.553
100,000	2.624	0.027
500,000	2.630	0.005
1,000,000	2.628	0.003

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ/เทอร์โมอิเล็กทริก

ผลต่างอุณหภูมิ 35°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.088	121.800
20	1.923	107.358
40	2.323	62.157
60	2.432	42.787
100	2.494	25.939
500	2.547	5.271
1,000	2.564	2.669
5,000	2.598	0.539
100,000	2.600	0.027
500,000	2.608	0.005
1,000,000	2.611	0.002

ผลต่างอุณหภูมิ 30°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.090	121.672
20	1.948	107.659
40	2.363	62.759
60	2.460	43.150
100	2.526	26.119
500	2.570	5.300
1,000	2.593	2.686
5,000	2.625	0.542
100,000	2.618	0.027
500,000	2.629	0.005
1,000,000	2.633	0.003

ผลต่างอุณหภูมิ 25°C

Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.089	121.852
20	1.969	107.763
40	2.361	62.347
60	2.467	42.856
100	2.541	26.005
500	2.577	5.275
1,000	2.597	2.671
5,000	2.627	0.539
100,000	2.620	0.027
500,000	2.615	0.005
1,000,000	2.621	0.002

ผลต่างอุณหภูมิ 20°C

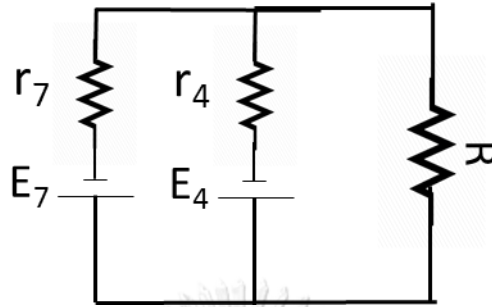
Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.083	121.738
20	1.997	109.026
40	2.430	63.560
60	2.526	43.868
100	2.605	26.433
500	2.631	5.346
1,000	2.650	2.717
5,000	2.691	0.548
100,000	2.663	0.027
500,000	2.665	0.005
1,000,000	2.671	0.004

ผลต่างอุณหภูมิ 15°C

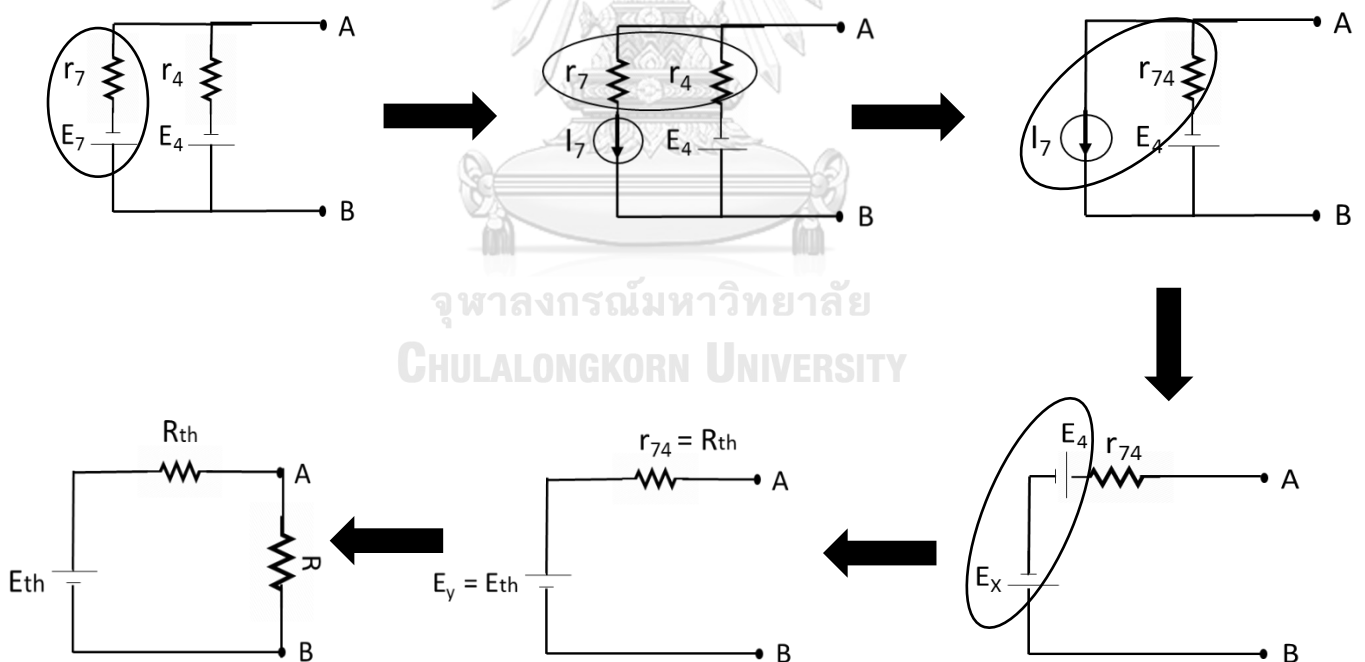
Load resistance(Ω)	Output voltage (V)	Output current (mA)
0	0.084	121.745
20	2.062	111.917
40	2.541	66.297
60	2.642	45.369
100	2.696	27.362
500	2.735	5.525
1,000	2.751	2.784
5,000	2.768	0.561
100,000	2.757	0.028
500,000	2.753	0.005
1,000,000	2.745	0.003

ภาคผนวก ง

การยุบวงจรสำหรับคาดการณ์การต่อเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบขนาน โดยใช้ทฤษฎีเทวินิน



จากวงจรข้างต้นเกิดจากการนำเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความต้านทานภายใน r_7 และ r_4 แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_7 และ E_4 ตามลำดับ เชื่อมต่อกับความต้านทานภายนอก R สามารถใช้ทฤษฎีเทวินินเพื่อช่วยยุบวงจรสำหรับคำนวณได้ ดังนี้



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสุพธิตา จงอุดมฤกษ์
วัน เดือน ปี เกิด	30 กรกฎาคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ. 2559)
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ The 25th Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2019) เมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2562



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY