



การออกแบบและพัฒนาโซล่าเซลล์โปร่งแสงด้วยเกลือสินเธาว์ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต

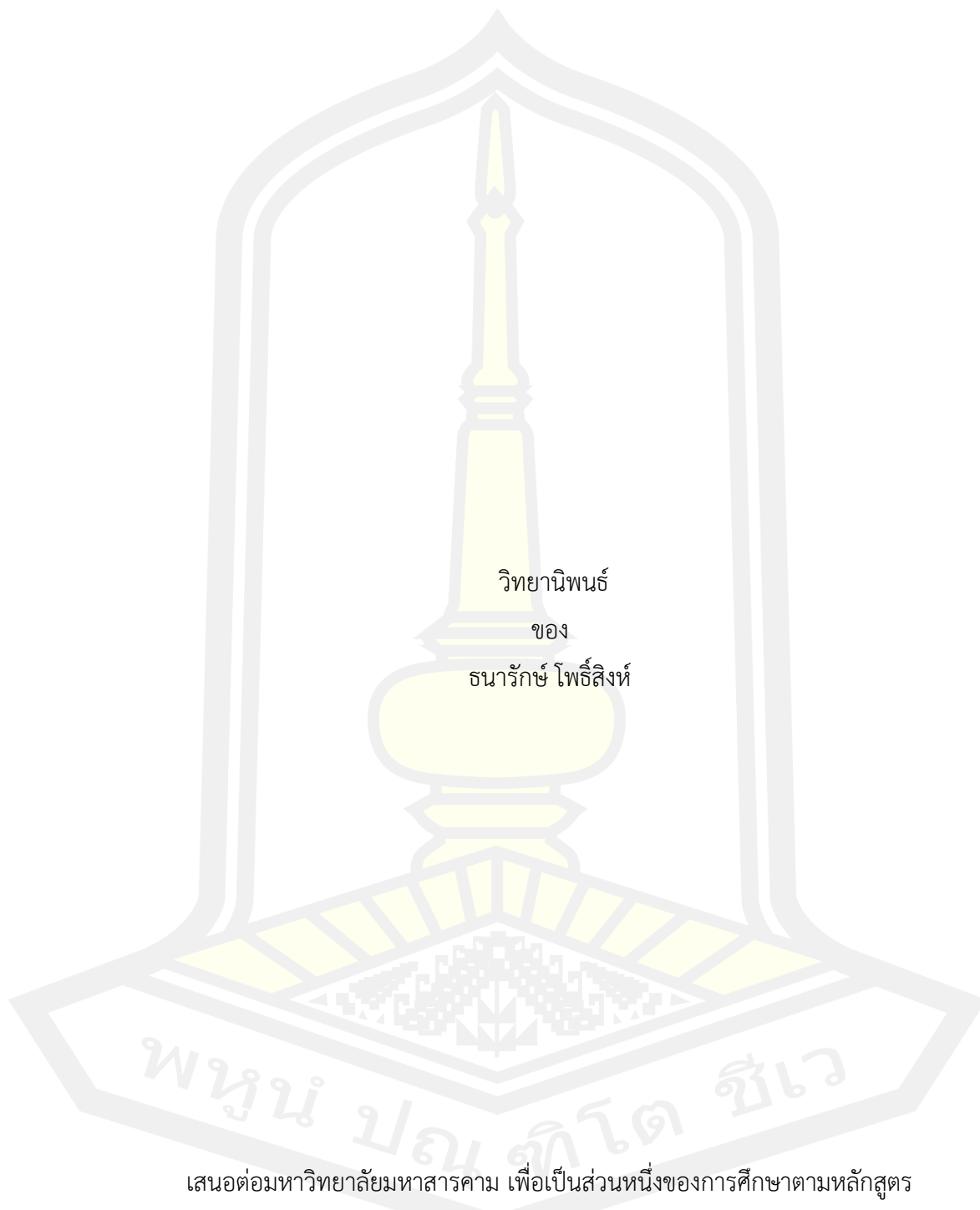
วิทยานิพนธ์  
ของ  
ธนารักษ์ โพธิ์สิงห์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ตุลาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การออกแบบและพัฒนาโซล่าเซลล์โปร่งแสงด้วยเกลือสินเธาว์ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต

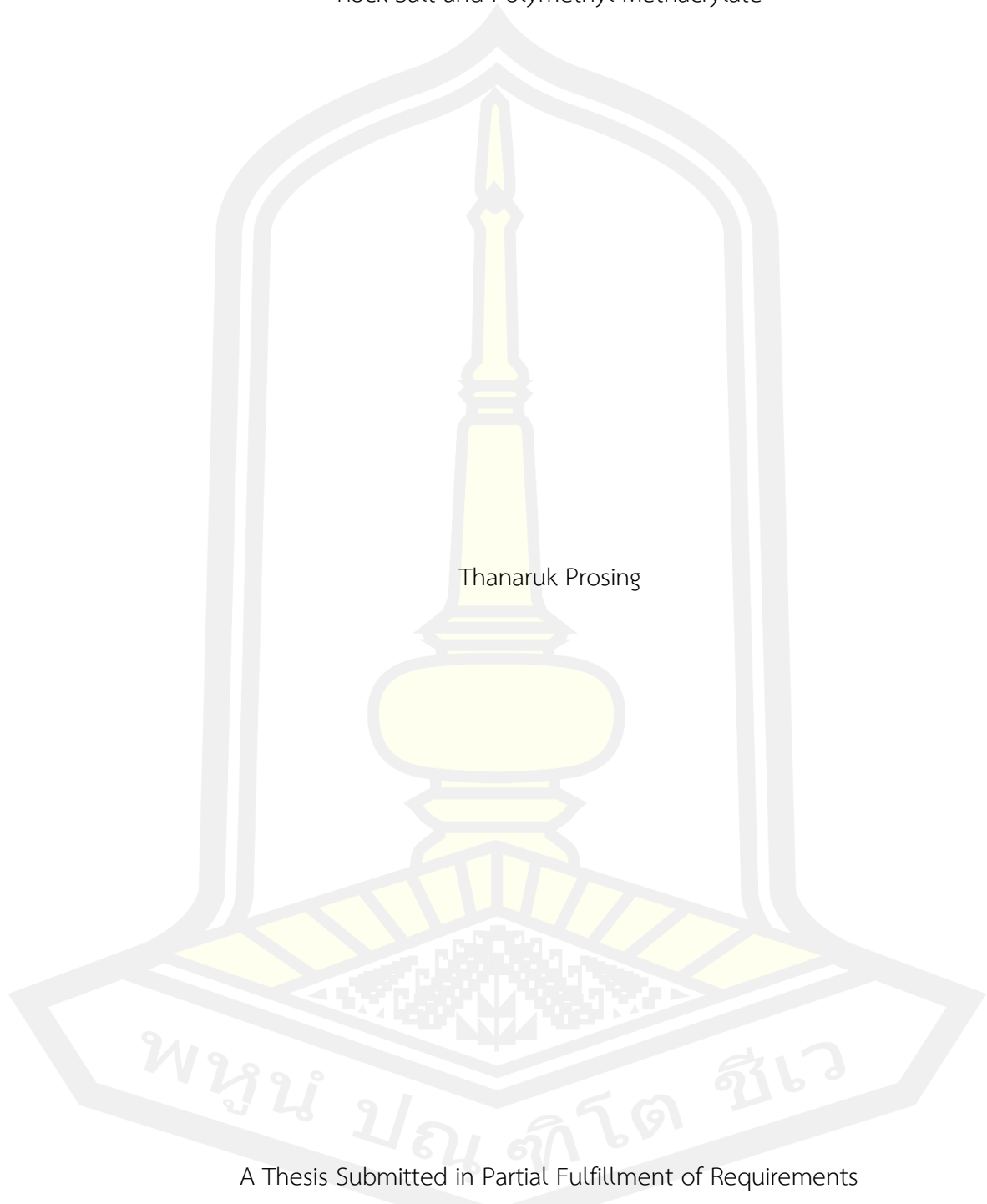


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ตุลาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Design and Development of Transparent Luminescent Solar Concentrator using Mixed  
Rock Salt and Polymethyl Methacrylate



Thanaruk Prosing

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

October 2022

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายธนารักษ์ โพธิ์สิงห์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อติเรก จันทะคุณ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง )

กรรมการ

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล )

กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การออกแบบและพัฒนาโซลาเซลล์โปร่งแสงด้วยเกลือสินเธาว์ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต		
<b>ผู้วิจัย</b>	ธนารักษ์ โพธิ์สิงห์		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง		
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
<b>มหาวิทยาลัย</b>	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	<b>ปีที่พิมพ์</b>	2565

### บทคัดย่อ

พลังงานจากรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างมหาศาล สามารถใช้ได้ประโยชน์บนพื้นผิวโลกได้หลายล้านปีและถือได้ว่าเป็นพลังงานสะอาด ด้วยเหตุนี้หลายประเทศทั่วโลกจึงหันมาใช้พลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์มากขึ้น โดยการใช้ประโยชน์จากรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นการแปลงผันพลังงานรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงโดยใช้โซลาร์เซลล์ โดยโซลาร์เซลล์แบบผลึกซิลิคอนเป็นชนิดที่นิยมที่สุด อย่างไรก็ตาม เซลล์ประเภทนี้มีลักษณะที่บดบังทำให้เกิดข้อจำกัดทางการใช้ประโยชน์ในด้านอื่นนอกเหนือจากการใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงมีการคิดค้นโซลาร์เซลล์โปร่งแสง ซึ่งเป็นโซลาร์เซลล์อีกชนิดใหม่ที่มุ่งเน้นผลิตกระแสไฟฟ้าจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีอินฟราเรดเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยจะปล่อยให้แสงขาวทะลุผ่าน แต่โซลาร์เซลล์โปร่งแสงในปัจจุบันยังมีขั้นตอนหรือวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดซับและหักเหของแสงที่มีประสิทธิภาพดี นั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโซลาเซลล์โปร่งแสงจากการนำเกลือสินเธาว์มาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อให้มีความเข้มข้นประมาณ 36% โดยเติมเข้าไปยังชุดกริดโซลาเซลล์โปร่งแสงที่ทำจากแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต ขนาดกว้าง ยาว และหนา 5x5x1.8 ซม. ซึ่งในการทดสอบได้มีการออกแบบห้องจำลองระบบกำเนิดรังสีอาทิตย์เสมือนขึ้นมาใช้ในการทดสอบโดยใช้หลอดฮาโลเจน ทำการทดสอบและผลการทดสอบใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์โปร่งแสงกับโซลาร์เซลล์ชนิดผลึกทึบ และการทดสอบการติดตั้งใช้งานร่วมกันของโซลาร์เซลล์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบและโซลาร์เซลล์โปร่งแสง รวมถึงการเชื่อมต่อเซลล์ร่วมกัน โดยวัดค่าทุก 30 นาที เป็นจำนวน 10 ครั้งต่อสถานะการทดสอบ ซึ่งอุณหภูมิของห้องทดสอบจะเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องที่ 25-26 องศาเซลเซียส เมื่อเปิดระบบกำเนิดรังสีอาทิตย์เสมือน และเริ่มคงที่ที่ประมาณ 87-89 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นตลอดช่วงเวลา ที่ 60 - 600 นาทีของการทดสอบ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของทั้งโซลาร์เซลล์แบบผลึก

ทึบและโซลาร์เซลล์โปร่งแสง จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิห้อง ณ เริ่มต้น และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะมีแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิคงที่หลังนาที่ทดสอบที่ 60 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของทั้งโซลาร์เซลล์แบบผลึกทึบและโซลาร์เซลล์โปร่งแสง จะมีค่าแปรผันตรงกับระดับความเข้มแสง โดยค่ากระแสลัดวงจรของโซลาร์เซลล์แบบผลึกทึบ ลดลงสูงสุด 15.79% ในขณะที่โซลาร์เซลล์โปร่งแสงลดลง 8.00% และกำลังไฟฟ้าในทฤษฎี การเชื่อมต่อแบบขนานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือกำลังไฟฟ้าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม กำลังไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ และกำลังไฟฟ้าโซลาร์เซลล์โปร่งแสง ตามลำดับ

คำสำคัญ : โซลาร์เซลล์โปร่งแสง, เกลือสินเธาว์, โพลีเมทิลเมทาคริเลต



<b>TITLE</b>	Design and Development of Transparent Luminescent Solar Concentrator using Mixed Rock Salt and Polymethyl Methacrylate		
<b>AUTHOR</b>	Thanaruk Prosing		
<b>ADVISORS</b>	Associate Professor Chonlatee Photong , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Master of Engineering	<b>MAJOR</b>	Electrical and Computer Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2022

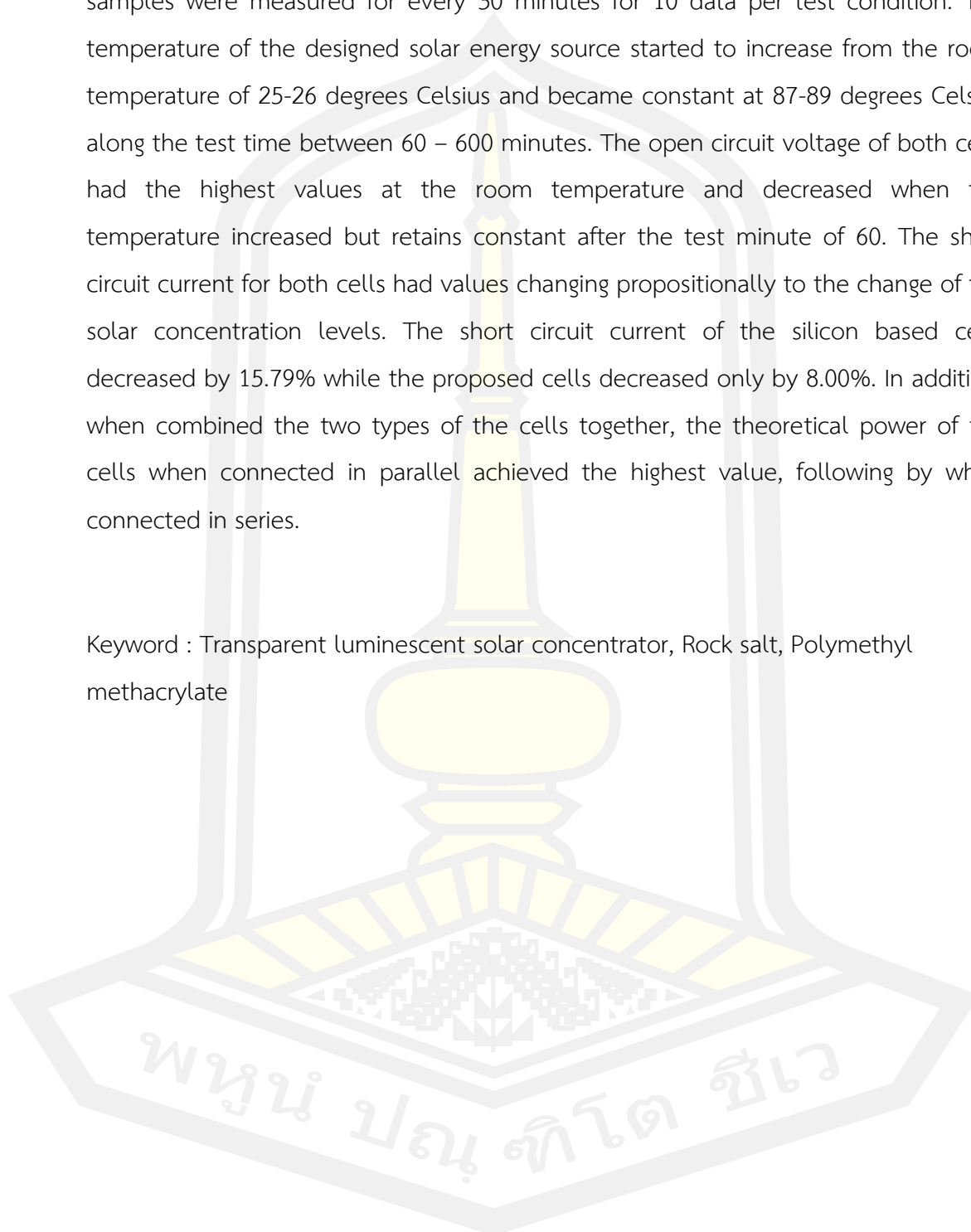
### ABSTRACT

Solar energy is large amount of energy which could be used for several million years on the earth as the clean energy. As a result, many countries trends to utilize it more and more. The utilization solar energy as electricity directly would be the most famous by using the silicon crystalline based solar cells. However, the silicon based cells are opaque that would limit other benefits of using rather than generating direct electricity. Therefore, the transparent luminescent concentrator cells have been developed. These new types of the solar cells that convert electricity from ultraviolet and infrared rays while allowing the white light to pass through the cells. Unfortunately, the transparent luminescent concentrator cells have complicated manufacturing processes and difficulty in developing the high efficient light absorbing and reflection materials.

This research has an objective to design and develop the rock salt based transparent luminescent concentrator cells by using chemical processes to conduct special salt solute with 36% concentration. This solute was injected into the cell grids made of Poly Methyl Methacrylate sheets with width, length and thickness of 5x5x1.8 cm. For the experiment, a artificial solar energy source using Halogen light bulbs was designed and developed. This source was used to test and the test results were used to compare the electrical characteristics between the proposed cells and the conventional silicon based cells, as well as, when combined these two cells

together. The open circuit electric voltage and short circuit electric current of the cell samples were measured for every 30 minutes for 10 data per test condition. The temperature of the designed solar energy source started to increase from the room temperature of 25-26 degrees Celsius and became constant at 87-89 degrees Celsius along the test time between 60 – 600 minutes. The open circuit voltage of both cells had the highest values at the room temperature and decreased when the temperature increased but retains constant after the test minute of 60. The short circuit current for both cells had values changing proportionally to the change of the solar concentration levels. The short circuit current of the silicon based cells decreased by 15.79% while the proposed cells decreased only by 8.00%. In addition, when combined the two types of the cells together, the theoretical power of the cells when connected in parallel achieved the highest value, following by when connected in series.

Keyword : Transparent luminescent solar concentrator, Rock salt, Polymethyl methacrylate





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติเรก จันทะคุณ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิวัฒน์ เสี่ยมวิบูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผศ.ดร.ชัยยงค์ เสริมผล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และที่สำคัญท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.ชลธิ โปธิ์ทอง ให้ความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งในการทำการวิจัย ในครั้งนี้ อีกทั้งยังชี้แนะแนวทางให้คำปรึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผู้สนับสนุนทุนทรัพย์ สถานที่ด้านการศึกษา และอุปกรณ์ในการศึกษาทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือ และที่ขาดมิได้ขอขอบพระคุณบิดา มาดา ผู้เป็นครอบครัวให้กำลังใจในการศึกษาทั้งยังสนับสนุนในทุกๆด้านด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยประจำคณะที่ชี้แนะแนวทางจนสามารถสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้ได้

ธนารักษ์ โปธิ์สิงห์

พหุบัณฑิต ชีวะ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 .....	1
1.1 หลักการและเหตุผล .....	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 .....	4
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	4
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ .....	4
2.2 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ .....	5
2.3 โซลาร์เซลล์ (Solar Cell).....	8
2.4 ชนิดของโซลาร์เซลล์ .....	10
2.5 โซลาร์เซลล์โปร่งแสง (Transparent Luminescent Solar Concentrator (TLSCs)).....	14
2.6 การคำนวณ (Calculation) .....	16
2.7 การประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์.....	18

2.8 ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ในปัจจุบัน.....	18
2.8 โพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA).....	19
2.9 เกลือสินเธาว์ (Rock Salt, NaCl, Halite) .....	21
2.10 ระบบจำลองแสงอาทิตย์เทียม .....	24
2.11 ข้อกำหนดระบบแสงอาทิตย์เทียมมาตรฐาน BSI (British Standard Institution).....	24
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
บทสรุป.....	26
บทที่ 3 .....	27
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 การออกแบบห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม .....	27
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย .....	33
3.3 การออกแบบโซลาร์เซลล์โปร่งแสง(TLSCs).....	34
3.4 ผลการทดสอบโซลาร์เซลล์โปร่งแสง .....	37
3.5 การเปรียบเทียบและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละขั้นตอน .....	38
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	38
บทที่ 4 .....	39
ผลการทดสอบ.....	39
4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม .....	39
4.2 ส่วนประกอบและวิธีการสร้างโซลาร์เซลล์โปร่งแสง .....	40
4.3 ผลการทดสอบโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ .....	43
4.4 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของโซลาร์เซลล์โปร่งแสง .....	45
4.5 การใช้งานร่วมกันของโซลาร์เซลล์แบบผลึกทึบและโซลาร์เซลล์โปร่งแสง.....	48
4.6 ผลการเปรียบเทียบ โซลาร์เซลล์ผลึกทึบ โซลาร์เซลล์โปร่งแสง และการเชื่อมต่อกัน.....	54
บทที่ 5 .....	58

สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง .....58

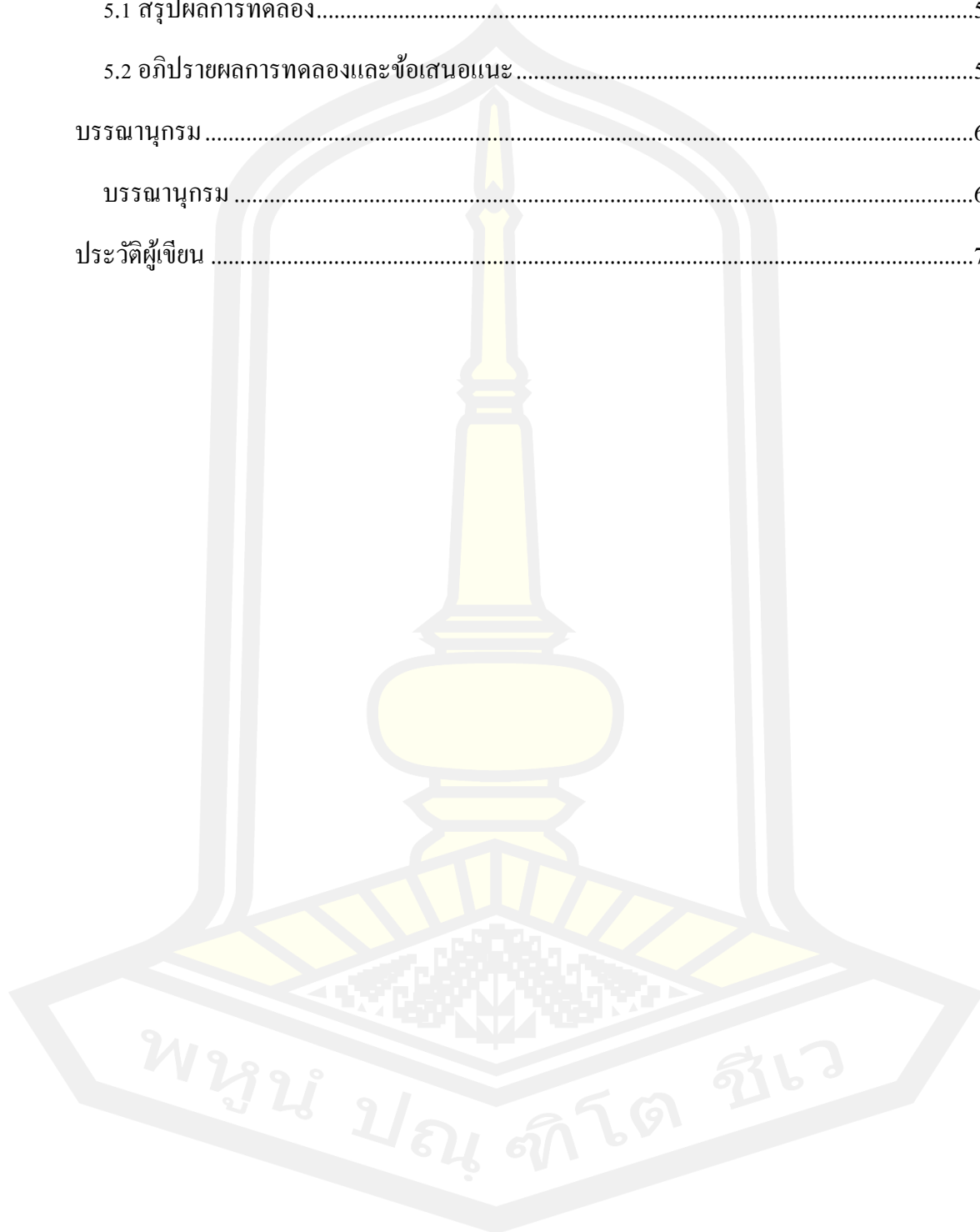
    5.1 สรุปผลการทดลอง.....58

    5.2 อภิปรายผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....59

บรรณานุกรม .....60

    บรรณานุกรม .....61

ประวัติผู้เขียน .....70



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะต่างๆของโพลีเมทิลเมทาครีเลต(PMMA) [73] .....	20
ตารางที่ 2.2 ลักษณะต่างๆของโซเดียมคลอไรด์(NaCl) [84] .....	21



## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 1 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่เข้ามายังโลก [4].....	5
ภาพประกอบที่ 2 หลักการทำงานของโซลาร์เซลล์ [36].....	9
ภาพประกอบที่ 3 หลักการทำงานของโซลาร์เซลล์โปริ่งแสง(TLSCs) [22] .....	15
ภาพประกอบที่ 4 แผนภูมิประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ในชนิดต่างๆของแต่ละบริษัทหรือสถาบัน [72].....	19
ภาพประกอบที่ 5 ลักษณะของหน่วยหินของจังหวัดมหาสารคาม [88] .....	22
ภาพประกอบที่ 6 การปล่อยสเปกตรัมแสงของหลอดฮาโลเจน .....	28
ภาพประกอบที่ 7 แสดงขนาดทางเลขาคณิตของหลอดไฟ .....	29
ภาพประกอบที่ 8 แสดงมุมของแสงจากหลอดไฟ .....	29
ภาพประกอบที่ 9 ผลการจำลองระบบส่องสว่างด้วยโปรแกรมไดอะลักซ์ .....	30
ภาพประกอบที่ 10 รูปแสดงการติดตั้งหลอดไฟด้านหน้า.....	31
ภาพประกอบที่ 11 รูปแสดงการติดตั้งหลอดไฟด้านข้าง .....	32
ภาพประกอบที่ 12 มัลติมิเตอร์ [92].....	33
ภาพประกอบที่ 13 ออสซิลโลสโคป [93] .....	34
ภาพประกอบที่ 14 การออกแบบโครงสร้างโซลาร์เซลล์โปริ่งแสง .....	34
ภาพประกอบที่ 15 การออกแบบระบบเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าภายในกริด.....	35
ภาพประกอบที่ 16 การเชื่อมต่อระหว่างกริด .....	36
ภาพประกอบที่ 17 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม.....	39
ภาพประกอบที่ 18 แสดงกริดของโซลาร์เซลล์โปริ่งแสงหลังจากประกอบโพลีเมทิลเมทาคริเลต ....	40
ภาพประกอบที่ 19 แสดงการเติมน้ำเกลือความเข้มข้น 36% เข้าไปภายในกริด .....	41
ภาพประกอบที่ 20 แสดงการเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าในกริดด้วยแทปปีงไวร์และตะกั่ว .....	41

ภาพประกอบที่ 21 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบื้องต้นของกริดเซลล์โซลาร์โปร่งแสง .....	42
ภาพประกอบที่ 22 แสดงโซลาร์เซลล์โปร่งแสง .....	42
ภาพประกอบที่ 23 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ .....	43
ภาพประกอบที่ 24 แสดงกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ .....	44
ภาพประกอบที่ 25 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ.....	45
ภาพประกอบที่ 26 แสดงแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด โซลาร์เซลล์โปร่งแสง .....	46
ภาพประกอบที่ 27 แสดงกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรของโซลาร์เซลล์โปร่งแสง .....	47
ภาพประกอบที่ 28 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซลาร์เซลล์โปร่งแสง.....	48
ภาพประกอบที่ 29 แสดงการใช้งานร่วมกันของโซลาร์เซลล์โปร่งแสงและโซลาร์เซลล์แบบผลึกทึบ	49
ภาพประกอบที่ 30 แสดงแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดหลังการเชื่อมต่อโซลาร์เซลล์ทั้ง 2 ชนิด แบบอนุกรม .....	49
ภาพประกอบที่ 31 แสดงผลทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม .	50
ภาพประกอบที่ 32 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม .....	51
ภาพประกอบที่ 33 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน .....	52
ภาพประกอบที่ 34 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน .....	53
ภาพประกอบที่ 35 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีการเชื่อมต่อแบบขนาน .....	54
ภาพประกอบที่ 36 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด.....	55
ภาพประกอบที่ 37 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร .....	56
ภาพประกอบที่ 38 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าตามทฤษฎี.....	57

# บทที่ 1

## 1.1 หลักการและเหตุผล

ประเทศไทยมีแผนจะเพิ่มพลังงานทดแทนมากขึ้นในอนาคต ซึ่งเป้าหมายในปี พ.ศ.2579 จะผลิตพลังงานทดแทนมากถึง 19,684.4 MW หรือคิดเป็น 20.11% ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศ โดยเป็นพลังงานจากแสงอาทิตย์มีสัดส่วนประมาณ 6,000 MW (30.48%) ซึ่งเป็นสัดส่วนมากที่สุดของพลังงานทดแทนทั้งหมด[1] พลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานที่สามารถใช้ได้หลายล้านปีและถือได้ว่าเป็นพลังงานสะอาด ทำให้หลายประเทศทั่วโลกหันมาใช้พลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์มากขึ้น แต่ในปัจจุบันประเทศไทยและทั่วโลกส่วนใหญ่มีการใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบพนักซิลิคอนในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งอาจมีข้อจำกัด คือ ลักษณะของแผงมีความทึบทำให้เกิดข้อจำกัดทางการใช้ประโยชน์ในด้านอื่นนอกเหนือจากการใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งเป็นบริเวณกว้างสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้ได้ในปริมาณมาก [2] อีกทั้งโซลาร์เซลล์แบบพนักซิลิคอนสามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีแสงอาทิตย์ได้เพียงช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 500nm ถึง 1000nm หรือในช่วงของรังสีที่มองเห็นได้ถึงบางช่วงของรังสีอินฟราเรดเท่านั้น[3] ในขณะที่ 99% ของสเปกตรัมรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกมายังโลกจะมีสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ระหว่าง 250 nm ถึง 2,500 nm ซึ่งประกอบด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณ 5% รังสีที่มองเห็นได้ 43% และ รังสีอินฟราเรด ไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ 52% [4] โดยปัจจุบันโซลาร์เซลล์แบบพนักซิลิคอนที่ใช้ในการติดตั้งมีประสิทธิภาพด้านพลังงานอยู่ที่ 18-22% [5]

จากข้อมูลศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ปี 2560 โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน[6] พบว่า บริเวณที่ได้รับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดจะอยู่ในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะจังหวัด สุรินทร์ อุบลราชธานี ศรีสะเกษ บุรีรัมย์ และร้อยเอ็ด โดยรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีทั่วภูมิภาคประมาณ 17.3 – 18.59 MJ/m<sup>2</sup>-day โดยเดือนเมษายนเป็นช่วงที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด[7] ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงกว่าภาคอื่นๆ โดยส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 18- 19 MJ/m<sup>2</sup>-day โดยได้รับรังสีแสงอาทิตย์เป็นบริเวณกว้าง[8] ส่วนในบริเวณพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม รับรังสีแสงอาทิตย์ ประมาณ 18.24 MJ/m<sup>2</sup>-day [9] และบริเวณพื้นที่ตำบลขามเรียง มีปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ ประมาณ 18.21 MJ/m<sup>2</sup>-day [9]

เทคโนโลยี Transparent Luminescent Solar Concentrator (TLSCs) หรือโซลาร์เซลล์ที่มีความโปร่งแสง เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีสมัยใหม่ของโซลาร์เซลล์ ถูกคิดค้นโดย Richard R. Lunt จากคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาลัทธิมิชิแกน ซึ่งถือว่าเป็นผู้บุกเบิกเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ที่มีความโปร่งแสง [10] โดยเทคโนโลยี TLSCs เซลล์เหล่านี้จะใช้เทคนิคการสะท้อนและรวมรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีอินฟราเรด เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อมีการรวบรวมรังสีเหล่านี้ให้มีความเข้มที่มากขึ้น ทำให้รังสีเหล่านี้มีความเข้มที่มากพอในการผลักเวเลนซ์อิเล็กตรอนออกไปจาก pn-junction เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า [11] เทคโนโลยี TLSCs ถูกกล่าวถึงครั้งแรกบนหน้าปกของวารสาร Advanced



Optical Materials ในปี ค.ศ.2014 [12] โดยนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยมิชิแกนซึ่งได้คิดค้นเซลล์แสงอาทิตย์แบบโปร่งแสงขึ้นมาได้ ในตอนแรกมีประสิทธิภาพพลังงานไม่เกิน 5% [13] และในปี ค.ศ.2019 ทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัยรัฐในอวีโร ประเทศโปรตุเกส ที่ใช้ไอออนของแลนทาไนด์ ( $\text{Ln}^{3+} = \text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ ) - ไอโอโนซิลิกา (ISs) โดยย้อมเข้ากับแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) สามารถทำประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าของ TLSCs ได้ถึง 4% [14]

เกลือสินเธาว์ หรือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) คือ เกลือที่ได้จากดินเค็ม (ไม่ได้มาจากเกลือสมุทรโดยตรง) โดยนำเอาน้ำเกลือจากการละลายหินเกลือที่อยู่ใต้ดินมาต้มเคี่ยวจนได้เกลือเนื้อละเอียดสีขาว เกลือสินเธาว์เป็นทรัพยากรที่มีปริมาณมากมายมหาศาลในภาคอีสานหรือแทบจะกล่าวได้ว่า เกลือสินเธาว์ มีอยู่ในทุกจังหวัดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย [15] หากไม่นำมาใช้ทรัพยากรเกลือในภาคอีสานก็จะเป็นการใช้ประโยชน์ที่ไม่คุ้มค่า โดยพื้นที่ภาคอีสาน มีปริมาณเกลือสำรองจากการคำนวณของกองเศรษฐกิจธรณีวิทยา คาดว่ามีประมาณ 18 ล้านล้านตัน ซึ่งนับว่าเกลือของภาคอีสานเป็นแหล่งเกลือสำรองที่มีปริมาณมากมายมหาศาล ถือเป็นทรัพยากรธรรมชาติอย่างหนึ่งของภาค ก่อให้เกิดอาชีพการทำเกลือสินเธาว์ และโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเกลือในภาคอีสาน [16] และที่สำคัญเกลือสินเธาว์ (NaCl) เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ได้กว้าง คือตั้งแต่ 300nm – 2500nm [17] ดังนั้นการศึกษาเพื่อนำเกลือสินเธาว์มาใช้ในการผลิตโซลาร์เซลล์จึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ

นอกจากเกลือสินเธาว์แล้ว สารจำพวกโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) หรือที่รู้จักในชื่อ อะคริลิก มีความโปร่งแสงสูงถึง 92% นอกจากนี้จะมีความแข็งแรง ทนต่อกรดและด่าง ยังสามารถตัดและตัดได้ง่าย ทำให้สามารถใช้แทนกระจกได้ และทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าพลาสติกชนิดอื่น อีกทั้งยังหาซื้อได้ง่าย ผลิตมาในเชิงพาณิชย์เป็นจำนวนมากและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างแพร่หลาย [18] โพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนในการสร้าง Transparent Luminescent Solar Concentrator (TLSCs) ในหลายงานวิจัย [19] เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆที่กล่าวมาของโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เหมาะแก่การใช้เป็นวัสดุฉนวน [20] เช่น งานวิจัยของ Sara Mattiello ในปี 2020 แสดงให้เห็นถึงการใช้อิออนพันธะ benzothieno-benzothiophene (BTBT) ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) พบประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้า 3% [21] และงานวิจัยของ Paolo Della Sala ในปี 2019 โดยใช้โมเลกุล Cycloparaphenylene (CPP) ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) พบว่าอัตราส่วนของโพตอนที่ขอบของโพลีเมทิลเมทาคริเลตต่อการดูดซับ พบว่ามีจุดสูงสุดอยู่ที่ 11% [19] เป็นต้น ดังนั้นโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาเพื่อสร้างโซลาร์เซลล์ต้นแบบที่โปร่งแสง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ และ พัฒนาโซลาร์เซลล์แบบโปร่งแสงหรือ Transparent Luminescent Solar Concentrator (TLSCs) โดยใช้วัสดุฉนวนจากเกลือสินเธาว์ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้และเพื่อใช้ประโยชน์อย่าง

อื่นนอกเหนือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น ใช้แทนกระจกตามอาคารบ้านเรือน[22] ใช้ในการเกษตร และปศุสัตว์[23] ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง[24] เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะสามารถทำให้โซลาร์เซลล์สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น ยังเป็นการตอบสนองต่อนโยบายของรัฐบาลที่มุ่งเน้นการใช้พลังงานสะอาดจากแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้วัตถุดิบภายในประเทศ ลดค่าใช้จ่ายการนำเข้าวัตถุดิบจากนอกประเทศได้อีกทางหนึ่งด้วย[1]

## 1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา ออกแบบและพัฒนาโซลาร์เซลล์โปร่งแสง (Transparent Luminescent Solar Concentrator. (TLSCs)) จากเกลือสินเธาว์ (NaCl) ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)

1.2.2 เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ที่พัฒนาขึ้นกับโซลาร์เซลล์แบบผลึกทึบ ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline Solar cell (Multi-Si))

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้วัตถุดิบในการศึกษาและพัฒนาเซลล์ต้นแบบทั้งหมดจากภายในประเทศไทย

1.3.2 ใช้โซลาร์เซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ในการออกแบบโซลาร์เซลล์โปร่งแสง

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เซลล์ต้นแบบ TLSCs จากเกลือสินเธาว์(NaCl) ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้

1.4.2 ได้ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แบบเดิม

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เซลล์ต้นแบบ TLSC ที่ทำจากวัตถุดิบภายในประเทศ สร้างโอกาสทางธุรกิจและค่าใช้จ่ายการนำเข้าวัตถุดิบจากภายนอกประเทศ

1.5.2 สร้างมูลค่าการใช้วัตถุดิบภายในประเทศและในจังหวัดมหาสารคาม (เกลือสินเธาว์)

1.5.3 ได้เซลล์ต้นแบบที่สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นไปอีกได้

## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ พลังงานนี้เป็นต้นกำเนิดของวัฏจักรของสิ่งมีชีวิต พลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง เป็นพลังงานสะอาด อีกทั้งสามารถใช้ได้จนกว่าดวงอาทิตย์จะสิ้นอายุไข [25] ใน 1 ชั่วโมง โลกได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ประมาณ 174 PW คิดเป็น 3,850,000 EJ ต่อปี ประมาณว่า พลังงานแสงอาทิตย์ใน 1 ชั่วโมง จะมีปริมาณเกือบเท่ากับพลังงานที่โลกใช้ทั้งปี [26] ประมาณ 30% ของพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกสะท้อนกลับไปสู่อวกาศ และอีกประมาณ 70% ถูกดูดซับโดยเมฆ มหาสมุทรและพื้นดิน 599.378 [27] การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1,353 \text{ W/m}^2$  โดยจะมีค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง  $1,350\text{-}1,440 \text{ W/m}^2$  ค่าการแผ่รังสีดังกล่าวเราเรียกว่า ค่าคงที่สุริยะ (Solar Constant) ซึ่งก็คือ ค่าอัตราการตกกระทบของพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ในทิศทางตั้งฉากกับดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกและจะมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละเดือน โดยมีค่าแปรผันไปตามช่วงความยาวคลื่นของรังสีซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบไปด้วย รังสีช่วงคลื่นยาว ได้แก่ รังสีอินฟราเรด (Infrared) จนถึงรังสีช่วงคลื่นสั้น ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงคลื่นต่างๆ ที่แผ่มายังโลก โดยผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆ ของโลก จะถูกดูดซับ (Absorbed) และทำให้กระจัดกระจาย (Scattered) อยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก การดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสีโดยชั้นบรรยากาศของโลกจะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา และมีลักษณะที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

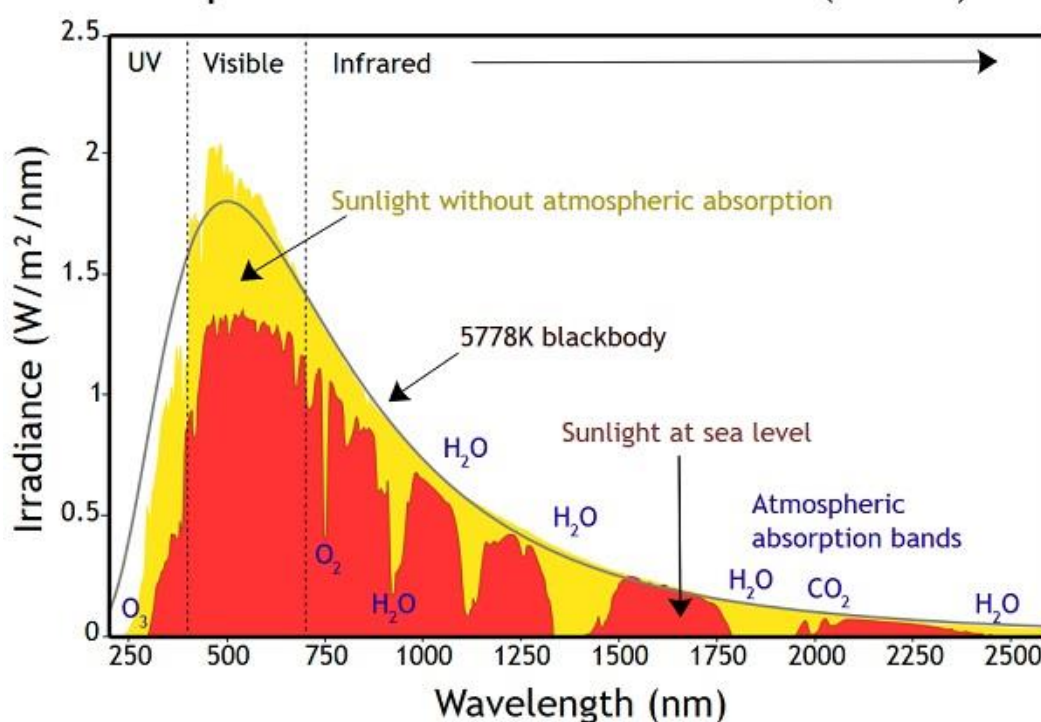
1. รังสีช่วงคลื่นสั้น ส่วนใหญ่จะเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) โดยมีช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า  $300 \text{ nm}$  พลังงานรังสีของดวงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนและถูกทำให้ลดลงในเขตบรรยากาศชั้น Ionosphere โดยแก๊สไนโตรเจน ออกซิเจน และแก๊สโอโซน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Electron Transition) ในอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สดังกล่าว จึงทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนผิวโลก เกือบจะไม่มีพลังงานของรังสีในช่วงคลื่นนี้เหลืออยู่เลย

2. รังสีช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ (Visible) จะถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สโอโซน แก๊สออกซิเจน และไอน้ำ

3. รังสีช่วงคลื่นยาว รังสีในช่วงคลื่นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นรังสีอินฟราเรด (Infrared) มีการดูดกลืนรังสีอันเนื่องมาจากการหมุนและการสั่นสะเทือนของ Polyatomic Molecule ซึ่งได้แก่ น้ำ ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $700, 800, 900, 1,400, 1,900, 2,700, 3,200 \text{ nm}$  และแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $1,600, 2,000, 2,700, 4,300 \text{ nm}$

การดูดกลืนรังสีดังกล่าวจะเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศด้านล่างซึ่งมีความหนาประมาณ 50 กิโลเมตร และพลังงานที่ถูกดูดกลืนจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในชั้นของบรรยากาศ ที่ระยะความยาวคลื่นระหว่าง 8,000–12,000 nm บรรยากาศจะโปร่งใส รังสีในช่วงคลื่นนี้เรียกว่า Atmosphere Window ที่ความยาวคลื่นสูงกว่านี้ รังสีดวงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนเกือบหมดด้วยน้ำในรูปของไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์[28] ประมาณ 99% ของสเปกตรัมรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกมายังโลกจะมีสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ระหว่าง 250 nm ถึง 2,500 nm ซึ่งประกอบด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณ 5% รังสีที่มองเห็นได้ 43% และ รังสีอินฟราเรด ไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ 52% [4] ดังภาพประกอบที่ 1

### Spectrum of Solar Radiation (Earth)



ภาพประกอบที่1 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่เข้ามายังโลก [4]

#### 2.2 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากข้อมูลของ U.S. Energy Information Administration (EIA) ในปี2018 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของทุกประเทศทั่วโลก รวม 23,398 TW.h โดยเกิดจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ 575 TW.h [26] ประเภทพื้นฐานของพลังงานแสงอาทิตย์ คือ “พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์” และ “เซลล์แสงอาทิตย์”[29] โดยจะสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 2 วิธีหลักๆ[30] คือ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโซลาร์เซลล์(Solar Cell)

## 1. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ หรือ Solar Thermal Electricity

Solar Thermal Electricity หรือ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ หลักการทำงานจะทำงานคล้ายการรวมแสงจากแว่นขยาย แล้วเกิดความร้อน ณ จุดที่มีการรวมแสง เราเรียกว่า ตัวรับแสง ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ถ่ายเทความร้อนสู่ตัวกลาง เพื่อเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้าต่อไป Solar Thermal Power Plant สามารถแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบดังนี้

1.1 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนระบบหอคอยรวมแสง (Central Receiver System) หน่วยผลิตความร้อนในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่อาศัยการสะท้อนแสงอาทิตย์ด้วยกระจกเฮลิโอสแตต (heliostat) จำนวนมากไปรวมที่จุดรวมแสงบริเวณตัวรับ (receiver) ที่ติดตั้งบนยอดหอคอย ทำหน้าที่แปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นความร้อนถ่ายเทให้กับตัวกลาง (medium) สามารถนำไปผลิตไอน้ำป้อนเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป กระจกเฮลิโอสแตตแต่ละแผ่นที่ติดตั้งในทุ่งเฮลิโอสแตต (heliostat field) ได้รับการออกแบบให้ตำแหน่งของการติดตั้งรับกับองศาของมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์และองศาของมุมสะท้อนแสงที่แตกต่างกันไป เพื่อสะท้อนแสงอาทิตย์จากแต่ละตำแหน่งของดวงอาทิตย์ไปที่ตัวรับได้ตลอดทั้งวัน ตัวรับบนยอดหอคอยอาจใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger tube receiver) ที่ภายในท่อบรรจุตัวกลางของเหลว เช่น น้ำมันสังเคราะห์ (synthetic oil) ตัวรับอัดอากาศระบบปิด (closed air receiver) หรือตัวรับมวลอากาศระบบเปิด (open volumetric air receiver) ซึ่งใช้อากาศเป็นตัวกลาง เพื่อลดการกัดกร่อนและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากน้ำมันสังเคราะห์ที่ไหลเวียนในระบบ

1.2 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ระบบจานรับแสง/เครื่องจักรกลสเตอร์ลิง (Dish or Stirling Engine System) หน่วยผลิตความร้อนในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยแผ่นกระจกรับแสงรูปจานโค้ง (dish) ทำหน้าที่สะท้อนแสงไปที่ตัวรับแสง (receiver) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งติดตั้งอยู่ที่จุดโฟกัสของจานรับแสง ทำหน้าที่แปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานกลเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ทันที โดยอาศัยหลักการของวัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling cycle) ตัวรับแบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีตัวกลาง (medium) คือ แก๊สไฮโดรเจนหรือแก๊สฮีเลียมบรรจุอยู่ในกระบอกสูบซึ่งขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนจากการรวมแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C และที่ความดัน 20 MPa แก๊สที่เย็นตัวลงจะหมุนเวียนกลับไปรับความร้อน ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่เกิดเป็นพลังงานกลเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าฐานของจานโค้งรับแสงถูกออกแบบให้มีระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เพื่อรับแสงอาทิตย์จากรังสีตรง ความเข้มสูงได้ตลอดทั้งวัน จานรับแสงอาจมีลักษณะเป็นจานโค้งผิวเรียบ (continuous plenum) แผงกระจกรวม (attached segments) หรือแผงกระจกแยกส่วน (individual facets)

1.3 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ระบบรางพาราโบลา (Parabolic Trough system) หน่วยผลิตความร้อนในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ประกอบด้วยตัวเก็บรังสี

แบบรางพาราโบลิก ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นความร้อนถ่ายเทให้กับตัวกลาง (medium) เพื่อนำไปผลิตไอน้ำแรงดันสูงป้อนเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.4 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ปล่อยลมพลังแสงอาทิตย์ (Solar Chimney) อุปกรณ์แปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานกลโดยอาศัยอากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้น เช่นเดียวกับอากาศใต้หลังคาของอาคารที่ติดตั้งลูกหมุนระบายอากาศ (ventilator) ที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน จะลอยตัวสูงขึ้นไปในลูกหมุนระบายอากาศออกไปนอกอาคาร ขณะที่อากาศเย็นจากภายนอกอาคารจะไหลเข้ามาแทนที่ช่วยระบายอากาศภายในอาคารได้ โดยไม่ต้องใช้พัดลมดูดอากาศ และช่วยลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ สามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับปล่อยลมพลังแสงอาทิตย์ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยสร้างหลังคากระจกคลุมพื้นดินเป็นบริเวณกว้างรอบปล่อยลมสูง เพื่อให้เกิดการสะสมความร้อนในอากาศ เป็นลักษณะปรากฏการณ์เรือนกระจกเหนือพื้นดิน มีระบบท่อที่บรรจุน้ำไว้เต็มทำหน้าที่กักเก็บความร้อน ในช่วงเวลากลางวันมวลอากาศความร้อนสูงใต้หลังคาจะลอยตัวเข้าไปในปล่อยลมเพื่อขับกังหัน (turbine) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งไว้บริเวณใต้ปล่อยลม นอกจากนั้นมวลอากาศร้อนยังทำให้น้ำในท่อและพื้นดินใต้หลังคากระจกมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะปลดปล่อยความร้อนออกมาในเวลากลางคืน เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศไปขับกังหัน

1.5 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ระบบบ่อรับแสง (Solar Pond System) ระบบสะสมพลังความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยอาศัยหลักการจัดช่วงชั้นของเกลือแร่ในน้ำ (water stratification) โดยทั่วไปแหล่งน้ำตามธรรมชาติหรือแหล่งเก็บน้ำที่สร้างขึ้นจะมีปริมาณเกลือแร่เพิ่มขึ้นตามระดับความลึกจากผิวน้ำ เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน มวลน้ำลึกที่มีเกลือแร่สูงจะสะสมความร้อน ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและเคลื่อนที่ขึ้นมาที่ผิวน้ำ เนื่องจากมวลน้ำอุ่นจะมีความหนาแน่นต่ำกว่ามวลน้ำเย็นที่ความลึกระดับหนึ่ง ซึ่งมีปริมาณเกลือแร่มากพอ ความหนาแน่นของมวลน้ำสูงมากจนไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาสู่ผิวน้ำได้แม้ว่าจะสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์จนอุณหภูมิเกือบถึงจุดเดือดของน้ำก็ตาม (80-90 °C) เรียกว่าบริเวณเก็บความร้อน (heat storage zone) ความร้อนที่สะสมอยู่ในมวลน้ำบริเวณนี้สามารถถ่ายเทมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ในกรณีนี้มวลน้ำในระดับที่ตื้นกว่าที่มีปริมาณเกลือแร่ปานกลาง จะทำหน้าที่เป็นฉนวน (insulation zone) ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการระเหย การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนจากมวลน้ำลึกที่มีความร้อนสูงอีกด้วย

## 2. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) หรือ Solar Photovoltaics

โซลาร์เซลล์ (Solar Cell) หรือ เซลล์โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic cell) คำว่า "Photovoltaic" มาจากภาษากรีก  $\phi\omega\upsilon\varsigma$  (Photo) หมายถึง "แสง" และคำว่า "โวลต์" ซึ่งเป็นหน่วยของแรงเหนี่ยวนำ, คำว่าโวลต์มาจากนามสกุลของนักฟิสิกส์ชาวอิตาลีชื่อ อเลสซานโดร โวลตา ซึ่ง

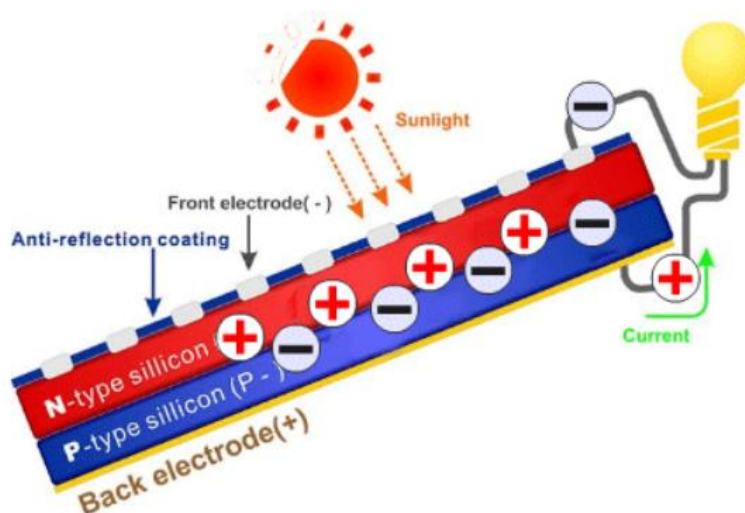
เป็นนักประดิษฐ์แบตเตอรี่ (เซลล์ไฟฟ้าเคมี) คำว่า "Photovoltaic" ถูกใช้ใน ภาษาอังกฤษตั้งแต่ปี 1849[31] เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยตรงโดยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก นั่นก็คือ คุณสมบัติของสารเช่น ค่าความต้านทาน แรงดัน และกระแส จะเปลี่ยนไปเมื่อมีแสงตกกระทบโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอก และเมื่อต่อหลอดไฟ จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านหลอดนั้นได้ การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์หรือ photovoltaic (PV) cell ต้องมีคุณสมบัติพื้นฐาน 3 อย่าง[32] ดังนี้

1. การดูดซึมของแสงเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล หรือ เอ็กซิตอน อย่างใดอย่างหนึ่ง
2. การแยกต่างหากของตัวขนส่งประจุที่ต่างชนิดกัน
3. การสกัดการแยกออกจากกันของตัวขนส่งเหล่านั้นออกไปยังวงจรรภายนอก

ปรากฏการณ์ที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสงตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ ที่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band) มีพลังงานสูงขึ้น และหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบนำไฟฟ้าทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ ปรากฏการณ์นี้ค้นพบโดยองตวน เซซาร์เบคเกอเรล (Antoine César Becquerel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสในปี ค.ศ.1839 [33]

### 2.3 โซลาร์เซลล์ (Solar Cell)

โซลาร์เซลล์ (Solar Cell) คือสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โซลาร์เซลล์โดยทั่วไปประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เรียกรอยต่อนี้ว่า รอยต่อพีเอ็น (p-n junction) [34] ที่ถูกค้นพบโดยครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 โดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephon) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6% [35]



ภาพประกอบที่ 2 หลักการทำงานของโซลาร์เซลล์ [36]

การทำงานของโซลาร์เซลล์ดังภาพประกอบที่ 2 แบ่งเป็น 4 ระดับ[36] ดังนี้

1. ระดับชั้นบนสุด เรียกว่า Front Electrode บนชั้นนี้จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน จะมีลักษณะเป็นโลหะ มักจะทำด้วยโลหะเงิน
2. ระดับชั้นที่ 2 ต่ำลงมา เรียกว่าชั้น n - type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านบนแต่รองลงมา หรือ อยู่ด้านหน้าของเซลล์ ระดับชั้น N นี้ คือชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ใส่สารฟอสฟอรัส Phosphorus ลงไปเพื่อตั้งใจให้ให้มีการนำไฟฟ้า โดยจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาในชั้นนี้เมื่อสารนี้โดนแดดหรือแสงอาทิตย์
3. ระดับชั้นที่ 3 ต่ำลงมา เรียกว่าชั้น p-n junction เป็นชั้นที่ชั้น N และ ชั้น P มาเจอกัน เมื่อดูจากในรูปก็คือช่วงที่เป็นเส้นกันระหว่างชั้น N สีแดง และ ชั้น P สีน้ำเงิน เป็นจุดที่ชั้น ซิลิคอน ชั้น N และ ชั้น P มาประกบต่อกัน เราจะเรียกจุดที่ประกบกันนี้ว่า p-n junction
4. ระดับชั้นที่ 4 ชั้นล่างพื้น เรียกว่าชั้น p - type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านล่างของแผงโซลาร์เซลล์ ชั้น P คือชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ได้ใส่สารโบรอน Boron เพื่อควบคุมให้มีการนำไฟฟ้าลงไป เพื่อตั้งใจทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดหลุมในชั้นนี้ (โฮล) เมื่อเซลล์ชั้นบนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานมาถึงชั้นนี้ ชั้นนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ถ้าในตอนที่ยังไม่มีแดด ชั้น n - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านบนของเซลล์ก็พร้อมที่จะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมี (โฮล) ปนอยู่บ้างเล็กน้อยในชั้นนี้ ส่วนชั้น p - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านล่าง หรือจะเรียกว่าด้านหลังของเซลล์นั้นมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็น (โฮล) แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย
5. ชั้นล่างสุดเรียกว่าชั้น Back Electrode ด้านหลังของ p - type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะ เรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮลบนแผงโซลาร์เซลล์ ชั้นตอนการทำงาน เมื่อมี



แสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว และเมื่อพลังสูงเพียงพอ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลก็จะวิ่งเข้าหากันเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งขึ้นไปยังชั้น n - type และโฮลจะวิ่งลงไปยังชั้น p - type อิเล็กตรอนก็จะวิ่งขึ้นไปรวมกันอยู่ที่ชั้น Front Electrode และ โฮลก็จะวิ่งลงไปรวมกันที่ Back Electrode และเมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจากชั้น Front Electrode บนสุด และ Back Electrode ล่างสุด เมื่อต่อให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น เพราะอิเล็กตรอนและโฮล จะวิ่งเพื่อจับคู่กันบนแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งวัสดุในการผลิตที่ต่างกันแสดงประสิทธิภาพที่ต่างกันและมีค่าใช้จ่ายที่ต่างกัน วัสดุสำหรับโซลาร์เซลล์ที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีลักษณะที่ตรงกับสเปกตรัมของแสงที่มีอยู่ เซลล์บางตัวถูกออกแบบมาเพื่อแปลงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์บางตัวจะเหมาะสำหรับการดูดซึมแสงนอกชั้นบรรยากาศของโลกได้เป็นอย่างดี วัสดุที่ดูดซับแสงมักจะสามารถในการกำหนดค่าทางกายภาพหลายอย่าง เพื่อใช้ประโยชน์จากการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันและกลไกการแยกประจุ [37]

## 2.4 ชนิดของโซลาร์เซลล์

ชนิดของโซลาร์เซลล์ในปี ค.ศ.2015 ถูกจำแนกไว้ดังนี้ [37]

1. อะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell หรือ a-Si)” ถือเป็นแผงโซลาร์เซลล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในพื้นที่ที่มีอาจจะมีแสงแดดน้อยมีหมอกปกคลุมหรือมีฝนตกบ่อยเพราะมีความไวในการจับแสงดีมากแต่ราคาค่อนข้างแพงและมีความบอบบางมากไม่สามารถใช้ประยุกต์เข้ากับอุปกรณ์หรือวงจรไฟฟ้าแบบอื่นได้มากนัก [38]

2. ไบโอบริด โซลาร์เซลล์ (Biohybrid Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์แบบไบโอบริดคือเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำโดยใช้สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ร่วมกัน เซลล์แสงอาทิตย์ แบบไบโอบริดถูกสร้างขึ้นโดยทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยแวนเดอร์บิลด์ ที่มงานได้ใช้ระบบแสง (photosystem) I (ซึ่งเป็นโปรตีนเชิงซ้อนที่อยู่ในเยื่อไทลาคอยด์ (thylakoid membrane)) เพื่อสร้างกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงตามธรรมชาติเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ไบโอบริดเหล่านี้เป็นถือว่าเป็นพลังงานหมุนเวียนรูปแบบใหม่[39][40]

3. การฝังขั้วโลหะ (Buried Contact Solar Cell) โซลาร์เซลล์แบบฝังขั้วโลหะเป็นเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยอาศัยหน้าสัมผัสโลหะชุบเข้าไปภายในร่องที่สร้างด้วยเลเซอร์ เทคโนโลยีการฝังขั้วโลหะจะเอาชนะข้อเสียหลายประการที่เกี่ยวข้องกับหน้าสัมผัสที่พิมพ์ด้วยหน้าจอและทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบการฝังขั้วโลหะที่ฝังอยู่ มีประสิทธิภาพดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิมพ์ด้วยหน้าจอในเชิงพาณิชย์ถึง 25% [37]

4. แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride Solar Cell (CdTe)) เซลล์แสงอาทิตย์ แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) คือเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ที่อาศัยการใช้แคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเป็นชั้นเซมิคอนดักเตอร์แบบบางที่ออกแบบมาเพื่อดูดซับและเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า [41] แคดเมียมเทลลูไรด์ เป็นเทคโนโลยีฟิล์มบางชนิดเดียวที่มีต้นทุนต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปที่ทำจากพนักซิลิกอนในระบบหลายกิโวลต์[42][43][44]

5. โซลาร์เซลล์แบบเข้มข้น (Concentrated PV Cell (CVP)) หรือโซลาร์เซลล์แบบรวมแสง (Concentrating Photovoltaic) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากการรวมแสงอาทิตย์มาผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง โดยใช้ร่วมกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามแสงของดวงอาทิตย์เพื่อให้จุดโฟกัสยังคงอยู่บนโซลาร์เซลล์ได้ตลอดทั้งวัน โดยทั่วไปแล้วโซลาร์เซลล์จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อได้รับความเข้มของแสงสูง โดยการได้รับการระบายความร้อนที่ดีทำให้อุณหภูมิไม่สูงจนเกินไป ปัจจุบันโซลาร์เซลล์แบบรวมแสง มีประสิทธิภาพสูงมากกว่า 22% ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์โดยทั่วไปถึง 2 เท่า และในอนาคตนักวิจัยพยายามจะพัฒนาประสิทธิภาพให้สูงขึ้นไปได้อีก[45]

6. โซลาร์เซลล์ CIGS หรือโซลาร์เซลล์ที่ใช้ ทองแดง อีเดียม แกลเลียมและเซลีนด์ (C (G) S) เป็นโซลาร์เซลล์ชนิดฟิล์มบางที่ใช้ในการแปลงแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะจัดเรียงทองแดง อินเดียม แกลเลียมและเซลีนด์เป็นชั้นบางๆ ไว้บนแผ่นกระจกหรือพลาสติกพร้อมด้วยอิเล็กโทรดที่ด้านหน้าและด้านหลังเพื่อรวบรวมกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับสูงและดูดซับแสงอาทิตย์ได้ดีจึงต้องใช้ฟิล์มที่บางกว่าวัสดุเซมิคอนดักเตอร์อื่นๆ [46]

7. โซลาร์เซลล์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)) โซลาร์เซลล์ชนิดนี้จะทำงานโดยเลียนแบบกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช แต่แทนที่คลอโรฟิลล์ด้วยสีที่ดูดพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้แสงที่ส่องเข้ามาสามารถกระตุ้นโมเลกุลให้เป็นสถานะที่มีพลังงานสูงกว่าเดิม ซึ่งพลังงานที่ได้นี้จะถูกเก็บรวบรวมโดยโครงสร้างของอิเล็กโทรไลต์ และตัวเร่งปฏิกิริยา เหมือนกับโครงสร้างของใบไม้ในการสังเคราะห์แสง [47]

8. โซลาร์เซลล์ชนิดผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar Cell (GaAs)) แกลเลียมอาร์เซไนด์ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบพื้นฐานคือแกลเลียมและสารหนู เมื่อองค์ประกอบทั้งสองนี้รวมกันจะก่อตัวเป็นสารประกอบแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งแสดงลักษณะที่น่าสนใจมากมาย แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความอึดตัว ความเร็วอิเล็กตรอนคล่องตัวกว่าของซิลิกอน[48] แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นโซลาร์เซลล์ที่มีราคาและประสิทธิภาพสูงโดยส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้บนอวกาศ[49]

9. ไฮบริดโซลาร์เซลล์ (Hybrid solar cells) เป็นโซลาร์เซลล์ที่ใช้พลังงานจากความร้อนและแสงสว่างจากดวงอาทิตย์เพื่อให้ได้พลังงานมากกว่าที่เคยได้จากแผงโซลาร์เซลล์แบบเดิมๆ โดยนำเอา

เซลล์แสงอาทิตย์มาจับคู่กับโพลีเมอร์ฟิล์ม จนทำให้ โซล่าเซลล์แบบไฮบริดนี้สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิมถึง 5 เท่า [50]

10. โซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง (Luminescent Solar Concentrator Cell (LSC)) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้วัสดุแผ่นบางๆ เพื่อดักจับและดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงกว้าง (อัลตราไวโอเล็ตและอินฟราเรด) ก่อนที่จะนำพลังงาน (ผ่านการเปล่งแสงเรืองแสง) ไปยังเซลล์ที่ติดตั้งบริเวณขอบของชั้นวัสดุ โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาใช้จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ประกอบด้วยพอลิเมอร์ (เช่นโพลีเมธิลเมทาคริเลต (PMMA)) เจือด้วยสารชนิดเรืองแสงเช่นสีย้อมอินทรีย์ จุดควอนตัมหรือสารประกอบเชิงซ้อน [51]

11. โซล่าเซลล์แบบควมู (Micromorph Cells (Tandem-Cell Using a-Si/ $\mu$ c-Si)) หรือโซล่าเซลล์ไมโครมอร์ฟ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่มีโครงสร้างแบบมัลติฟังก์ชัน ซึ่งประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สองเซลล์ที่ซ้อนทับกัน ในขณะที่เซลล์ชั้นบนสุดของซิลิคอนอสัณฐานที่บางจะดูดซับแสงสีน้ำเงิน เซลล์ด้านล่างของซิลิคอนโมโนคริสตัลไลน์ที่หนาขึ้นจะดูดซับแสงสีแดงและใกล้อินฟราเรด ทำให้ครอบคลุมช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ได้กว้างขึ้น [37]

12. โซล่าเซลล์ผลึกโมโน (Monocrystalline Solar Cell) หรือโซล่าเซลล์แบบผลึกเดี่ยว (single - crystal) โซล่าเซลล์ชนิด โมโนคริสตัลไลน์ แทบทั้งหมดเป็นชนิดที่ทำมาจากซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยเริ่มมาจากแท่งซิลิคอนทรงกระบอก เกิดจากกระบวนการ กวนให้ผลึกเกาะกันที่แกนกลาง ทำให้เกิดแท่งทรงกระบอก จากนั้นจึงนำมาตัดให้เป็นสี่เหลี่ยม และลบมุมทั้งสองออกเพื่อที่จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และลดการใช้วัตถุดิบโมโนซิลิคอนลง [52]

13. โซล่าเซลล์แบบหลายรอยต่อ (Multijunction Solar Cell (MJ)) คือโซล่าเซลล์ที่มีสารกึ่งตัวนำ(semiconductor) หลายชนิดที่แตกต่างกันทำให้รอยต่อพีเอ็น(p-n junction) มีจำนวนมากขึ้นด้วย โดยที่สารกึ่งตัวนำของวัสดุแต่ละชนิดจะผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน การใช้สารกึ่งตัวนำหลายชนิดช่วยให้สามารถดูดซับช่วงความยาวคลื่นได้กว้างขึ้นซึ่งจะช่วยให้โซล่าเซลล์มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้า โซล่าเซลล์แบบทั่วไปที่มีรอยต่อพีเอ็นเพียงรอยต่อเดียว ประสิทธิภาพทางทฤษฎีสูงสุด 34% ในทางทฤษฎีจำนวนรอยต่อพีเอ็นที่ไม่มีที่สิ้นสุดจะมีประสิทธิภาพ จำกัด 86.8% ภายใต้แสงที่มีความเข้มข้นสูง [53]

14. โซล่าเซลล์ผลึกนาโน (Nanocrystal Solar Cell) คือโซล่าเซลล์ที่นำนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) มาประยุกต์ใช้ในหลายรูปแบบ เพื่อผลิตเป็นโซล่าเซลล์ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำลง สามารถแข่งขันเชิงพาณิชย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนได้ [54]

15. โซล่าเซลล์เพอโรฟสไกต์ (Perovskite Solar Cell) เป็นโซล่าเซลล์รูปแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นผลึก รู้จักกันในชื่อ Perovskite structure (Perovskite เป็นแร่ธรรมชาติโครงสร้างเป็นผลึกมีสารประกอบของ calcium titanium oxide (CaTiO<sub>3</sub>) ถูกค้นพบเมื่อปี 1893 บนยอดเขา

Ural ประเทศรัสเซีย ตั้งชื่อตามนักการเมืองแรมรัสเซีย L. A. Perovski (1792–1856)) Perovskite solar cell เป็นสารประกอบระหว่างตะกั่วที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ จัดเรียงโครงสร้างทางเคมีในรูปผลึกแบบ Perovskite ในปี ค.ศ. 2018 บริษัท Oxford PV ได้วิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง แบบ Perovskite ซึ่งให้ประสิทธิภาพถึง 27.3% สูงกว่าสถิติโลกที่ 26.7 % ถือเป็นสถิติใหม่ในวงการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผลึกเดี่ยว Oxford PV ยังพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายให้ได้ประสิทธิภาพสูงกว่า 30 % ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหน่วยลดลง [55]

16. เซลล์ไฟฟ้าเคมีทางแสง (Photoelectrochemical Cell (PEC)) ในระบบนี้ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ดังกล่าวจะใช้พลังงานแสงในการแยกโมเลกุลของน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยที่สารกึ่งตัวนำต่างชนิดจะตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่ไม่เท่ากันซึ่งจะได้พลังงานในปริมาณที่แตกต่างกันด้วย การวิจัยมุ่งเป้าไปที่การพัฒนาสารกึ่งตัวนำที่รองรับพลังงานในการแยกน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ การแยกน้ำด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทางแสงยังถือได้ว่า อยู่ในช่วงเริ่มต้น อย่างไรก็ตามในระยะยาว เทคโนโลยีนี้จะเป็นเทคนิคในการผลิตไฮโดรเจนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์ไฟฟ้าเคมีทางแสงประกอบด้วยแอโนดและแคโทดที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน และเยื่อนำกระแสสำหรับการแลกเปลี่ยนโปรตอน [56]

17. โซลาร์เซลล์แบบพอลิเมอร์ (Polymer solar cell) หรือบางครั้งเรียกว่าโซลาร์เซลล์แบบพลาสติก (Plastic solar cell) หรือโซลาร์เซลล์ชนิดสารอินทรีย์ โดยใช้วัสดุกึ่งตัวนำแบบสารอินทรีย์มาเป็นส่วนประกอบในการดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุ ถึงแม้ในปัจจุบันจะสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียงประมาณ 3 – 8% แต่โซลาร์เซลล์ชนิดนี้มีจุดเด่นกว่าโซลาร์เซลล์ชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ทั่วไปในเรื่องราคาถูก การผลิตที่ง่าย สามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่ไม่ใช่กระจกได้ และสามารถใช้ในงานที่มีความโค้งงอได้ จึงเป็นโซลาร์เซลล์ที่กำลังเป็นที่สนใจและได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก [57]

18. โซลาร์เซลล์โพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline Solar cell (Multi-Si)) เป็นแผงโซลาร์เซลล์ชนิดแรกที่ทำมาจากผลึกซิลิคอน โดยทั่วไปเรียกว่า โพลีคริสตัลไลน์ แต่บางครั้งก็เรียกว่า มัลติ-คริสตัลไลน์ โดยในกระบวนการผลิต สามารถที่จะนำเอาซิลิคอนเหลวมาเทใส่โมลด์ที่เป็นสี่เหลี่ยมได้เลยก่อนที่จะนำมาตัดเป็นแผ่นบางอีกทีจึงทำให้เซลล์แต่ละเซลล์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสไม่มีการตัดมุมสี่ของแผงจะออกน้ำเงินไม่เข้มมาก[58] การผลิตโซลาร์เซลล์โดยวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าการทำแบบอื่น คือการทำแผ่นเซลล์จะใช้วิธีการหลอมสารซิลิคอนให้ละลายพร้อมกับใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อสารละลายซิลิคอนแข็งตัวก็จะได้เป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึกรวมซึ่งตกผลึกไม่พร้อมกัน จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นเช่นเดียวกับแบบผลึกเดี่ยว ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวมสังเกตได้จากผิวผลึกถ้ามีโหนดที่แตกต่างกันซึ่งเกิดจากผลึกเล็กๆหลายผลึกในแผ่นเซลล์จะเป็นแบบผลึกรวมในขณะที่แบบผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นผลึกเนื้อเดียว คือ

มีสีเดียวตลอดทั้งแผ่นส่วนกรรมวิธีการผลิตเซลล์ที่เหลืองจะเหมือนกันเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม (Poly Crystalline) จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว (monocrystalline) ประมาณ 23 % [59]

19. ควอนตัมดอทโซล่าเซลล์ (Quantum Dot Solar Cell) เป็นโซล่าเซลล์ที่สร้างขึ้นบนเครือข่ายของผลึกที่ผลิตในระดับนาโนเมตรที่มีศักยภาพสูงกว่าเทคโนโลยีโซล่าเซลล์แบบดั้งเดิม เนื่องจากข้อ จำกัด พื้นฐานของวิธีการที่โซล่าเซลล์จับแสงอาทิตย์ โซล่าเซลล์แบบมาตรฐานนั้นสร้างขึ้นบนชั้นของวัสดุที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการจัดแบนด์หนึ่งหรือความยาวคลื่นของแสง อย่างไรก็ตามตามจุดควอนตัมในโซล่าเซลล์ควอนตัมดอทนั้นสามารถสร้างขึ้นเพื่อดักจับแสงหลายแถบด้วยการปรับขนาดและสารเคมีในกระบวนการผลิต สิ่งนี้ทำให้เกิดจุดควอนตัมหลายรูปแบบบนชั้นหนึ่งของสารตั้งต้นที่สามารถจับความยาวคลื่นแสงได้หลากหลายทำให้พวกมันมีประสิทธิภาพและประหยัดกว่าการผลิตเซลล์สุริยะทั่วไป [60]

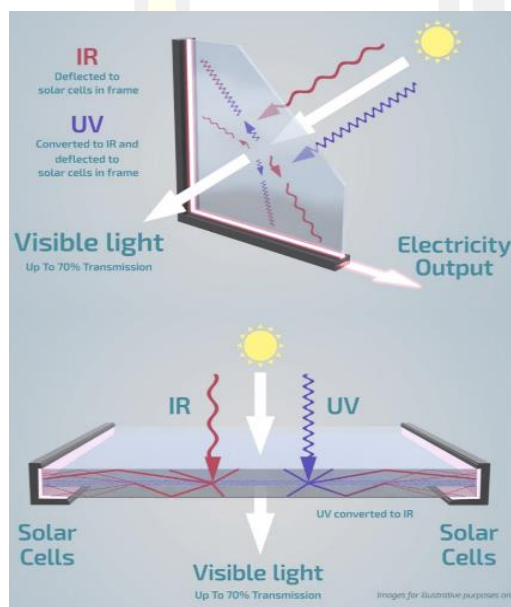
20. โซล่าเซลล์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell (TFSC)) หลักการโดยทั่วไปของการผลิตโซล่าเซลล์ ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell, TFSC) คือ การนำเอาสารที่สามารถแปลงพลังงานจากแสงเป็นกระแสไฟฟ้า มาฉาบเป็นฟิล์มหรือชั้นบางๆ ซ้อนกันหลายๆชั้น จึงเรียกโซล่าเซลล์ชนิดนี้ว่า ฟิล์มบาง หรือ thin film ซึ่งสารฉาบที่วานี้ก็มีด้วยกันหลายชนิด ชื่อเรียกของแผงโซล่าเซลล์ชนิดฟิล์มบางจึงแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่นำมาใช้ ได้แก่ อะมอร์ฟัส Silicon (a-Si), Cadmium telluride (CdTe), Copper indium gallium selenide (CIS/CIGS) และ Organic photovoltaic cells (OPC) ด้านประสิทธิภาพของ แผงโซล่าเซลล์ ชนิดฟิล์มบางนั้น มีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 7-13% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็นฟิล์มฉาบ แต่สำหรับบ้านเรือนโดยทั่วไปแล้ว มีเพียงประมาณ 5% เท่านั้น ที่ใช้แผงโซล่าเซลล์ที่เป็นแบบชนิดฟิล์มบาง [61]

21. โซล่าเซลล์ซิลิคอนสีดำ (Black Silicon Solar Cells) ผลิตโดยการเพิ่มความหนาแน่นเข้าไปในโครงสร้างของระดับนาโนของสันบนพื้นผิวของ standard silicon วัสดุที่ได้นี้มีการสะท้อนน้อยลงทำให้โซล่าเซลล์สามารถดักจับแสงในมุมที่มากขึ้น ดังนั้นมันจึงทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์ขึ้นนั่นเอง ทำให้มันสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้แม้ในสภาพอากาศที่มีแสงน้อย เช่น วันที่มีเมฆมาก นอกจากนั้นแล้วคาดว่า black silicon solar panels จะสามารถผลิตขึ้นด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าด้วยเนื่องจากมันไม่ต้องการเคลือบสารป้องกันการแสงสะท้อนเหมือน standard silicon solar panels ซึ่งทำให้ต้นทุนลดลง [62]

## 2.5 โซล่าเซลล์โปร่งแสง (Transparent Luminescent Solar Concentrator (TLSCs))

เทคโนโลยีโซล่าเซลล์โปร่งแสง (TLSCs) ถูกต่อยอดมาจากโซล่าเซลล์แบบหัวเรื่องแสง (Luminescent Solar Concentrator Cell (LSC)) ที่เกิดขึ้นในช่วงปลายทศวรรษ 1970 แต่แตกต่างกันตรงที่โซล่าเซลล์โปร่งแสงจะยอมให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็น

ได้(Visible light) ทะลุผ่านได้ ซึ่งถือได้ว่าโซล่าเซลล์โปร่งแสงเป็นอีกหนึ่งในความก้าวหน้าของเทคโนโลยีโซล่าเซลล์[63] โดยในช่วงแรกๆเทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพพลังงานอยู่ที่ไม่เกิน1% และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมีการใช้หลักการต่างๆมากมายในการพยายามเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้า [64] ในปี ค.ศ.2014 โซล่าเซลล์โปร่งแสงถูกพูดถึงครั้งแรกบนหน้าปกของวารสาร Advanced Optical Materials [12] ] โดยที่มวิจัยนำโดย Richard R. Lunt จากมหาวิทยาลัยชิแกนซึ่งพวกเขาคิดค้นเซลล์แสงอาทิตย์แบบโปร่งแสงขึ้นมาได้ ในตอนแรกมีประสิทธิภาพพลังงานไม่เกิน5% [13] เทคโนโลยีTLSCs จะมุ่งเน้นการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้โฟตอนจากรังสี อัลตราไวโอเลต (UV) และใกล้อินฟราเรด(near-infrared) เนื่องจากไม่มีอิเล็กโทรด บัสบาร์ และชุดกริด มาบดบังอยู่บนพื้นที่ของโซล่าเซลล์โปร่งแสง จึงทำให้โซล่าเซลล์มีความโปร่งแสง [65]



ภาพประกอบที่ 3 หลักการทำงานของโซล่าเซลล์โปร่งแสง(TLSCs) [22]

ปัจจุบัน มีความพยายามในการเพิ่มประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์โปร่งแสง โดยใช้หลักการต่างๆมาใช้เพื่อทำให้โซล่าเซลล์โปร่งแสงมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ในปี ค.ศ.2019 ทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัยรัฐในอวีโร ประเทศโปรตุเกส ที่ใช้ไอออนของแลนทาไนด์ ( $\text{Ln3} + = \text{Eu3} +, \text{Tb3} +$ ) - ไอโอโนซิลิกา (ISs) โดยย้อมเข้ากับแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) สามารถทำประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าของTLSCsได้ถึง 4% [14] งานวิจัยของ Sara Mattiello ในปี 2020 แสดงให้เห็นถึงการใช้อิออนพันธ์ benzothieno-benzothiophene (BTBT) ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) พบประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้า 3% [21] และงานวิจัยของ Paolo Della Sala ในปี 2019 โดยใช้โมเลกุล Cycloparaphenylene (CPP) ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) พบว่าอัตราส่วนของโฟตอนที่ชอบของโพลีเมทิลเมทาคริเลตต่อการดูดซับ พบว่ามีจุดสูงสุดอยู่ที่ 11% [19] เป็นต้น อีกทั้งยังมีการพัฒนาโซล่าเซลล์โปร่งแสงให้สามารถใช้งานได้ในด้านอื่นๆ เช่น การใช้ทดแทนหน้าต่าง

ซึ่งในปี ค.ศ.2021 Chenchen Yang และคณะได้ทำการวิจัย การใช้นาโนคลัสเตอร์ฟอสฟอเรสเซนต์(Phosphorescent Nanoclusters) ร่วมกับโมเลกุลอินทรีย์เรืองแสง(Fluorescent Organic Molecules) ในการสร้างโซลาร์เซลล์โปร่งแสง(TLSCs) สามารถทำประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า(Power Conversion Efficiency, PCE) มากกว่า3% ในขณะที่ค่าเฉลี่ยการมอมทะลุผ่าน(Average Visible Transmittance (AVT)) ทำได้เกิน 75% ซึ่งเหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมกระจก [66]

## 2.6 การคำนวณ (Calculation)

ในบทความของ Chenchen Yang, Dianyi Liu และ Richard R.Lund ที่ถือว่าเป็นบุคคลบุกเบิกโซลาร์เซลล์โปร่งแสง(TLSCs) ได้ร่วมกันเขียนบทความสำหรับมาตรฐานและการคำนวณต่างๆของโซลาร์เซลล์โปร่งแสงไว้ในปี ค.ศ.2019 [67] ดังนี้

1.  $\eta_{Opt}$  ประสิทธิภาพทางแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ หาได้จากสมการ

$$\eta_{Opt}(\lambda) = [1-R_f(\lambda)] \cdot A(\lambda) \cdot \eta_{PL} \cdot \eta_{Trap} \cdot \eta_{RA} \quad 2.1$$

โดย  $R_f$  คือ การสะท้อนสเปกตรัมของแสงที่ตกกระทบบริเวณพื้นผิวด้านหน้า

$A(\lambda)$  คือ การดูดซับสเปกตรัมสมบูรณ์

$\eta_{PL}$  คือ อัตราส่วนของปริมาณโฟตอนที่ดูดกลืน ต่อปริมาณของโฟตอนที่

คายออกมา  $\eta_{Trap}$  คือ ประสิทธิภาพการดักจับโฟตอน

$\eta_{RA}$  คือ ประสิทธิภาพในการยับยั้งการดูดซึมกลับ

2.  $\eta_{Opt}^*$  ประสิทธิภาพออปติคอลโดยรวม หาได้จากสมการ

$$\eta_{Opt}^* = \frac{\int AM\ 1.5G(\lambda) \eta_{Opt}(\lambda) d\lambda}{\int AM\ 1.5G(\lambda) d\lambda}$$

2.2

โดย AM 1.5 G คือ ค่ามวลของอากาศ ซึ่งจะใช้ 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพ

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแสง

$\eta_{Opt}$  ประสิทธิภาพของแสงโดยรวม

3.  $\eta_{PV}^*$  คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบริเวณขอบ หาได้จากสมการ

$$\eta_{PV}^* = \left( \frac{\eta_{PV}(AM\ 1.5G)}{\eta_{Abs}^{PV}(AM\ 1.5G)} \right) \cdot \frac{\int EQE_{PV}(\lambda') \cdot PL(\lambda') d\lambda'}{\int PL(\lambda') d\lambda'} \quad 2.3$$

โดย  $\eta_{\text{abs}}$  คือ ประสิทธิภาพการดูดซับสเปกตรัมของแสง  
 $\text{EQE}_{\text{PV}}$  คือ ประสิทธิภาพในเชิงควอนตัม  
 AM 1.5 G คือ ค่ามวลของอากาศ ซึ่งจะใช้ 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัด  
 ประสิทธิภาพ

PL คือ สเปกตรัมการแผ่รังสีของวัสดุเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ( $\lambda$ )

ค่า  $\eta_{\text{Opt}}$  ที่นำเสนอข้างต้นจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อความหนาแน่นของโฟตอนพลังค์(PFD) โซล่าเซลล์ บริเวณขอบเท่ากับพื้นผิวด้านหน้า ดังนั้นจึงไม่เพียงพอต่อการคำนวณประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ของโซล่าเซลล์โปร่งแสง โดยการคำนวณและนำเสนอ ควรจะ ใช้การหาประสิทธิภาพในเชิงควอนตัมของโซล่าเซลล์โปร่งแสง( $\text{EQE}_{\text{TLSC}}$ ), J-V และ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) แม้ว่าวิธีนี้จะสามารถใช้เป็นการคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นแนะนำให้ใช้ PCE และ  $\text{EQE}_{\text{TLSC}}$  ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

#### 4. ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE, $\eta_{\text{TLSC}}$ )

$$\eta_{\text{TLSC}} = \eta_{\text{Opt}} \cdot \eta_{\text{PV}} = \frac{J_{\text{SC}} \cdot V_{\text{OC}} \cdot \text{FF}}{P_0} \quad 2.4$$

โดย  $\eta_{\text{Opt}}$  คือ ประสิทธิภาพทางแสงที่คำนวณจากสมการ 2.5

$\eta_{\text{PV}}$  คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบริเวณขอบ

$J_{\text{SC}}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่รับแสงที่สภาวะลัดวงจร

$V_{\text{OC}}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด

FF คือ ปัจจัยเพิ่มเติม

$P_0$  คือ ค่าความเข้มของแสงโดยรวม ( $\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$ , AM 1.5G )

อย่างไรก็ตามในบทความดังกล่าว[67] เน้นย้ำว่าระบบ TLSC หรือ LSC ควรได้รับการปฏิบัติ หรือทดสอบเช่นเดียวกับอุปกรณ์โซลาร์เซลล์อื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นรายงานเฉพาะประสิทธิภาพ ออปติคอลโดยรวม ( $\eta_{\text{Opt}}$ ) หรือประสิทธิภาพทางแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ ( $\eta_{\text{Opt}}(\lambda)$ ) แนวทางที่ดีที่สุดในการได้มาซึ่งประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ( $\eta_{\text{TLSC}}$ ) ได้จากการหาลักษณะแรงดันไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแส (JV) ของโซล่าเซลล์ที่ติดตั้งบริเวณขอบ (ในรูปแบบอนุกรมหรือขนาน) ภายใต้การคำนวณอากาศมาตรฐาน AM 1.5G [68][69] ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่รับแสงที่สภาวะลัดวงจร ( $J_{\text{SC}}$ ) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{\text{OC}}$ ) ปัจจัยเพิ่มเติม (FF) และค่าความเข้มของแสงโดยรวม( $P_0$ ) ( $\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$ , AM 1.5G )

จากการหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ( $\eta_{\text{TLSC}}$ ) ควรหาประสิทธิภาพในเชิงควอนตัมของโซล่าเซลล์โปร่งแสง( $\text{EQE}_{\text{TLSC}}$ ) เพื่อใช้ในการรายงานร่วมกัน โดยจะทำให้การหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า มีความสมบูรณ์มากขึ้น ดังสมการที่ 2.5



5. ประสิทธิภาพในเชิงควอนตัมของโซลาร์เซลล์โปร่งแสง( $EQE_{TLSC}$ ) หาได้จากสมการ

$$EQE_{TLSC}(\lambda) = (1-R_f(\lambda)) \cdot A(\lambda) \cdot \eta_{PL} \cdot \eta_{Trap} \cdot \eta_{RA} \cdot EQE_{PV} \quad 2.5$$

โดย  $R_f$  คือ การสะท้อนสเปกตรัมของแสงที่ตกกระทบบริเวณพื้นผิวด้านหน้า

$A(\lambda)$  คือ การดูดซับสเปกตรัมสัมบูรณ์

$\eta_{PL}$  คือ อัตราส่วนของปริมาณโฟตอนที่ดูดกลืน ต่อปริมาณของโฟตอนที่คายออกมา

$\eta_{Trap}$  คือ ประสิทธิภาพการดักจับโฟตอน

$\eta_{RA}$  คือ ประสิทธิภาพในการยับยั้งการดูดซึมกลับ

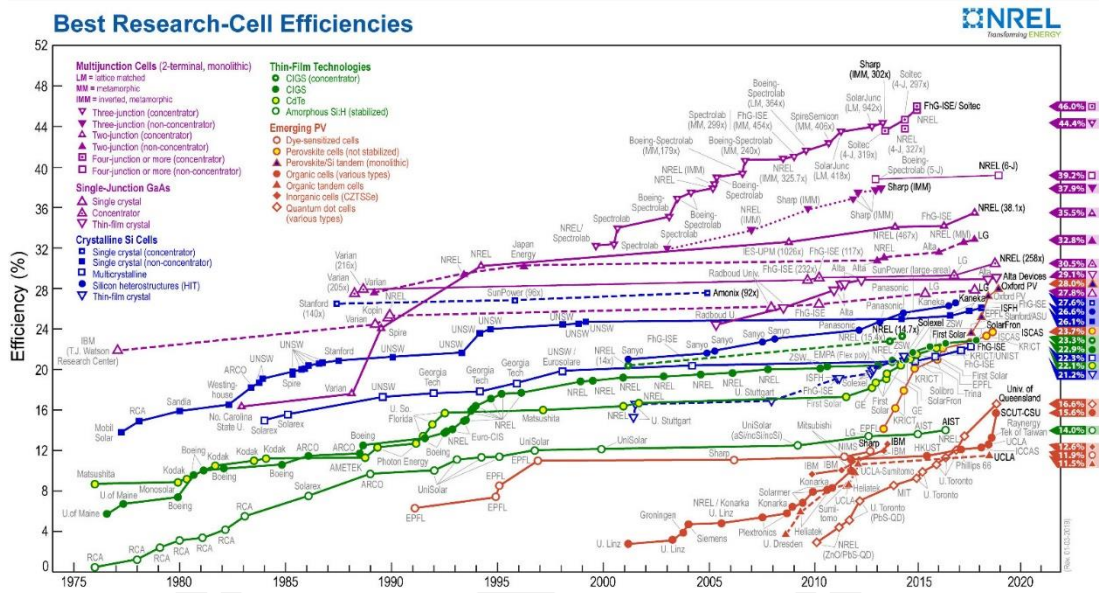
$EQE_{PV}$  คือ ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของโซลาร์เซลล์บริเวณขอบ

## 2.7 การประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์

วิธีการประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์นั้นจะต้องอ้างอิงตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission (IEC 61724) ถึงแม้ว่าจะมีตัวแปรจำนวนมากที่ใช้ในการคำนวณ แต่จะมีค่าตัวแปรที่สำคัญ ที่สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ และสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของ ระบบที่ติดตั้งกับระบบอื่นๆ [70] โดยทั่วไปแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกทำการ ทดสอบตามเงื่อนไขมาตรฐาน (Standard Test Condition หรือ STC) คือ เป็นการทดสอบหาค่ากำลังการผลิตของโซลาร์เซลล์ที่ความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ที่ค่ามวลอากาศ 1.5 แต่เมื่อทำการติดตั้ง และใช้งานตามสภาวะแวดล้อม จริง ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิจะมีความแตกต่างจากที่ สภาวะมาตรฐาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ จะมีค่าลดลง และเมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มา ประกอบกันเป็นระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีอุปกรณ์ส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในระบบ ซึ่งรวมไปถึงสายไฟ และอินเวอร์เตอร์ ทำให้ค่าประสิทธิภาพรวม และสมรรถนะของระบบมีการเปลี่ยนแปลง[71]

## 2.8 ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ในปัจจุบัน

จากข้อมูลของ National Renewable Energy Laboratory (NREL) [72] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ในชนิดต่างๆของแต่ละบริษัทหรือสถาบัน โดยทำการรวบรวมไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 จนถึงปี ค.ศ.2021 พบว่าแต่ละบริษัทหรือสถาบันมีความพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพโซลาร์เซลล์จากอดีตในแต่ละชนิดของโซลาร์เซลล์โดยใช้เทคนิคหรือหลักการต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4 แผนภูมิประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์ในชนิดต่างๆของแต่ละบริษัทหรือสถาบัน [72]

โซล่าเซลล์ที่รวมอยู่ในแผนภูมิได้รับการยืนยันโดยห้องปฏิบัติการทดสอบอิสระที่ได้รับการยอมรับเช่น NREL, AIST, JRC-ESTI และ Fraunhofer-ISE และได้รับการรายงานตามมาตรฐานทดสอบหรือเงื่อนไขการรายงานตามที่กำหนดโดยสเปกตรัมอ้างอิงทั่วโลก [72]

### 2.8 โพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA)

โพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA)หรือที่รู้จักในชื่ออะคริลิก จัดเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) สูง ความไม่เป็นผลึกหรือความเป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์จะส่งผลให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมีสมบัติแข็ง ใส และโปร่งแสงเหมือนแก้ว สมบัติเด่นคือ แข็งเหนียว นอกจากจะมีความแข็งแรง ทนต่อการกัดและต่าง ยังสามารถตัดและตัดได้ง่าย ทำให้สามารถใช้แทนกระจกได้ และทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าพลาสติกชนิดอื่น อีกทั้งยังหาซื้อได้ง่าย ผลิตมาในเชิงพาณิชย์เป็นจำนวนมากและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างแพร่หลาย[18] มีลักษณะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.1

สูตรเคมี	(C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>
ความหนาแน่น	1.18 g / cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	160 ° C (320 ° F; 433 K)
ค่าความไวต่อสภาพแม่เหล็ก	-9.06×10 <sup>-6</sup> (SI, 22 °C)
ดัชนีหักเห	1.4905 at 589.3 nm

**ตารางที่ 2.1** ลักษณะต่างๆของโพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) [73]

โพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) เป็นพลาสติกที่ได้จากการนำโมโนเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate, MMA) มาทำปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ (polymerization) โดย 2 นักเคมีชาวเยอรมันคือ ฟิททิจ (Fittig) และพอล (Paul) สามารถสังเคราะห์โพลีเมทิลเมทาคริเลตได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1877 แล้ว แต่การพัฒนาวิธีผลิตให้ได้แผ่นอะคริลิกพลาสติกออกมาต้องรอถึงปี ค.ศ. 1933 เมื่อ ออทโท เร็ห์ม (Otto Röhm) นักเคมีชาวเยอรมันของจดสิทธิบัตรวิธีผลิตแผ่นพลาสติกใสจากโพลีเมทิลเมทาคริเลตในชื่อทางการค้า Plexiglas หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1936 จึงมีการผลิตแผ่น Plexiglas ออกจำหน่ายในเชิงพาณิชย์[74] ภายหลังจากค้นพบวิธีการผลิตอะคริลิกเมื่อร้อยกว่าปีก่อน มาจนกระทั่งผลิตในรูปแบบแผ่นเมื่อราวต้นทศวรรษ 1930 ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการผลิตอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี ที่จะแตกต่างกันในด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต ที่นิยมนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วยต้นทุนที่เหมาะสมกับการใช้ในปริมาณมากๆ เชิงอุตสาหกรรม ได้แก่

1.กระบวนการแบบหล่อหรือ Casting ใช้น้ำยาเมทิลเมทาคริเลต(MMA) เป็นสารตั้งต้นในการผลิต ก็จะมีทั้งแบบหล่อต่อเนื่อง (Continuous Casting Process) ซึ่งผลิตโดยการลำเลียงของสายพาน 2 เส้นที่เคลื่อนที่ และ แบบหล่อไม่ต่อเนื่อง (Batch Casting Process) ที่จะเกิดในแม่พิมพ์โดยหล่อเป็นชิ้นๆ หรือแผ่นๆ ไป

2.กระบวนการแบบฉีดหรือ Extrusion ใช้เม็ดพลาสติกชนิดโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) [75]

โพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทาน และน้ำหนักเบา แต่ก็มี ความหนาแน่นอยู่ที่ 1.17-1.20 g / cm<sup>3</sup>, [76] [77]ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของแก้ว [76] และยังรับแรง กระแทกได้ดี สูงกว่าทั้งแก้วและโพลีสไตรีน อย่างไรก็ตาม การรับแรงกระแทกของ PMMA ยังคงต่ำกว่าโพลีคาร์บอเนตและพอลิเมอร์ที่ได้รับการออกแบบทางวิศวกรรมบางชนิดอย่างมีนัยสำคัญ โพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) มีความโปร่งใสสูงยอมให้แสงผ่านได้ถึง 92% สะท้อนภายในอีก 4% จากแต่ละพื้นผิวเนื่องจากดัชนีการหักเหของแสง (1.4905 ที่ 589.3nm) [78] สามารถกรองแสง อัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 300nm (คล้ายกับกระจกหน้าต่างทั่วไป) ในขณะที่ผู้ผลิตบางรายเพิ่มสารเคลือบหรือสารเติมแต่งลงใน PMMA เพื่อปรับปรุงการดูดซับรังสีในช่วง 300–400nm แสงอินฟราเรดผ่านได้สูงถึง 2,800nm [79] การทนต่อสารอินทรีย์หลายตัวทำ

ละลาย นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อสารเคมีอื่น ๆ ได้ไม่ดีเนื่องจากเป็นกลุ่มเอสเทอร์ที่ไฮโดรไลซ์ได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้นน้อยกว่าพลาสติกส่วนใหญ่ชนิดอื่นๆ เช่น โพลีสไตรีนและโพลีเอทิลีน ดังนั้น PMMA จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานกลางแจ้ง (80) และมีอัตราส่วนการดูดซึมน้ำสูงสุดอยู่ที่ 0.3–0.4% โดยน้ำหนัก [76] ความต้านแรงดึงลดลงเมื่อการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น [81] ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของความร้อนค่อนข้างสูงที่  $(5-10) \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [82]

## 2.9 เกลือสินเธาว์ (Rock Salt, NaCl, Halite)

เกลือสินเธาว์ หรือ เกลือหิน เรียกว่าแร่ เฮไลต์ (Halite) มีองค์ประกอบทางเคมีคือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประกอบด้วย คลอริ่น (Chlorine) ร้อยละ 60.7 และ โซเดียม (Sodium) ร้อยละ 39.3 เกลือมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 58.4 มีรูปผลึกแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ใสไม่มีสีเมื่อบริสุทธิ์ แต่เมื่อมีมลทินจะมีสีขาว สีเทา สีน้ำตาล และสีส้ม มีความถ่วงจำเพาะ 2.165 ความแข็งตามสเกลของมอร์ (Moh's Scale) 2.5 มีจุดหลอมตัวที่ 800.8 °C และน้ำเกลือจะเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 21.12 °C เกลือชนิดนี้มีประโยชน์ที่สำคัญนอกจากใช้ในการปรุงอาหารและถนอมอาหารแล้ว ยังมีประโยชน์อย่างมากในการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่นการทำโซดาไฟ (NaOH) โซดาแอช (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) [83] มีลักษณะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.2

สูตรเคมี	NaCl
ความหนาแน่น	2.16 g / cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	801 °C (1074 K)
มวลต่อหนึ่งโมล	58.44 g/mol
ดัชนีหักเห	1.544 nD (589 nm)
ความสามารถละลายได้ในน้ำ	35.9 g/100 mL (25 °C)
ลักษณะทางกายภาพ	Colorless/white crystalline solid
จุดเดือด	1465 °C (1738 K)

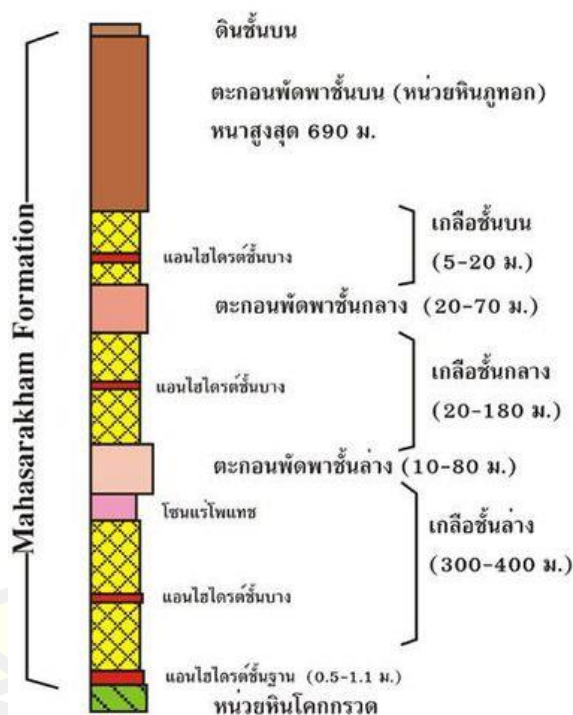
ตารางที่ 2.2 ลักษณะต่างๆของโซเดียมคลอไรด์(NaCl) [84]

เกลือสินเธาว์พบมากในภาคอีสาน เนื่องจากในภูมิภาคนี้มีน้ำทะเลที่เคยไหลท่วมภาคอีสาน และได้ถูกปิดกั้นด้วยเทือกเขาภูพาน ทำให้พบแร่เกลือหิน และแร่โปแตชชนิดคาร์บอเนตจำนวนมาก บริเวณที่พบแร่เกลือหินและแร่โปแตช มีลักษณะเป็นแอ่ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แอ่ง คือ

แอ่งเหนือ หรือ แอ่งสกลนคร (Sakonkakhon Basin) อยู่ทางตอนเหนือ ของ ที่ราบสูงโคราช กลุ่มพื้นที่ของ จังหวัดอุดรธานี หนองคาย สกลนคร และนครพนม เป็นเนื้อที่ประมาณ 17,000 ตารางกิโลเมตร

แอ่งใต้ หรือ แอ่งโคราช (Khorat Basin) อยู่ทางตอนใต้ ของที่ราบสูงโคราช กลุ่มพื้นที่ของ จังหวัดขอนแก่น มหาสารคาม กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี นครราชสีมา ชัยภูมิ สุรินทร์ และบุรีรัมย์ เป็นเนื้อที่ ประมาณ 33,000 ตารางกิโลเมตร

หมวดหินมหาสารคาม ประกอบด้วย หน่วยหินย่อย 7 ชุด เรียงจากชั้นที่แก่สุดถึงอ่อนสุด ดังนี้ หินชั้นสีแดงอายุแก่ ชั้นแอนไฮโดรต์ชั้นฐาน เปลือกชั้นล่าง ดินเหนียวชั้นล่าง เปลือกชั้นกลาง ดินเหนียวชั้นกลาง เปลือกชั้นบน และดินเหนียวชั้นบน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 5 ลักษณะของหน่วยหินของจังหวัดมหาสารคาม [88]

ชั้นที่ 1 แอนไฮโดรต์ชั้นฐาน เป็นชั้นหินเกลือระเหยที่อยู่ล่างสุดในแอ่ง มีความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอประมาณ 1-2 เมตร วางตัวอยู่ใต้ชั้นเกลือหินและทับอยู่บนหินทรายเนื้อละเอียด

ชั้นที่ 2 เปลือกหินชั้นล่าง ประกอบด้วยเปลือกหินเป็นหลัก มีความหนามากที่สุด และพบแร่โพแทชอยู่ในช่วงบนของชั้นเกลือหินนี้ ในส่วนบนของเปลือกหินชั้นนี้ จะมีความสะอาดหรือความบริสุทธิ์มาก และมีอินทรีย์วัตถุเข้ามาปนมากขึ้นในตอนล่าง ๆ ทำให้มีสีเทาดำ พบยิปซัมและแอนไฮโดรต์ปน

บ้างเล็กน้อยประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ความหนาของชั้นเกลือหินนี้ โดยเฉลี่ย 134 เมตร หลุมเจาะที่อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม (K-89) พบเกลือหินหนาที่สุด 1,080 เมตร ซึ่งไม่ใช่ความหนาที่แท้จริง เพราะพบการเอียงเทของชั้นเกลือหินค่อนข้างมากจากแท่งตัวอย่าง เนื่องจากชั้นเกลือหินถูกดันนูนขึ้นเป็นโดมหินเกลือ

ชั้นที่ 3 ชั้นแร่โพแทช ส่วนใหญ่เป็นแร่คาร์เนลไลต์ (Carnallite-KMgCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O) ส่วนน้อยเป็นแร่ซิลไวต์ (Sylvite-KCl) ซึ่งพบวางตัวอยู่ข้างบนชั้นแร่คาร์เนลไลต์ เกิดจากแมกนีเซียมในแร่คาร์เนลไลต์ถูกชะออกไป

แร่คาร์เนลไลต์ มีลักษณะเป็นสีชมพูเรื่อๆ บางครั้งอมม่วงและขาวขุ่น ส่วนน้อยที่มีสีค่อนข้างเข้มไปในทางสี ส้มหรือสีแดงเนื่องจากมลทินของแร่ฮีมาไทต์ มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ง่ายกว่าเกลือหินและซิลไวต์มาก มีรสเผื่อน พบเป็นชั้นค่อนข้างหนา พบหนาที่สุดประมาณ 200 เมตร จากการเจาะสำรวจ 118 หลุม พบแร่โพแทช 61 หลุม อยู่ในระดับลึกตั้งแต่ 75-532 เมตร มีความหนาเฉลี่ย 42 เมตร

แร่ซิลไวต์ ส่วนใหญ่มีสีขาวขุ่นคล้ายเกลือหินมาก อาจพบสีส้ม และสีแดงอมส้ม เกิดเป็นชั้นบางๆ สลับกับเกลือหิน พบแร่ซิลไวต์ค่อนข้างหนาประมาณ 12 เมตร อยู่ต้นประมาณ 75 เมตรจากผิวดิน คือที่อำเภอวนรนิวาส จังหวัดสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น และอำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี

ชั้นที่ 4 เกลือหินหลากสี พบเหนือชั้นโพแทช มีความหนาเฉลี่ย 3 เมตร มีสีต่างๆ เช่น สีส้ม แดง เทา ดำ และขาว เป็นชั้นสลับกัน และพบเฉพาะบริเวณที่มีชั้นโพแทชเท่านั้น

ชั้นที่ 5 เกลือหินชั้นกลาง มีสีขาว และบางบริเวณมีสีครีมจนถึงสีน้ำตาลอ่อน พบยิปซัมและแอนไฮไดรต์ สีขาวประมาณ 2%-3% กระจายทั่วไป พบหนาที่สุดที่ อำเภอคง จังหวัดนครราชสีมา คือสถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หนา 171 เมตร จากหลุมเจาะทั้งหมด 118 หลุม พบว่ามีเกลือหินชั้นกลางนี้เพียง 56 หลุม มีความหนาเฉลี่ย 70 เมตร

ชั้นที่ 6 เกลือหินชั้นบน ประกอบด้วยเกลือหินล้วนๆ มียิปซัมเล็กน้อย และบางบริเวณในช่วงกลางๆ จะพบชั้นแอนไฮไดรต์ที่หนาประมาณ 2 เมตร ชั้นเกลือหินชั้นบนมีความหนาตั้งแต่ 3-65 เมตร บางแห่งพบว่าชั้นนี้ละลายไปหมด พบในหลุมเจาะเพียง 13 หลุมจาก 118 หลุม พบบริเวณกลางๆ แอ่งและบางบริเวณเท่านั้น

ชั้นที่ 7 ชั้นดินเหนียว ชั้นดินเหนียวและชั้นหินโคลนนี้จะมีสีน้ำตาลแดงและมีจุดสีเขียวกระจายอยู่ทั่วไป เป็นชั้นที่เกิดแทรกสลับระหว่างชั้นเกลือหินต่างๆ ชั้นดินเหนียวที่คั่นระหว่างเกลือหินชั้นกลางกับชั้นล่าง มีความหนาตั้งแต่ 8-66 เมตร โดยเฉลี่ย 35 เมตร สำหรับชั้นดินเหนียวที่คั่นระหว่างเกลือหินชั้นบนกับชั้นกลางนั้นมีความหนาตั้งแต่ 5-83 เมตร โดยเฉลี่ย 43 เมตร [85] [86] [87] [88] [89]

## 2.10 ระบบจำลองแสงอาทิตย์เทียม

แสงอาทิตย์เทียม ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้แทนแสงจากดวงอาทิตย์ เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ โดยการออกแบบให้มีคุณลักษณะของแสงที่ใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติมากที่สุด ทั้งด้านความยาวคลื่น (Wave length) ความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ (Solar irradiance) และอุณหภูมิ (Temperature) โดยอาจใช้แหล่งกำเนิดแสงได้อย่างหลากหลาย เช่น จากหลอดไฟฟ้า ชนิดต่างๆ เช่น หลอด ซีนอน (Xenon Lamp) หลอดทังสเตน-ฮาโลเจน (Tungsten-Halogen Lamp) หลอดเมทัลฮาไลด์ (Metal Halide Lamp) หรือ หลอด แอล อี ดี (Light Emitting Diode) เป็นต้น และมีระบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าของหลอดไฟฟ้างกล่าวอย่างเหมาะสม ชุดกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมเหล่านี้ ส่วนใหญ่ นำไปใช้ในการทดสอบ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในศูนย์ทดสอบ มาตรฐาน (Standard Test Center) หรือในห้องปฏิบัติการวิจัย เป็นต้น [90]

## 2.11 ข้อกำหนดระบบแสงอาทิตย์เทียมมาตรฐาน BSI (British Standard Institution)

ข้อกำหนดนี้เป็นส่วนหนึ่ง ในมาตรฐานทดสอบตัวรับรังสีของประเทศอังกฤษ ซึ่งชื่อว่า British Standard Methods for Test Thermal Performance of Solar Collectors ชื่อรหัส BS 6757: 1986 ข้อกำหนดมีดังนี้ [91]

2.1) ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยตลอดผิวหน้าที่ได้รับแสง ต้องไม่ต่ำกว่า 400 วัตต์ ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่งใด ๆ และในขณะที่ทำการทดสอบค่าความเข้มแสงเฉลี่ยจะเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $\pm 50$  วัตต์ต่อตารางเมตร หรือต้องอยู่ในช่วงความเข้มแสง 27,798 ลักซ์ ถึง 51,625 ลักซ์

2.2) ในขณะใดขณะหนึ่งค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่งใด ๆ บนพื้นที่รับแสงจะแตกต่างจากค่าเฉลี่ย พื้นที่รับ แสงไม่เกิน  $\pm 30$  เปอร์เซ็นต์

2.3) การทดสอบภายในห้องปฏิบัติการแสงอาทิตย์จะต้องควบคุมสภาวะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการให้คงที่ โดยอากาศเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าตัวรับรังสีในขณะที่ทดสอบ ด้วยความเร็วลมเฉลี่ยระหว่าง 2 ถึง 8 เมตร ต่อวินาที

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(VanjulaKataria., 2022) ในบทความนี้ รายงานการสร้างโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง (LSC) แบบโปร่งใสที่ใช้ PMMA ซึ่งฝังด้วยนาโนคริสตัลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดูดซับความยาวคลื่นที่กระตุ้นได้หลากหลายตั้งแต่ UV ถึง NIR และเปล่งออกมาในบริเวณที่มองเห็นได้ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ Stoke และ anti-Stoke แสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง  $\sim 6.93\%$  และประสิทธิภาพออปติคัล  $\sim 8.57\%$

(Ana R. Frias., 2020) ในงานนี้ รายงานการเคลือบผิวเชิงแสงสำหรับ โซล่าเซลล์โปร่งแสง (TLSCs) ด้วยแลนทาไนด์ไอออน ( $\text{Ln}^{3+} = \text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ ) - ไอโอโนซิลิกา (ISs) ที่ทำหน้าที่เจือพื้นผิวที่เจือปนบนแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) แสดงศักยภาพที่ยอดเยี่ยมสำหรับอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพและทนต่อสภาพแวดล้อม โดยมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่  $\sim 0.27\%$  และ  $\sim 0.34\%$  ตามลำดับ

(Samantha K. E. Hill., 2020) จุดควอนตัมซิลิคอน (Si QDs) เป็นสารเรืองแสงที่น่าดึงดูดและไม่ใช่พิษสำหรับโซล่าเซลล์โปร่งแสง (TLSCs) โดยใช้ฟิล์ม Si QD/โพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) บนกระจกโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์เบลดและได้ฟิล์มที่มีการกระเจิงแสงน้อยที่ลำดับความสำคัญของเศษน้ำหนั Si QD ที่สูงกว่าที่เคยมีมาในปริมาณมาก ซึ่งในงานนี้มีการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตสูง ( $>80\%$ ) จับคู่กับการส่องผ่านที่มองเห็นได้สูง ( $>87\%$ ) และหมอกควันที่มองเห็นได้น้อยที่สุด ( $\sim 1\%$ ) ทำให้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการเคลือบกึ่งโปร่งใสสำหรับ TLSCs ซึ่งถือเป็นหน้าต่างเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์

(N.Aste., 2015) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโมดูลโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง(LSCs)ในพื้นที่ขนาดใหญ่ บทความนี้อธิบาย การวัดการทำงานของต้นแบบโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง ซึ่งได้รับการทดสอบที่ศูนย์ทดสอบโฟโตโวลตาอิก (PV) ของ Politecnico di Milano โดยใช้องค์ประกอบเรืองแสงของสีย้อม ENI ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) รวมถึงสารประกอบอะซีนและสารประกอบเบนโซโทอะไดอะโซล ซึ่งมีการติดตั้งโซล่าเซลล์ผลึกทึบ(PV) ต่ออนุกรมเข้าด้วยกันที่ขอบของโพลีเมทิลเมทาคริเลต โดยอ้างอิงถึงเงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน (STC) ผลลัพธ์เบื้องต้นแสดงอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่ดีขึ้นสำหรับโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง เมื่อเปรียบเทียบกับโมดูล PV มาตรฐาน

(L. H. Slooff., 2008) การทดสอบโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง(LSCs) ด้วยแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) ซึ่งมีสีย้อมโมเลกุลสองสี คือ สีแดง Red305 0.01 % และ สีเหลืองเรืองแสง CRS040 0.003% แสงที่ตกกระทบจะถูกดูดกลืนโดยอนุภาคเรืองแสงและถูกปล่อยออกมาอีกครั้ง ส่วนหนึ่งของแสงที่ปล่อยออกมาจากอนุภาคเรืองแสงถูกสะท้อนภายในไปยังโซล่าเซลล์ที่ติดตั้งบริเวณขอบของโพลีเมทิลเมทาคริเลต เนื่องจากบริเวณผิวขอบมีขนาดเล็กกว่าบริเวณที่รับแสง จึงทำให้เกิดความเข้มข้นของแสงที่มากกว่า โดยการทดสอบโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสงจะติดตั้งโซล่าเซลล์แบบมัล



ติคริสตัลไลน์ซิลิคอน (mc-Si) หรือชนิด GaAs ผลที่ได้จากการใช้แผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลตขนาด 5cm x 5cm พบว่าความเข้มของแสงที่บริเวณขอบมีค่าสูงมาก และจะลดลงเรื่อยๆเมื่อใช้แผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดมากขึ้น

(Xingcan Li., 2015) การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยการศึกษาทดสอบจะใช้วิธีการส่งผ่านความยาวคลื่นแสงแบบคู่ ในช่วงสเปกตรัมตั้งแต่ 300 ถึง 2500 nm ที่ช่วงความเข้มข้นของ NaCl ตั้งแต่ 0 ถึง 360 g/L ผลการวิจัยพบว่าดัชนีการหักเหของแสงของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaCl และสัมพันธ์กันอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับความเข้มข้นของสารละลาย NaCl ดัชนีการดูดกลืนของสารละลาย NaCl จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaCl ในช่วงสเปกตรัมที่มองเห็นได้ 300–700 nm แต่จะแตกต่างกันเล็กน้อยในช่วงสเปกตรัมใกล้อินฟราเรด 700–2500 nm ที่อุณหภูมิห้อง

(Otmar Melvin ten Kate., 2015) การรายงานคุณสมบัติทางแสงและการเรืองแสงของ  $\text{CaI}_2$  และ NaCl ที่เจือด้วยทูลูเลียมไดวาเลนต์ สำหรับโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง(LSCs) เฮไลด์เหล่านี้จะดูดซับรังสี UV ได้สูงถึง 900 nm และจะปล่อยรังสีออกมาที่ 1140 nm จากการทดสอบด้วยโซล่าเซลล์  $\text{CuInSe}_2$  (CIS) แบบฟิล์มบาง สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า(PCE) ได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการแผ่รังสีที่คาบเกี่ยวกันเล็กน้อย จึงทำให้โซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสง (LSC) อาจนำไปสู่การพัฒนาหน้าต่างผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบกึ่งโปร่งใส ไร้สี ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโซล่าเซลล์แบบหัวเรืองแสงที่ใช้สีย้อมโมเลกุลอินทรีย์ ถึงสี่เท่า

### บทสรุป

งานวิจัยบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ด้วยโซล่าเซลล์ โดยกล่าวถึงพลังงานจากแสงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ โซล่าเซลล์ ชนิดของโซล่าเซลล์ โซล่าเซลล์โปร่งแสง การคำนวณ การประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซล่าเซลล์ ประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์ในปัจจุบัน โพลีเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) เคลือบอินทรีย์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

พหุบัณฑิต ชีวะ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

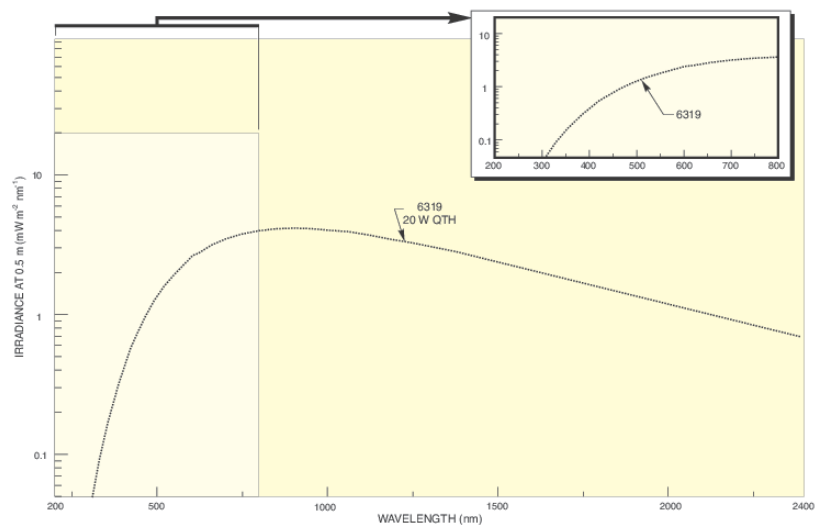
หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการออกแบบโซล่าเซลล์โปร่งแสงในบทที่ 2 แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะการออกแบบโครงสร้างและวงจรให้สามารถผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ จากนั้นนำมาทดลองจริงเบื้องต้นและทดสอบในห้องทดสอบจำลองระบบแสงอาทิตย์เทียมที่จะจัดทำขึ้นมา ภายใต้ข้อกำหนดของ BSI ลำดับถัดไป เพื่อให้ได้งานออกมาตามวัตถุประสงค์และดำเนินการตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยต่อไป

จากโครงสร้างของระบบโซล่าเซลล์โปร่งแสง ทำให้สามารถควบคุมแรงดันและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าบริเวณขอบโซล่าเซลล์โปร่งแสงได้ตามความต้องการ ซึ่งการนำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยเรื่องการออกแบบระบบเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้า และระบบเชื่อมต่อระหว่างกริด อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

#### 3.1 การออกแบบห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม

##### 3.1.1 หลอดไฟที่ใช้สำหรับห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม

หลอดไฟฮาโลเจนรู้จักกันในชื่อหลอดไฟควอตซ์ฮาโลเจน และหลอดไฟฮาโลเจน ทั้งสแตน ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งพัฒนาขึ้นจากหลอดอินแคนเดสเซนต์ที่คุ้นเคยกันเป็นอย่างดี หลอดไฟฮาโลเจนมีไส้หลอดทั้งสแตนคล้ายกับในหลอดอินแคนเดสเซนต์มาตรฐาน แต่ตัวหลอดไฟมีขนาดเล็กกว่าในขณะที่ให้กำลังไฟฟ้าเท่ากันและมีการบรรจุแก๊สฮาโลเจนในหลอดตัวหลอดแก้วทำด้วยควอตซ์ แก้วซิลิกา หรืออะลูมิเนียมซิลิเกตหลอม หลอดไฟฮาโลเจนมีความแข็งแรงกว่าหลอดแก้วแบบมาตรฐานเนื่องจากต้องบรรจุแรงดันสูง อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ฮาโลเจนจะร้อนขึ้นจนกลายเป็นแก๊สที่อุณหภูมิต่ำลง ฮาโลเจนคือองค์ประกอบของโลหะโมโนวาเลนซ์ชนิดหนึ่งที่จะรวมตัวกันเป็นอออนประจุลบ สารฮาโลเจนมีอยู่ห้าชนิด ได้แก่ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และแอสทาทีน หลอดไฟฮาโลเจนมีขนาดกะทัดรัด และให้ค่าลูเมนที่สูงหลอดฮาโลเจนจึงมีประสิทธิภาพความสว่างสูงกว่า (10-30 ลูเมน/วัตต์) หลอดนี้ให้แสงที่มีอุณหภูมิสีสูงกว่า และด้วยขนาดเล็กกว่า ใช้งานได้เต็มทีกับระบบของแสงซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าในแง่ของวิธีที่หลอดทอดแสงที่ปลดปล่อยออกมา ในการออกแบบจะเลือกใช้หลอดไฟชนิดฮาโลเจน ซึ่งหลอดฮาโลเจนมีสเปกตรัมของแสงตั้งแต่ 650 นาโนเมตร ถึงประมาณ 950 นาโนเมตร สามารถเปล่งแสงออกมาได้ดีในช่วงสเปกตรัมของแสงอินฟราเรด ใกล้เคียงกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ อีกทั้งหลอดฮาโลเจนยังมีประสิทธิภาพมากกว่าหลอดไส้ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการวิจัย



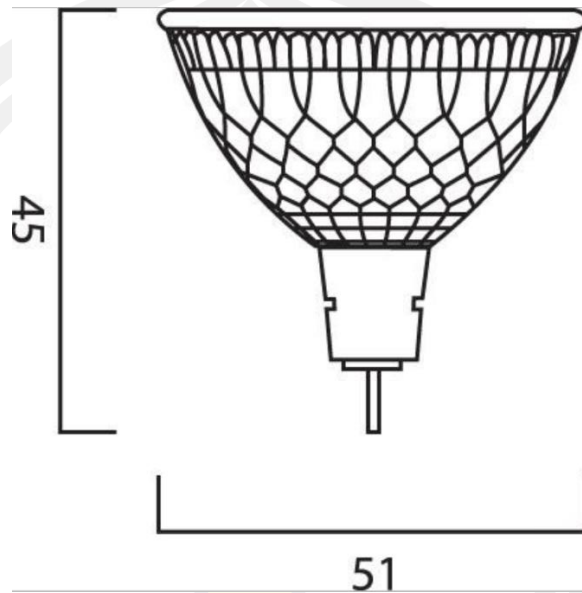
ภาพประกอบที่ 6 การปล่อยสเปกตรัมแสงของหลอดฮาโลเจน

### 3.1.2 การออกแบบห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

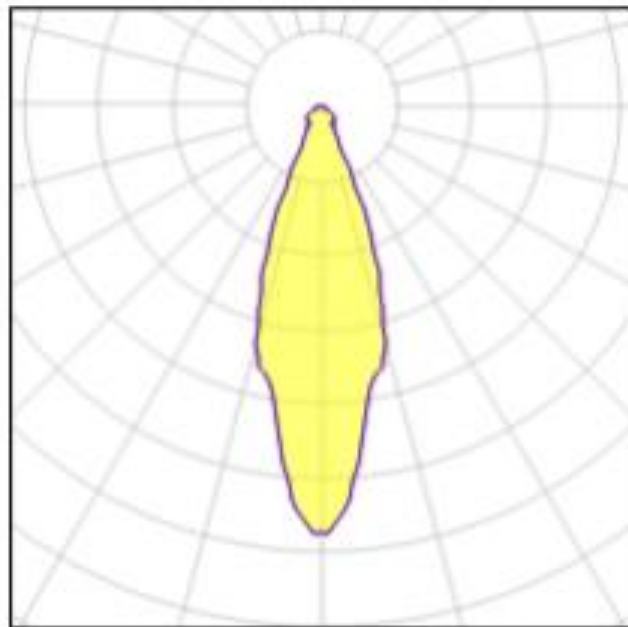
การออกแบบจะใช้โปรแกรม ไดอะลักซ์(Dialux) โดยเป็นโปรแกรมของบริษัท DIAL ในการคำนวณและออกแบบระบบ จำลอง และคำนวณแสงสว่าง เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ การวิจัยและให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด โดยกำหนดข้อมูลของห้องทดสอบตามตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.1 ข้อมูลต้นแบบห้องทดสอบ

ขนาดของห้องทดสอบ	กว้าง	0.35 เมตร
	ยาว	0.40 เมตร
	สูง	0.50 เมตร
ชนิดผนังห้องทดสอบ	ด้านหน้า	ไม้อัด
	ด้านข้าง	ไม้อัด
	ด้านหลัง	ไม้อัด
	ด้านบน	ไม้อัด
ระยะห่างจากหลอดไฟกับพื้นที่ทดสอบ		0.18 เมตร
ชนิดของหลอดไฟ		Sylvania Reflector Lamp QR51 GU/GX 5.3 + 35W/38DG

โดยหลอดไฟสำหรับห้องจํารองระบบแสงอาทิตย์เทียมที่เลือกใช้หลอดยี่ห้อ Sylvania รุ่น Reflector Lamp QR51 GU/GX 5.3 + 35W/38DG มีข้อมูลดัง ภาพประกอบที่ 7 และ 8



ภาพประกอบที่ 7 แสดงขนาดทางเลขาคณิตของหลอดไฟ

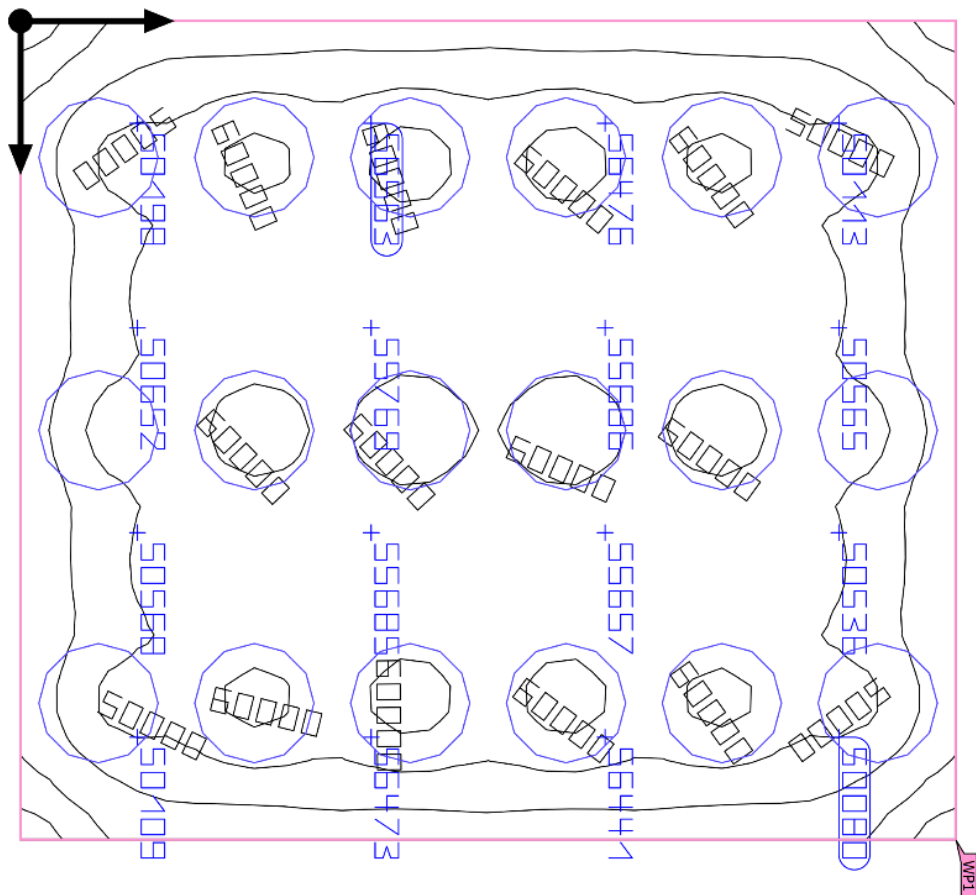


ภาพประกอบที่ 8 แสดงมุมของแสงจากหลอดไฟ

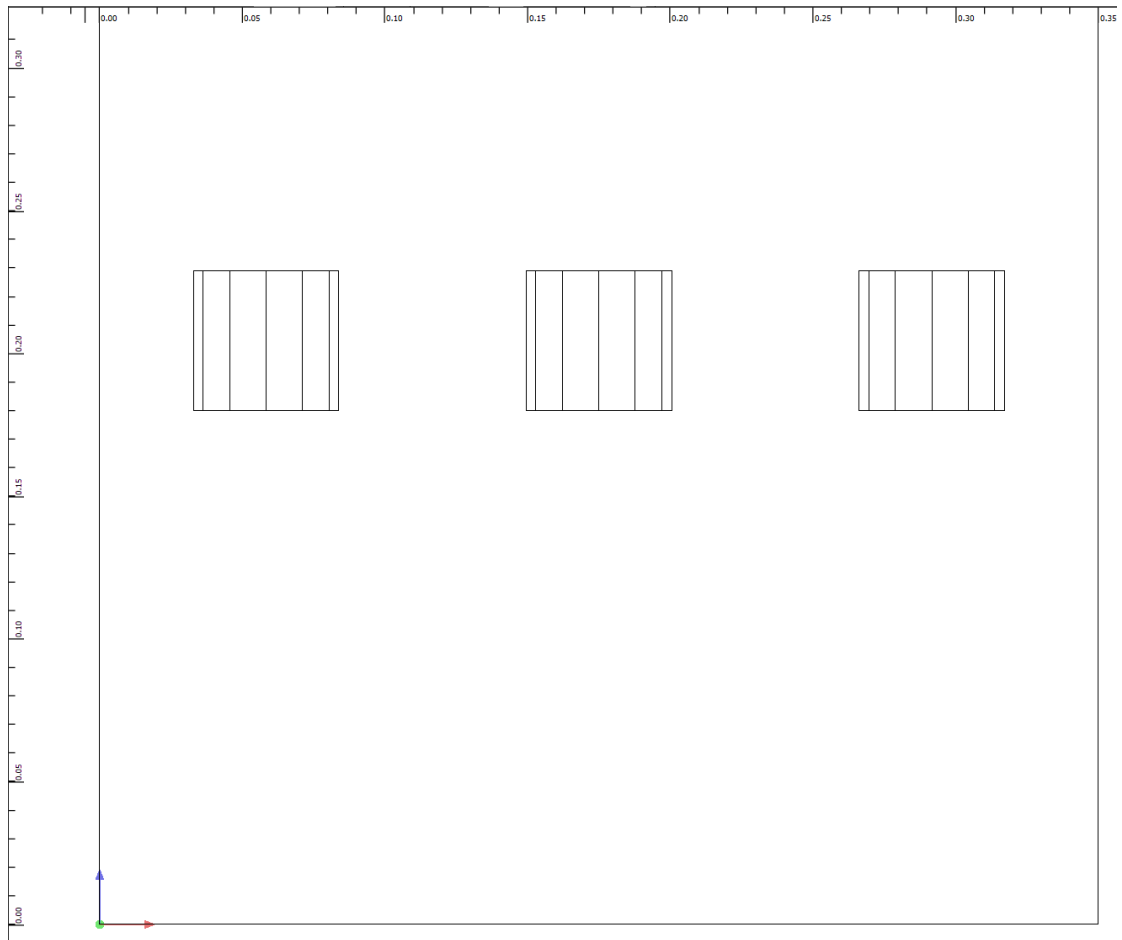
ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของหลอดที่ใช้สำหรับจำลองแสงอาทิตย์เทียม

ชนิดของหลอด	ฮาโลเจน
กำลังไฟฟ้าของหลอด	35 วัตต์
ฟลักซ์ส่องสว่าง	650 ลูเมน
ประสิทธิภาพการส่องสว่าง	15 ลูเมน/วัตต์
สีของแสง	3000 เคลวิน
ดัชนีวัดค่าความถูกต้องของสี	99
อัตราส่วนของแสงสว่าง	92%
มุมของแสง	38 องศา

เมื่อกำหนดค่าต่างๆและเลือกหลอดไฟแล้ว จะป้อนข้อมูลลงในโปรแกรมไดอะลักซ์ เพื่อจำลองระบบส่องสว่างของห้องทดสอบแสงอาทิตย์เทียม ดังภาพประกอบที่ 9, 10 และ 11

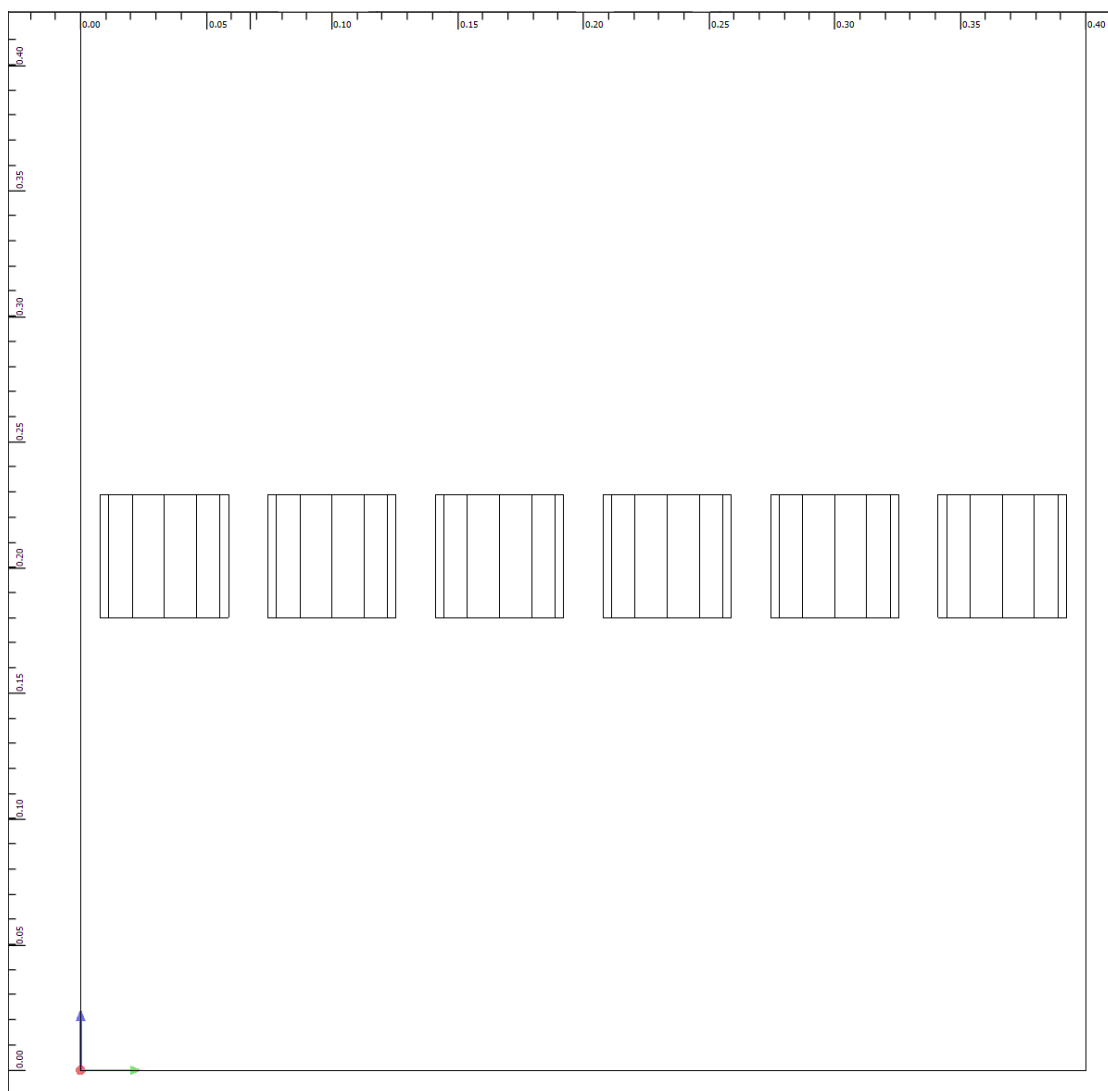


ภาพประกอบที่ 9 ผลการจำลองระบบส่องสว่างด้วยโปรแกรมไดอะลักซ์



ภาพประกอบที่ 10 รูปแสดงการติดตั้งหลอดไฟด้านหน้า





ภาพประกอบที่ 11 รูปแสดงการติดตั้งหลอดไฟด้านข้าง

จากภาพประกอบที่ 9, 10 และ 11 การจำลองระบบส่องสว่างภายในห้องทดสอบ ประกอบด้วยหลอด ฮาโลเจนขนาด 35 วัตต์ จำนวน 18 หลอด โดยจัดเรียงในแนวแกน X 3 หลอด แนวแกน Y 6 หลอด โดยมีระยะห่างจากหลอดถึงพื้นที่ทดสอบ 0.18 เมตร ซึ่งเส้นการกระจายตัวของแสงภายในห้องทดสอบ มีค่า 50,000 ลักซ์, และ 60,000 ลักซ์ โดยมีค่าเฉลี่ย 50,122 ลักซ์ จากข้อกำหนดมาตรฐานระบบแสงอาทิตย์เทียม BSI จะต้องอยู่ในช่วงความเข้มแสง 27,798 ลักซ์ ถึง 51,625 ลักซ์ ดังนั้นการออกแบบห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียมนี้ จึงตรงตามข้อกำหนด ซึ่งจะใช้สวิชชิง พาวเวอร์ซัพพลาย ขนาดแรงดันไฟฟ้า 12V จ่ายกระแสสูงสุด 100 แอมแปร์ เพื่อจ่ายไฟ

ให้แก่หลอดฮาโลเจน และมีการตรวจจับอุณหภูมิภายในห้องทดสอบบริเวณตรงกลางด้านข้างทั้งสองด้าน โดยให้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิยกสูงขึ้นจากพื้นที่ทดสอบ 2.5 เซนติเมตร

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.2.1 อุปกรณ์วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า

มัลติมิเตอร์ (Multimeter) เกิดจากคำ 2 คำผสมกัน นั่นคือ Multi ซึ่งแปลว่า หลากหลาย, มากมาย และ Meter หมายถึง เครื่องวัด เมื่อนำทั้งสองคำมารวมกันจึงหมายถึง เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดได้หลายค่า เช่น แรงดัน (Voltage) กระแส (Current) ความต้านทาน (Resistance)



ภาพประกอบที่ 12 มัลติมิเตอร์ [92]

#### 3.2.2 ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคป (Cathode ray oscilloscope) คือ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า ที่ตามนุษย์เราไม่สามารถมองเห็นแสดงผลของสัญญาณไฟฟ้าออกมาเป็นลักษณะของกราฟผ่านหลอดภาพที่โดยออสซิลโลสโคปนั้นสามารถใช้สำหรับวัดค่าต่างๆ ได้ทั้งแรงดันของไฟฟ้า ความถี่และเฟสของสัญญาณซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้วัดค่าแรงดันเทียบกับคาบเวลา ออสซิลโลสโคปใช้หลักการในการเบี่ยงเบนไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยแคโทด ที่ปลายข้างหนึ่งเพื่อยิง อิเล็กตรอน ที่ยิงปลายอีกข้าง เมื่อ เครื่องออสซิลโลสโคปรับสัญญาณ ก็จะเร่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อแสดงผลของสัญญาณที่ได้รับแล้วเครื่องจะแสดงผลที่หน้าจอได้อย่างไร แบ่งหลักการทำงานออกเป็น 2 ภาค คือ 1. การเบี่ยงเบนสัญญาณทางแนวตั้ง (Vertical deflection) เมื่อป้อนข้อมูลสัญญาณไฟฟ้า ข้อมูลจะถูกส่งไปยังวงจรถอดทอนสัญญาณ ทำให้มีสัญญาณเล็กลง จากนั้นจึงส่งไปยังวงจรถยาย ผ่านไปยังแผ่นเพลต เบี่ยงเบนทางแนวตั้งเพื่อสร้างการเบี่ยงเบนอิเล็กตรอนในแนวตั้ง 2. การเบี่ยงเบนสัญญาณทางแนวนอน (Horizontal deflection) Time base generator จะผลิตสัญญาณรูปฟันเลื่อย



สัญญาณจะถูกป้อนไปยังแผ่นเบี่ยงเบนแนวนอน ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของอิเล็กตรอนในแนวนอน



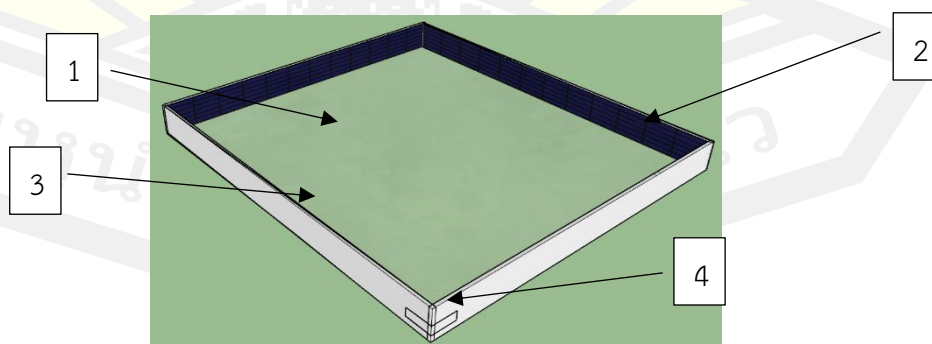
ภาพประกอบที่ 13 ออสซิลโลสโคป [93]

### 3.3 การออกแบบโซล่าเซลล์โปร่งแสง(TLSCs)

การออกแบบโซล่าเซลล์โปร่งแสง จำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างกริดอย่างเป็นระบบ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้จัดทำระบบการเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าของกริดแบบอนุกรม แล้วจึงนำแต่ละกริดมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมต่อไปเรื่อยๆ ตามความเหมาะสม

#### 3.3.1 โครงสร้างของโซล่าเซลล์โปร่งแสง

การออกแบบโครงสร้างโซล่าเซลล์โปร่งแสง ซึ่งจะมีการออกแบบให้มีลักษณะเป็น บล็อกทรงสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง x ยาว x สูง 5x5x1.8 เซนติเมตร โดยมีโซล่าเซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ติดอยู่บริเวณขอบของโซล่าเซลล์โปร่งแสง ดังภาพประกอบที่ 14



ภาพประกอบที่ 14 การออกแบบโครงสร้างโซล่าเซลล์โปร่งแสง

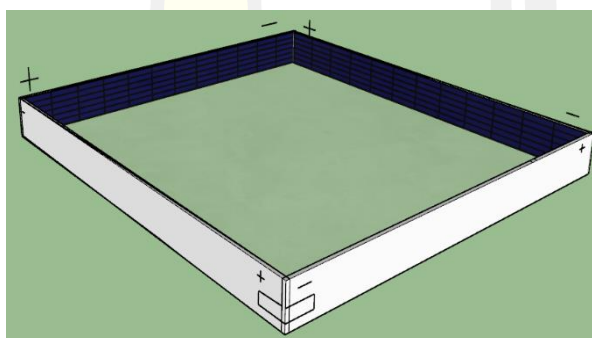
โดยวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโซล่าเซลล์โปร่งแสงประกอบด้วย

1. สารละลายเกลือสินเธาว์(NaCl)
2. โซล่าเซลล์หรือเซลล์ไฟฟ้าชนิดโพลีคริสตัลไลน์
3. โพลีเมทิลเมทาคริเลต
4. แทบบิงไวร์ (tabbing wire)

สารละลายเกลือสินเธาว์หรือโซเดียมคลอไรด์ จะนำเกลือสินเธาว์มาทำละลายกับน้ำกลั่น ให้ได้ความเข้มข้นที่ 36% เพื่อใช้ในการออกแบบโซล่าเซลล์โปร่งแสง

### 3.3.2 การออกแบบระบบเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าภายในกริด

เมื่อได้ทำการออกแบบโครงสร้างของโซล่าเซลล์โปร่งแสงเสร็จ จะออกแบบระบบเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าภายในกริด ซึ่งเชื่อมต่อในรูปแบบอนุกรมโดยใช้แทบบิงไวร์ในการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ไฟฟ้า เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น ดังภาพประกอบที่ 15



ภาพประกอบที่ 15 การออกแบบระบบเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าภายในกริด

การออกแบบโซล่าเซลล์โปร่งแสง จะเลือกใช้โซล่าเซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ โดยมีข้อมูลต่างๆดังนี้

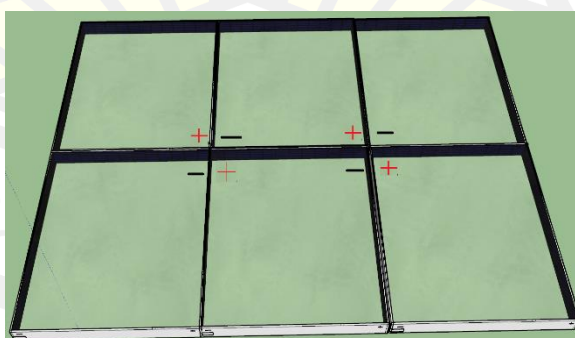
ขนาดกว้าง x ยาว	=	1.8 x 5 เซนติเมตร
แรงดันไฟฟ้า ( $V_{mp}$ )	=	0.5 โวลต์
กระแสไฟฟ้า ( $I_{mp}$ )	=	0.32 แอมแปร์
กำลังไฟฟ้า (P)	=	0.16 วัตต์

โดยหนึ่งกริดของโซล่าเซลล์โปร่งแสง จะใช้เซลล์ไฟฟ้าบริเวณขอบทั้งหมด 4ด้าน ต่ออนุกรม (Series Circuit) หรือแบบขนาน(Parallel Circuit) ตามความเหมาะสม ซึ่งจะได้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.1

$$\begin{aligned}
 \text{แรงดันไฟฟ้ารวมแบบอนุกรม (V}_S\text{)} &= V_1 + V_2 + V_3 + V_4 & 3.1 \\
 &= 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5 \\
 &= 2 \text{ โวลต์} \\
 \text{แรงดันไฟฟ้ารวมแบบขนาน (V}_P\text{)} &= V_1 = V_2 = V_3 = V_4 \\
 &= 0.5 \text{ โวลต์} \\
 \text{กระแสไฟฟ้ารวมแบบอนุกรม (I}_S\text{)} &= I_1 = I_2 = I_3 = I_4 \\
 &= 0.32 \text{ แอมแปร์} \\
 \text{กระแสไฟฟ้ารวมแบบขนาน (I}_P\text{)} &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \\
 &= 0.32 + 0.32 + 0.32 + 0.32 \\
 &= 1.28 \text{ แอมแปร์} \\
 \text{กำลังไฟฟ้า (P}_t\text{)} &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \\
 &= 0.16 + 0.16 + 0.16 + 0.16 \\
 &= 0.64 \text{ วัตต์}
 \end{aligned}$$

### 3.3.3 การเชื่อมต่อระหว่างกริด

การเชื่อมต่อระหว่างกริด จะเชื่อมต่อในรูปแบบผสม(Compound Circuit) เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับโซล่าเซลล์แบบผลึกที่บในการเปรียบเทียบและการใช้งาน อีกทั้งยังให้ง่ายต่อการตรวจเช็คเมื่อเกิดข้อผิดพลาดของกริด ดังภาพประกอบที่ 16



ภาพประกอบที่ 16 การเชื่อมต่อระหว่างกริด

การคำนวณจะเลือกเทียบกับโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ ขนาด กว้างxยาว 22 x 30 เซนติเมตร แรงดันไฟฟ้า(V) 18 โวลต์ กระแสไฟฟ้า(I) 0.56 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า(P) 10 วัตต์ ซึ่งการออกแบบโซล่าเซลล์โปร่งแสงคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.2

$$\begin{aligned}
 \text{กริดแถวทางกว้าง} &= 20 / 5 && 3.2 \\
 &= 4 \text{ กริด} \\
 \text{กริดแถวทางยาว} &= 30 / 5 \\
 &= 6 \text{ กริด} \\
 \text{จำนวนกริดทั้งหมด} &= (20 \times 30) / (5 \times 5) \text{ หรือ } (4 \times 6) \\
 &= 24 \text{ กริด} \\
 \text{จำนวนเซลล์ไฟฟ้าทั้งหมด} &= 24 \times 4 \\
 &= 96 \text{ เซลล์}
 \end{aligned}$$

โดยในการออกแบบจะทำการอนุกรมกริดในแถวทางยาวจำนวน 6 กริด ทั้งหมด 5 แถว แล้วจึงนำแต่ละแถวมาเชื่อมต่อกันในรูปแบบขนาน จะได้แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 \text{แรงดันไฟฟ้า (V}_T\text{)} &= \text{แรงดันไฟฟ้าของแต่ละกริด} && 3.3 \\
 &\times \text{จำนวนของกริดในแถวทางยาว} \\
 &= 2 \times 6 \\
 &= 12 \text{ โวลต์} \\
 \text{กระแสไฟฟ้า (I}_T\text{)} &= \text{กระแสไฟฟ้าในแถวทางยาว} \\
 &\times \text{จำนวนของกริดในแถวทางกว้าง} \\
 &= 0.32 \times 4 \\
 &= 1.28 \text{ แอมแปร์}
 \end{aligned}$$

### 3.4 ผลการทดสอบโซล่าเซลล์โปร่งแสง

การทดสอบโซล่าเซลล์โปร่งแสงและโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบที่ห้องจำลองระบบแสงอาทิตย์เทียม ซึ่งจะหาค่ากระแสที่สภาวะวงจรถัด (Short Circuit Current : ISC) ส่วนจุดตัดแกนนอนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันขณะวงจรถัด (Open Circuit Voltage : VOC) เมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันก็จะได้กำลังของโซล่าเซลล์ ซึ่งต้องมีจุดเดียวเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่ากำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดทางทฤษฎี (theoretical power : PT) โดยจะทำการตรวจวัดค่า ทุกๆ 30 นาที เป็นจำนวน

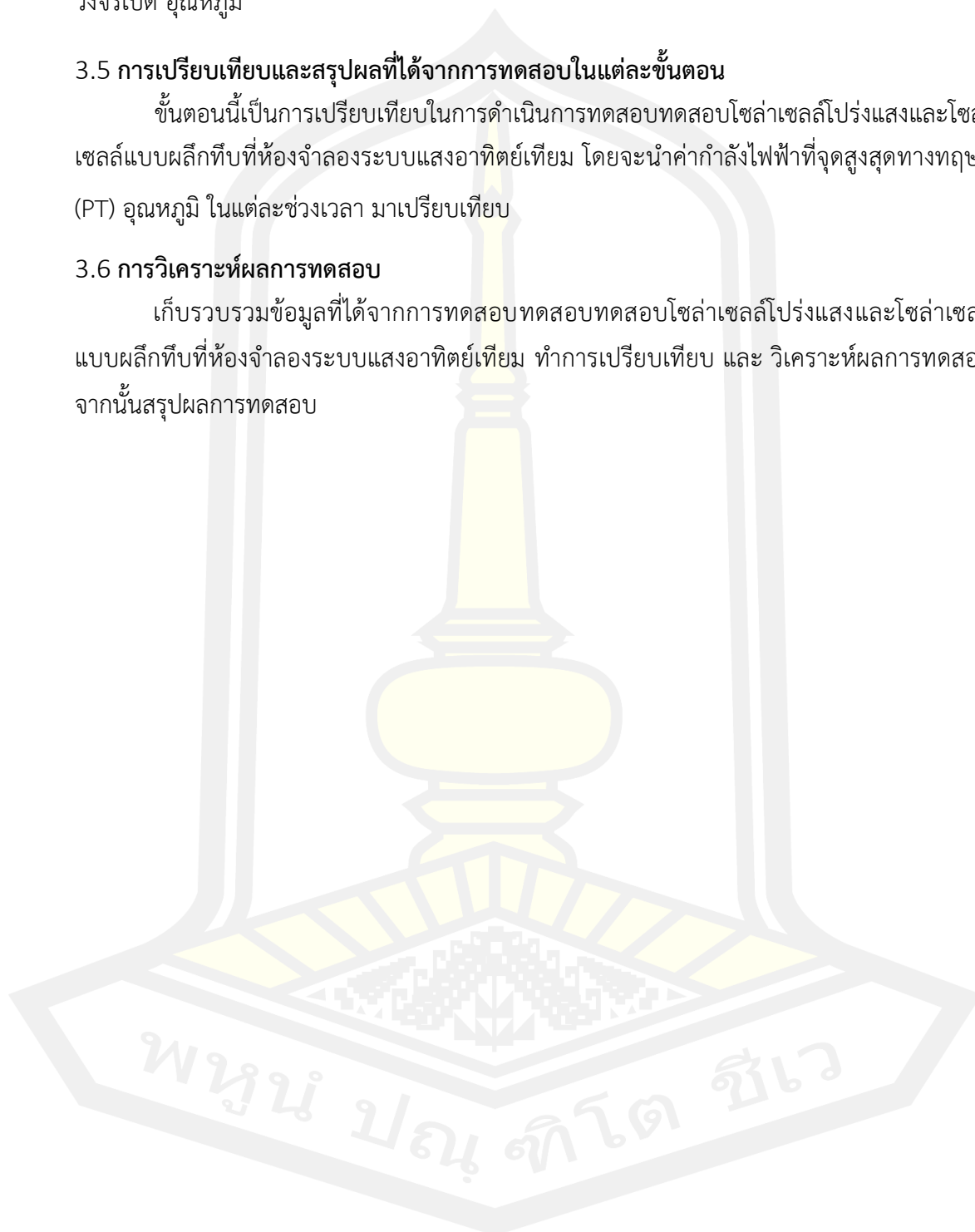
10 ครั้ง หรือเท่ากับ 300นาทีกี่ ซึ่งในการทดสอบ จะมีการวัดค่ากระแสที่สภาวะวงจรลัด แรงดันขณะ วงจรเปิด อุณหภูมิ

### 3.5 การเปรียบเทียบและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอนนี้เป็นการเปรียบเทียบในการดำเนินการทดสอบทดสอบโซล่าเซลล์โปร่งแสงและโซล่า เซลล์แบบผลึกทึบที่ห้องจำลองระบบแสงอาทิตย์เทียม โดยจะนำค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดทางทฤษฎี (PT) อุณหภูมิ ในแต่ละช่วงเวลา มาเปรียบเทียบ

### 3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทดสอบโซล่าเซลล์โปร่งแสงและโซล่าเซลล์ แบบผลึกทึบที่ห้องจำลองระบบแสงอาทิตย์เทียม ทำการเปรียบเทียบ และ วิเคราะห์ผลการทดสอบ จากนั้นสรุปผลการทดสอบ

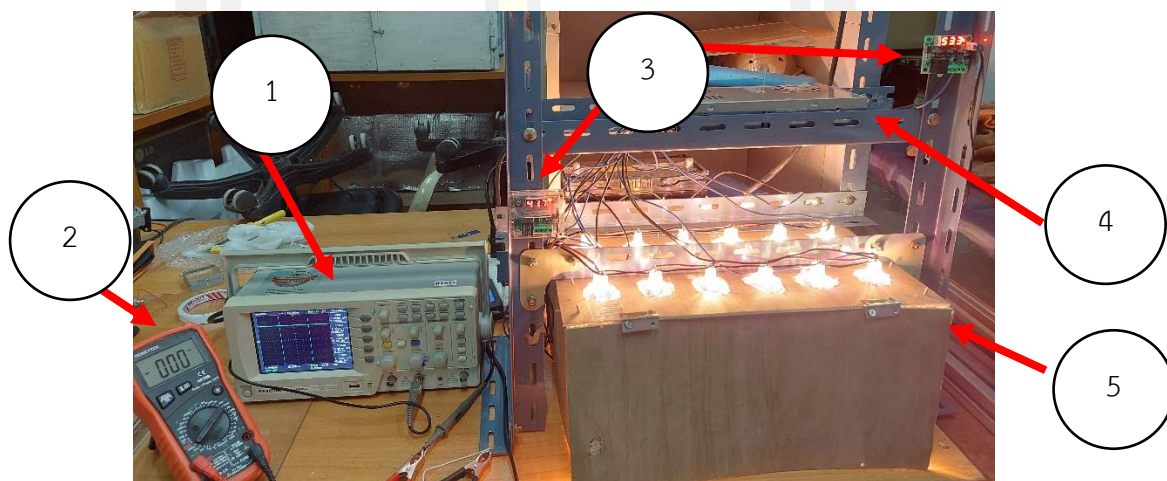


## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

เมื่อได้ทำการออกแบบโซล่าเซลล์ชนิดโปร่งแสงในบทที่ 3 แล้ว จึงได้มีการจัดสร้างโซล่าเซลล์ชนิดโปร่งแสง และห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียมขึ้นเพื่อทดสอบเก็บค่าต่างๆ ในบทนี้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลและสรุปผลดังต่อไปนี้

#### 4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม



ภาพประกอบที่ 17 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม

จากภาพประกอบที่ 17 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ประกอบด้วย

- 1) ออสซิลโลสโคป เพื่อใช้วัดแรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งออสซิลโลสโคป จะสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้หลากหลาย เช่นค่าที่ฟังก์ชัน Measure วัดได้มีดังต่อไปนี้ 1.  $V_{max}$  คือ ระดับค่าของแรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุด 2.  $V_{min}$  คือ ระดับค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด 3.  $V_{pp}$  หรือเรียกว่า Volt peak-to-peak คือค่าของแรงดันไฟฟ้าจากยอดสูงที่สุด ไปถึงต่ำที่สุด หรือ ก็คือ  $V_{max}-V_{min}$  นั่นเอง 4.  $V_{top}$  คือ  $V_{max}-Overshoot$  5.  $V_{base}$  คือ  $V_{min}-Preshoot$  6.  $V_{amp}$  คือ ค่าแรงดันแอมปริจูด หรือก็คือ  $V_{top}-V_{base}$  นั่นเอง 7.  $V_{avg}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 8.  $V_{rms}$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ แรงดันไฟฟ้าในมัลติมิเตอร์

- 2) มัลติมิเตอร์ เพื่อใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่สภาวะวงจรรัด ซึ่งมัลติมิเตอร์จะตั้งย่านวัดกระแสได้หลากหลาย โดยในการทดสอบจะตั้งย่านวัดกระแสที่ย่าน 2 แอมแปร์
- 3) เทอร์โมมิเตอร์ จะติดตั้งบริเวณตรงกลางของด้านข้างทั้ง 2 ด้าน โดยจะให้เซ็นเซอร์ลอยห่างจากพื้นที่ทดสอบ 2.5 เซนติเมตร ทำการวัดทั้ง 2 ฝั่งแล้วจึงนำมาเฉลี่ย
- 4) สวิตซ์িং พาวเวอร์ซัพพลาย เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายไฟให้กับหลอดไฟในห้องทดลอง ขนาด 12 โวลต์ 100 แอมแปร์
- 5) ห้องทดสอบระบบ ซึ่งห้องทดสอบมีขนาด กว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.40 เมตร ระยะห่างจากหลอดไฟถึงพื้นที่ทดสอบ 0.18 เมตร จะใช้ผนัง ด้านข้าง ด้านหน้า ด้านบน เป็นไม้อัดความหนา 5 มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กฉากเป็นตัวยึดโครงสร้างเพื่อให้มีความแข็งแรง

#### 4.2 ส่วนประกอบและวิธีการสร้างโซล่าเซลล์โปร่งแสง

การเตรียมโซล่าเซลล์โปร่งแสงจะเริ่มจากการประกอบโพลีเมทิลเมทาคริเลต ให้เป็นลูกบาศก์ ขนาดกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 5x5x1.8 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 18



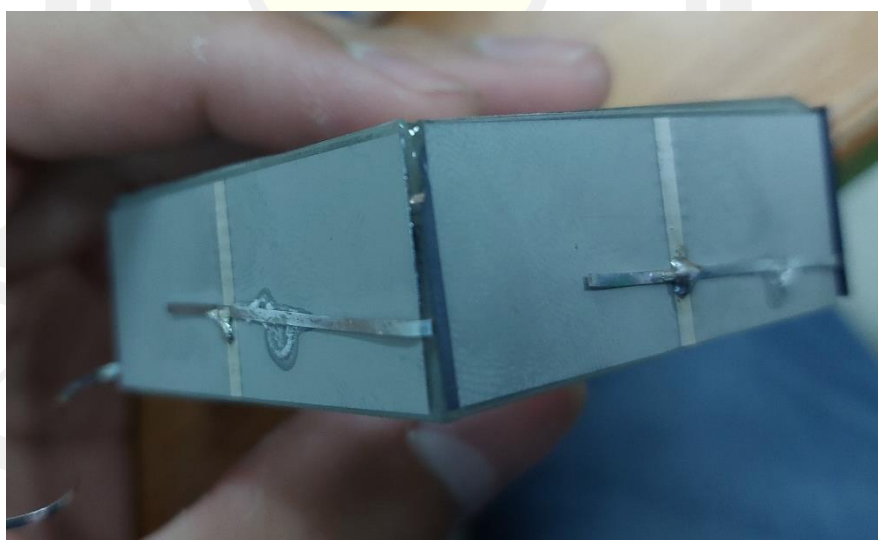
ภาพประกอบที่ 18 แสดงกริดของโซล่าเซลล์โปร่งแสงหลังจากประกอบโพลีเมทิลเมทาคริเลต

หลังจากประกอบโพลีเมทิลเมทาคริเลตให้เป็นกริดโซล่าเซลล์โปร่งแสงแล้วจะทำการเติมน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 36% เข้าไปภายในกริด โดยการเจาะรูแล้วใช้เข็มในการลำเลียงเข้าไปภายในเมื่อเต็มแล้ว จะทำการปิดรู ดังแสดงในภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบที่ 19 แสดงการเติมน้ำเกลือความเข้มข้น 36% เข้าไปภายในกริด

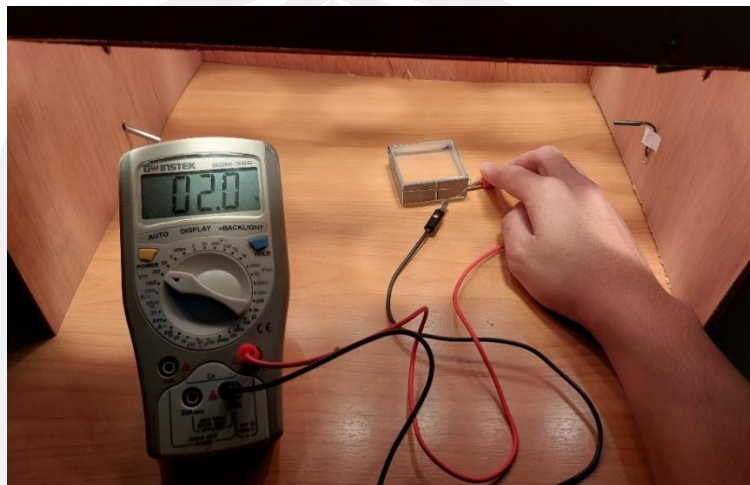
จากนั้นจะทำการติดตั้งเซลล์ไฟฟ้าบริเวณขอบทั้ง 4 ด้านของกริด ซึ่งจะเชื่อมต่อเซลล์แต่ละเซลล์ด้วยแทปปีงไวร์ โดยจะทำการบัดกรีด้วยตะกั่ว ในรูปแบบอนุกรม ดังแสดงภาพประกอบที่ 20



ภาพประกอบที่ 20 แสดงการเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าในกริดด้วยแทปปีงไวร์และตะกั่ว



เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้ จะได้กริดของโซลาร์เซลล์โปร่งแสงออกมา หลังจากนั้นจะทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเบื้องต้น เพื่อตรวจสอบหากเกิดข้อผิดพลาด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 21



ภาพประกอบที่ 21 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเบื้องต้นของกริดเซลล์โปร่งแสง

จากนั้นจะทำการสร้างกริดโซลาร์เซลล์โปร่งแสง ให้ได้ทั้งสิ้น 24 กริด และจะทำการเชื่อมต่อกริดในแถวทางยาว 6 กริด ในรูปแบบอนุกรม จำนวน 4 แถว แล้วจึงนำแต่ละแถวมาเชื่อมต่อกันในรูปแบบขนาน จะได้โซลาร์เซลล์โปร่งแสง ขนาด 30 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 22

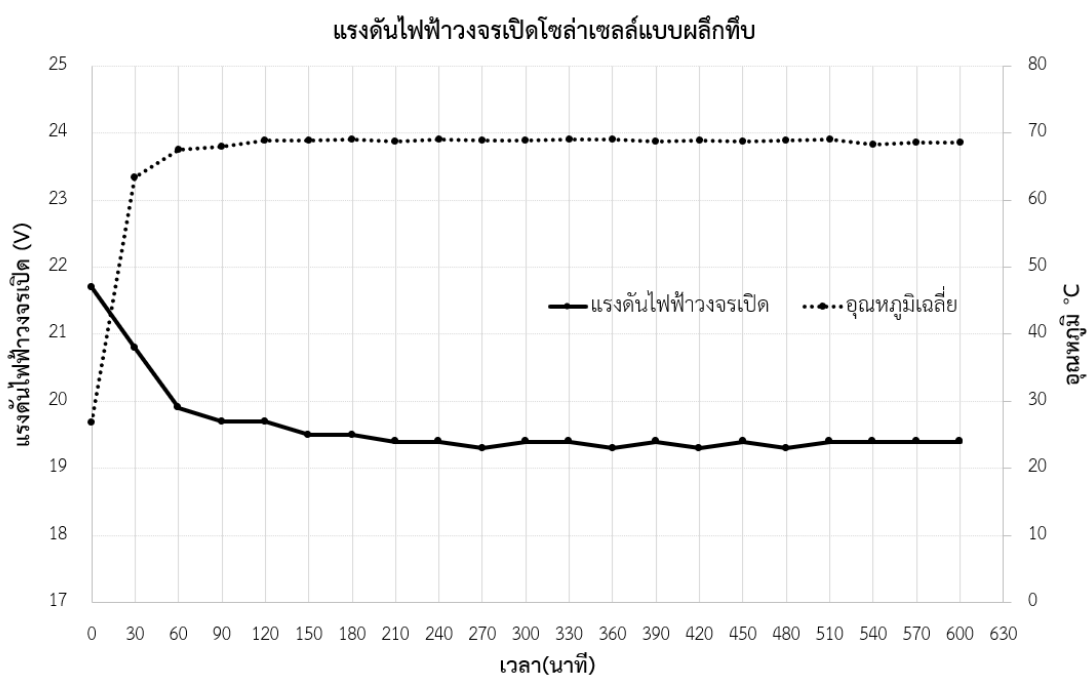


ภาพประกอบที่ 22 แสดงโซลาร์เซลล์โปร่งแสง

### 4.3 ผลการทดสอบโซล่าเซลล์ผลึกทึบ

#### 4.3.1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของโซล่าเซลล์ผลึกทึบ

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ ทุก 30 นาที โดยใช้ ออสซิลโลสโคป ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิของห้องทดสอบ ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ผลการทดสอบ แสดงดัง ภาพประกอบที่ 23

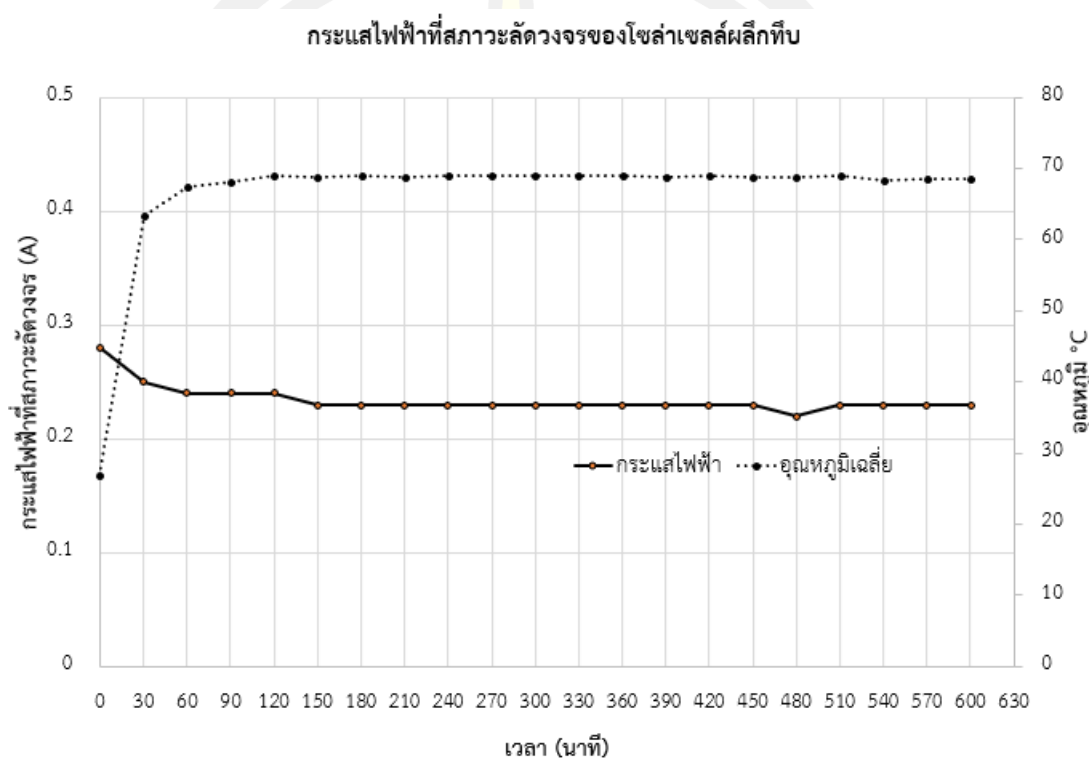


ภาพประกอบที่ 23 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของโซล่าเซลล์ผลึกทึบ

จากภาพประกอบที่ 23 จะเห็นได้ว่า แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ มีค่าสูงสุด 21.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง หรือ 26 องศา และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตรงตามงานวิจัย ทรงศักดิ์ พงษ์ศิริชัย, SWU Sci. J. Vol 33 No. 2 (2017) โดยจะมีแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิกงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที จนถึง 600 นาที

#### 4.3.2 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ

การทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) ของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ จะเก็บค่าด้วยมัลติมิเตอร์ ที่ย่านการวัด 2 แอมแปร์ และเก็บค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ทุก 30 นาที ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในภาพประกอบที่ 24

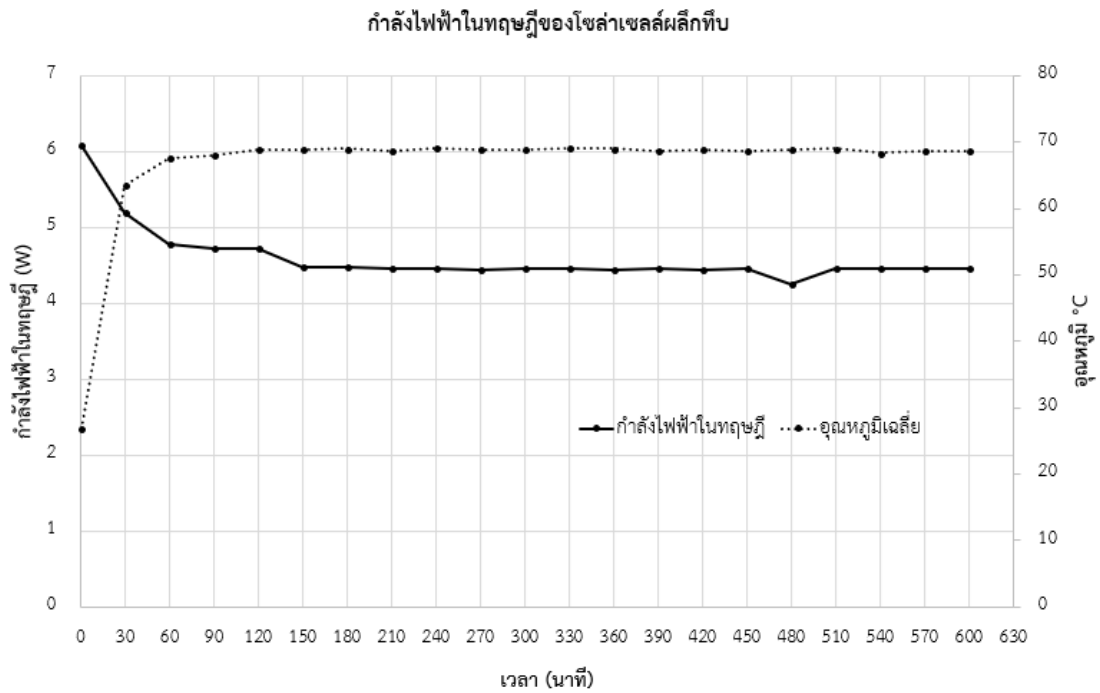


ภาพประกอบที่ 24 แสดงกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ

จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบมีค่าต่ำลง โดยมีค่ากระแสสูงสุดอยู่ที่ 0.28 แอมแปร์ เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที อุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรก็จะคงที่

#### 4.3.3 กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎี (theoretical power; PT) จะหาได้จาก แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Voc) คูณด้วยกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 25



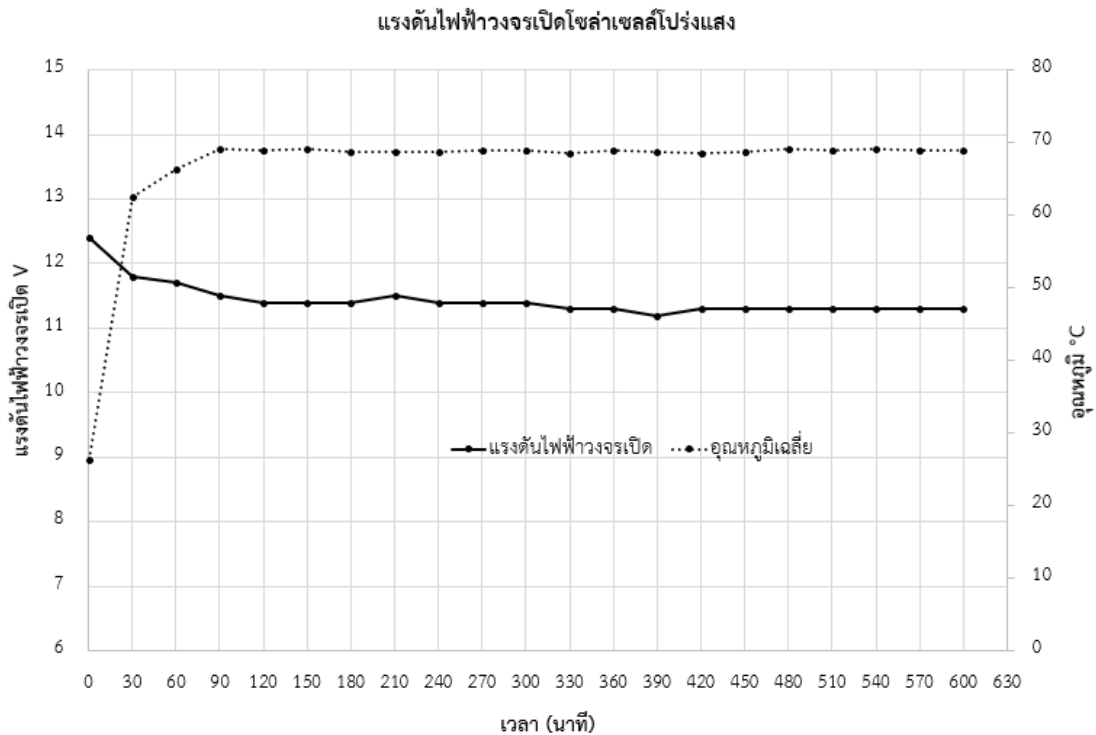
ภาพประกอบที่ 25 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซล่าเซลล์ผลึกทึบ

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ จะเป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณโดยการใช้แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด คุณกับกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร

#### 4.4 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของโซล่าเซลล์โปร่งแสง

##### 4.4.1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของโซล่าเซลล์โปร่งแสง

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของโซล่าเซลล์แบบโปร่งแสง ทุก 30 นาที โดยใช้ ออสซิลโลสโคป ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิของห้องทดสอบ ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ผลการทดสอบแสดงดัง ภาพประกอบที่ 26

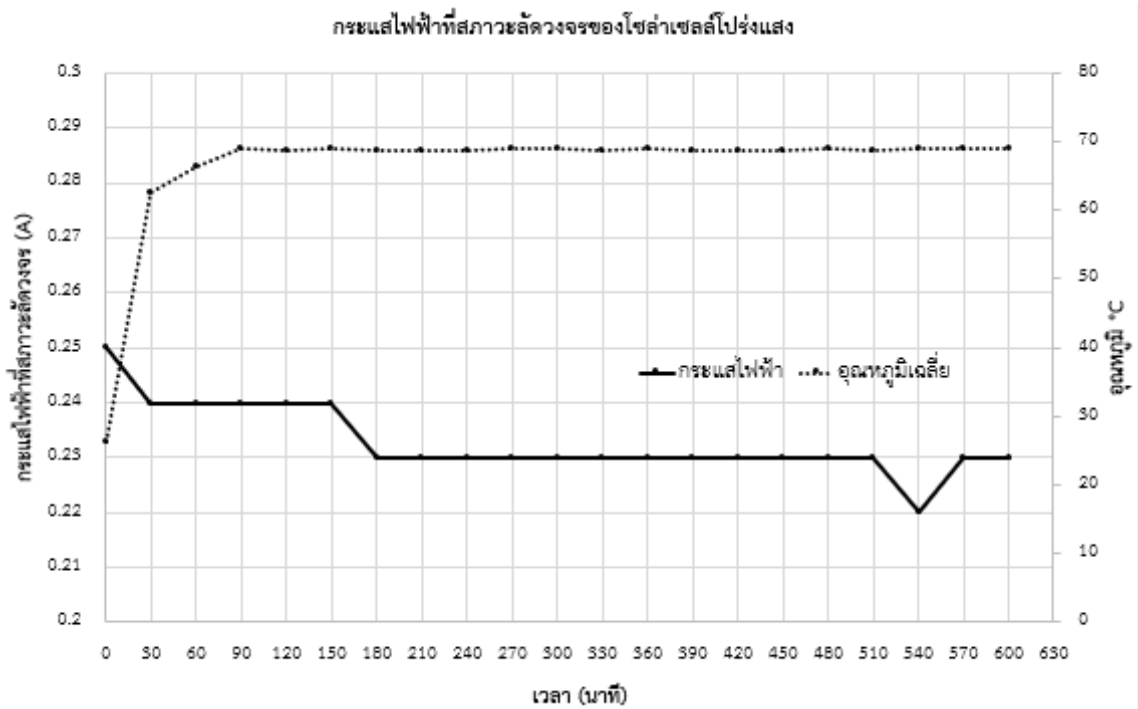


ภาพประกอบที่ 26 แสดงแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด โซล่าเซลล์โปร่งแสง

จากภาพประกอบที่ 26 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของโซล่าเซลล์โปร่งแสงจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเริ่มต้นหรืออุณหภูมิห้อง และจะลดลงมาประมาณ 1 โวลต์ หรือลดลงมาประมาณ 8 % เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.4.2 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรของโซล่าเซลล์โปร่งแสง

การทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) ของโซล่าเซลล์โปร่งแสง จะเก็บค่าด้วยมัลติมิเตอร์ ที่ย่านการวัด 2 แอมแปร์ และเก็บค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ทุก 30 นาที ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในภาพประกอบที่ 27

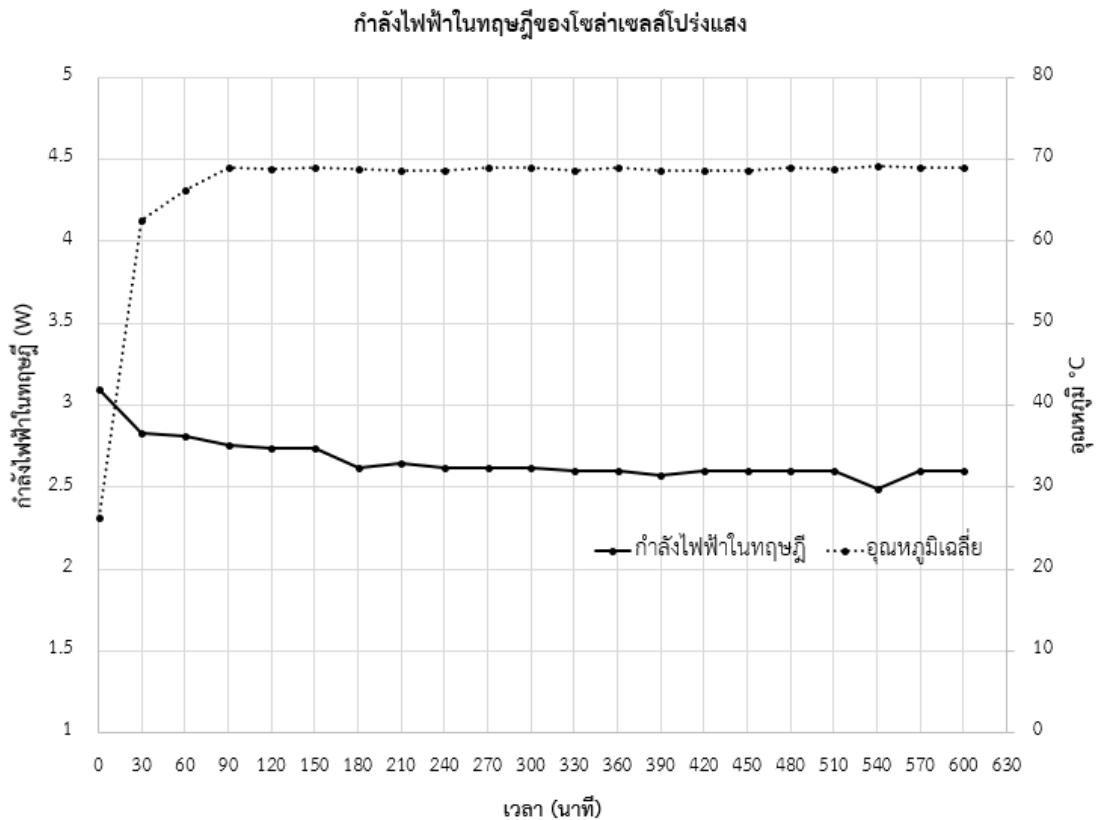


ภาพประกอบที่ 27 แสดงกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรของโซลาร์เซลล์โปร่งแสง

จากภาพประกอบที่ 27 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรสูงสุดของโซลาร์เซลล์โปร่งแสงมีค่าอยู่ที่ 0.25 แอมแปร์ และจะลดลงประมาณ 0.01 แอมแปร์ ถึง 0.03 แอมแปร์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.4.3 กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซลาร์เซลล์โปร่งแสง

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎี (theoretical power;  $P_T$ ) จะหาได้จาก แรงดันไฟฟ้าวงจเปิด ( $V_{oc}$ ) คูณด้วยกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 28



ภาพประกอบที่ 28 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซล่าเซลล์โปร่งแสง

จากภาพประกอบที่ 28 กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีของโซล่าเซลล์แบบโปร่งแสง จะเป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณโดยการใช้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด คูณกับกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร

#### 4.5 การใช้งานร่วมกันของโซล่าเซลล์แบบผลึกทีบและโซล่าเซลล์โปร่งแสง

การใช้งานร่วมกันของโซล่าเซลล์ทั้ง 2 ชนิด จะทำโดยการใช้โซล่าเซลล์โปร่งแสงวางทับโซล่าเซลล์ผลึกทีบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 29 และจะทำการทดสอบ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด กระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร กำลังไฟฟ้าในทฤษฎี โดยจะทำการเชื่อมต่อกันในรูปแบบ อนุกรม และแบบขนาน

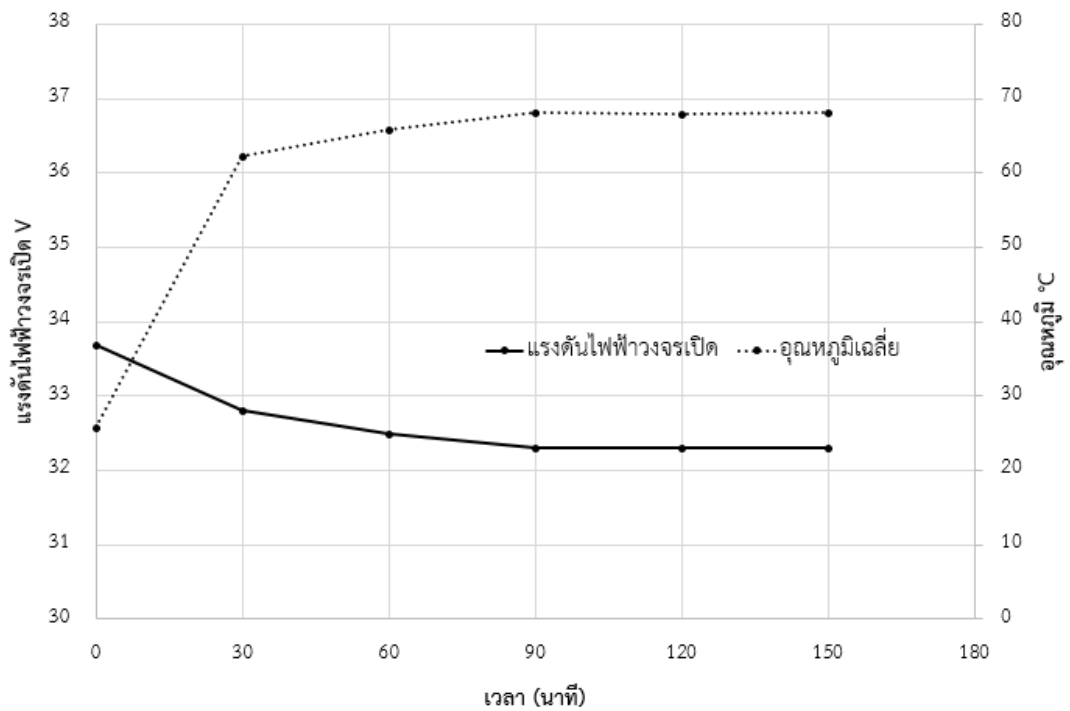


ภาพประกอบที่ 29 แสดงการใช้งานร่วมกันของโซล่าเซลล์โปร่งแสงและโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ

#### 4.5.1 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิด ทุก 30 นาที โดยใช้ข้อสซิลโลสโคป ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิของห้องทดสอบ ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ผลการทดสอบแสดงดัง ภาพประกอบที่ 30

แรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม



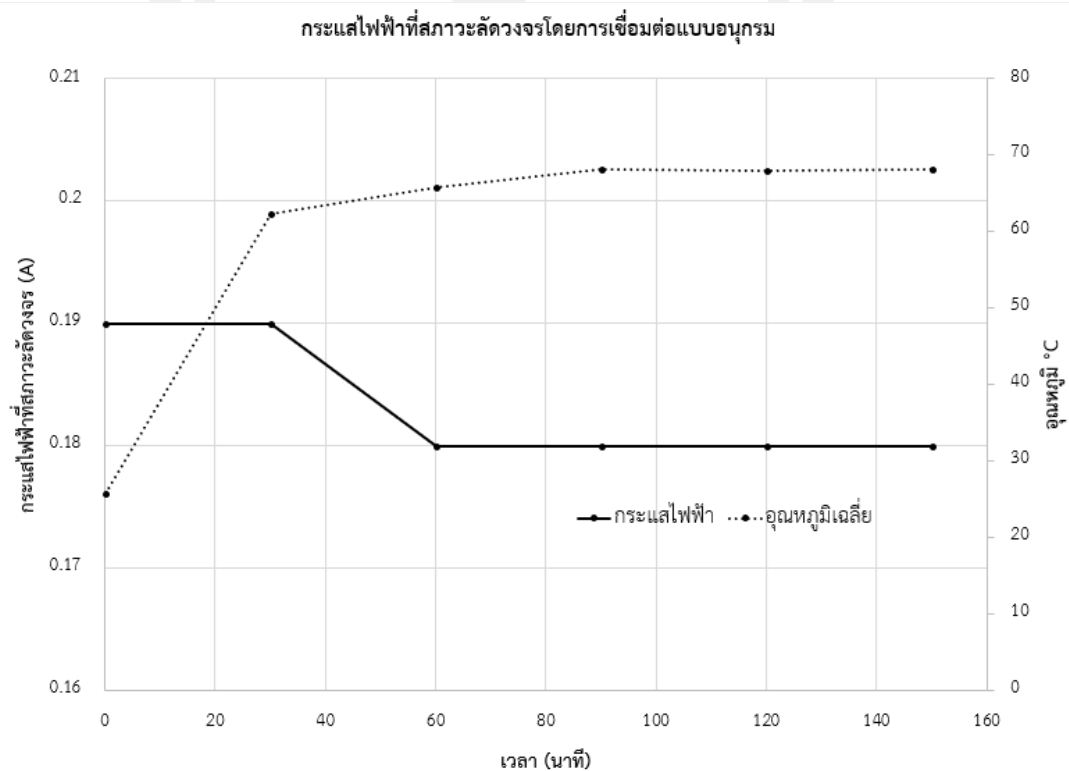
ภาพประกอบที่ 30 แสดงแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดหลังการเชื่อมต่อโซล่าเซลล์ทั้ง 2 ชนิด แบบอนุกรม



จากภาพประกอบที่ 30 จะเห็นได้ว่าเมื่อเชื่อมต่อโซลาร์เซลล์ทั้ง 2 ชนิดแล้ว แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 33.7 โวลต์ เมื่อเวลาถึงนาทีที่ 90 อุณหภูมิ และ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด มีค่าคงที่

#### 4.5.2 การทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

การทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) จะเก็บค่าด้วยมัลติมิเตอร์ ที่ย่านการ วัด 2 แอมแปร์ และเก็บค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ทุก 30 นาที ซึ่งผลการทดลองจะ แสดงในภาพประกอบที่ 31



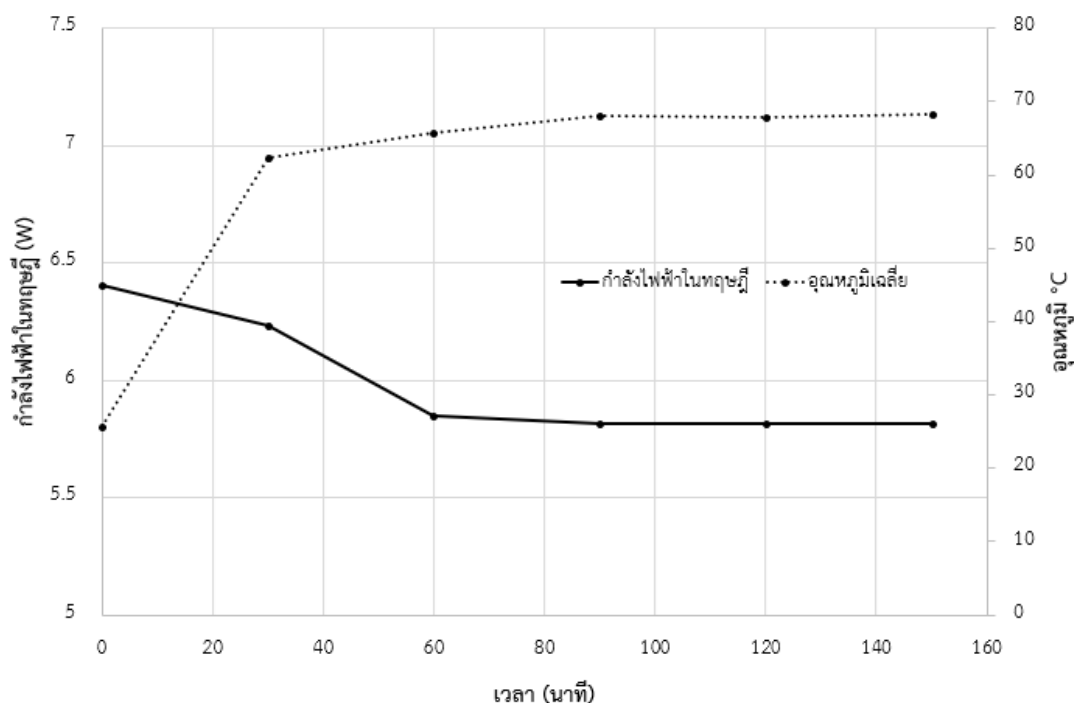
ภาพประกอบที่ 31 แสดงผลทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

การใช้งานร่วมกันระหว่างโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบและโซล่าเซลล์โปร่งแสง ค่ากระแสมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น หลังผ่านไป 60 นาที

#### 4.5.3 กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎี (theoretical power; PT) จะหาได้จาก แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (Voc) คูณด้วยกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 32

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีโดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

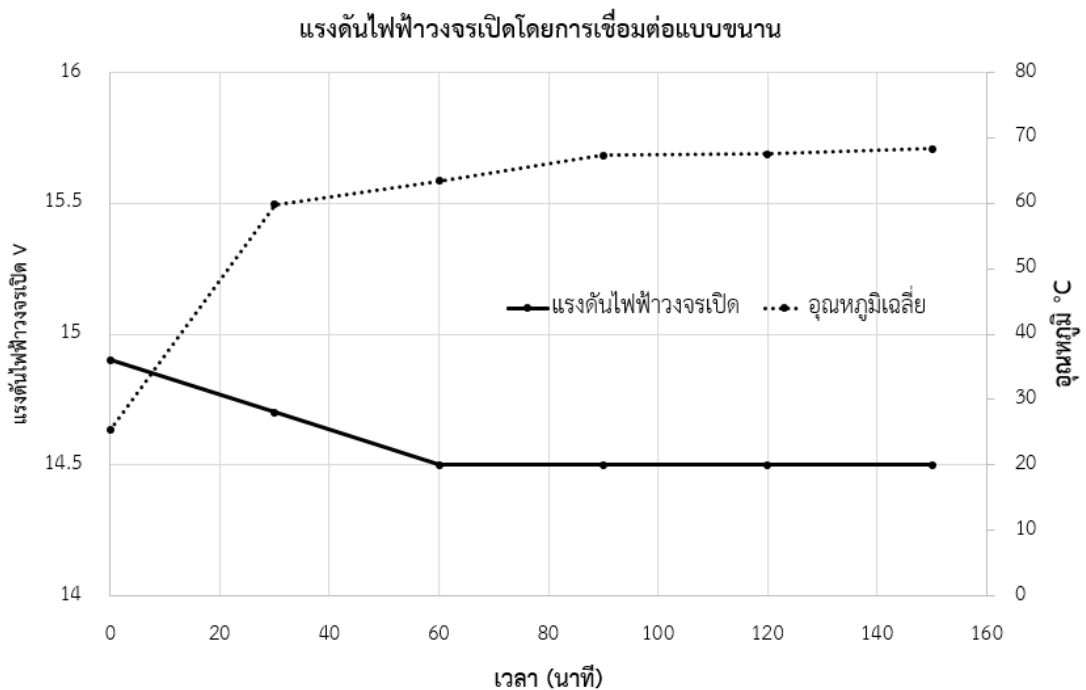


ภาพประกอบที่ 32 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

จากภาพประกอบที่ 32 กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม จะเป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณโดยใช้แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด คูณกับกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร

#### 4.5.4 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ทุก 30 นาที โดยใช้ออสซิลโลสโคป ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิของห้องทดสอบ ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ผลการทดสอบแสดงดัง ภาพประกอบที่ 33



ภาพประกอบที่ 33 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน

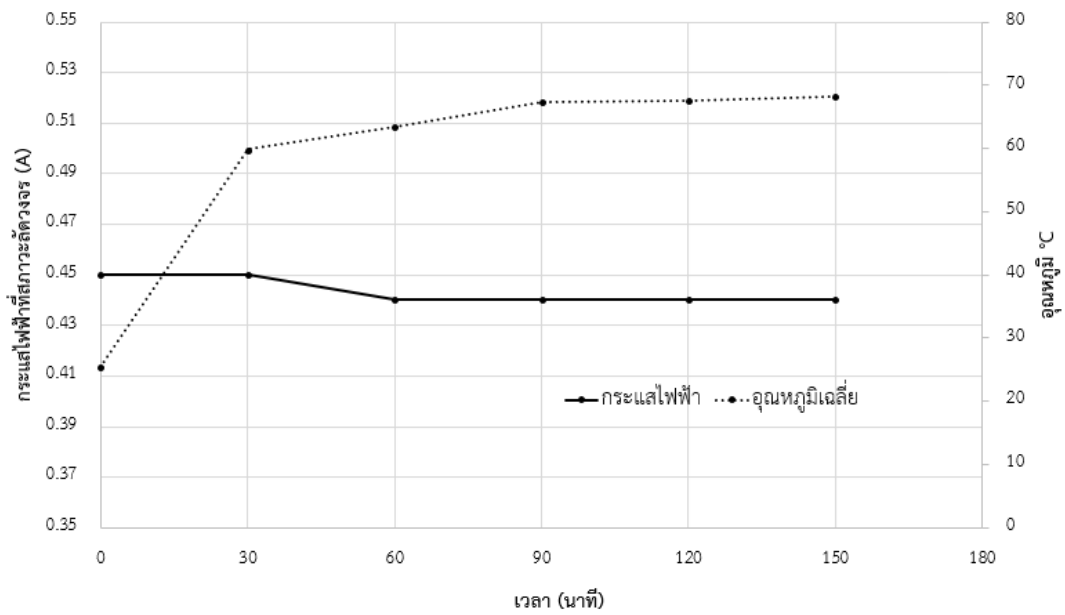
จากภาพประกอบที่ 33 แสดงแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน มีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลง และจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที

#### 4.5.5 การทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน

การทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) จะเก็บค่าด้วยมัลติมิเตอร์ ที่ย่านการวัด 2 แอมแปร์ และเก็บค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ทุก 30 นาที ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในภาพประกอบที่ 34

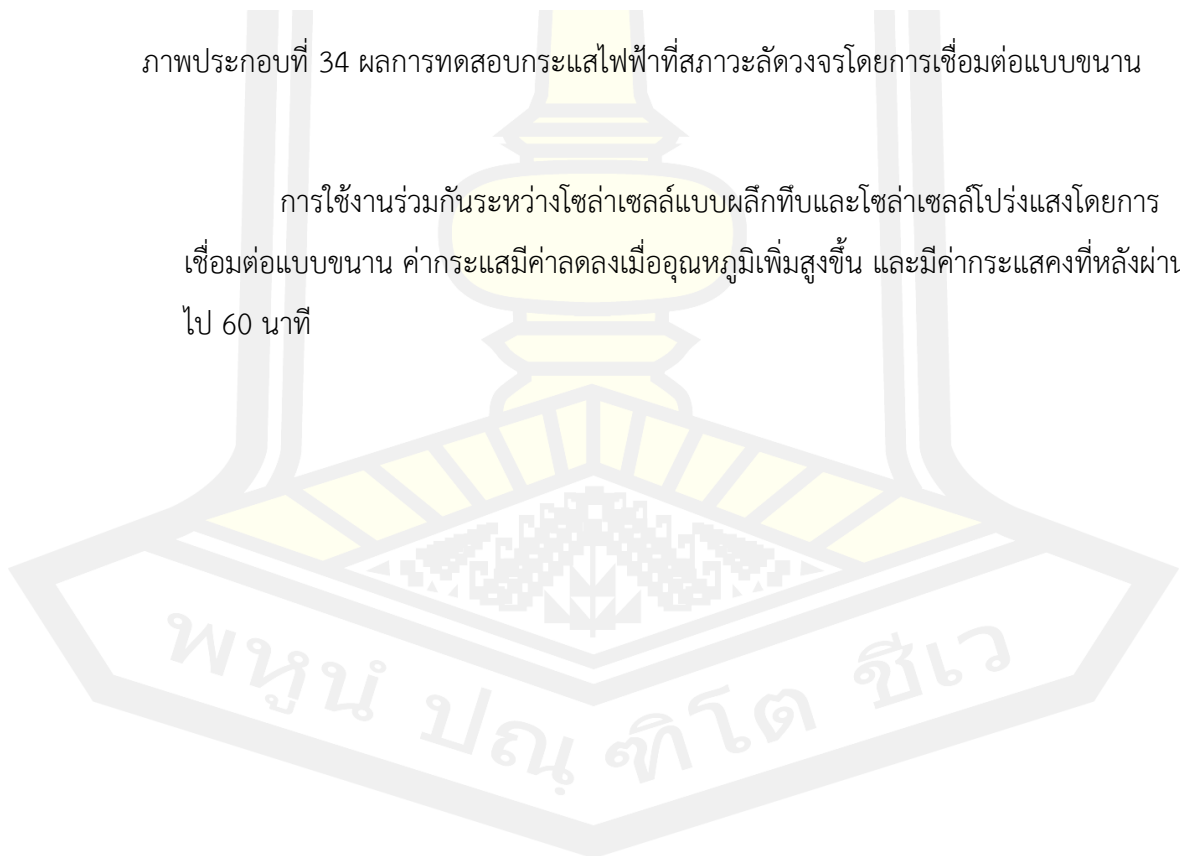
พหุบัณฑิต ชีวะ

กระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน



ภาพประกอบที่ 34 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน

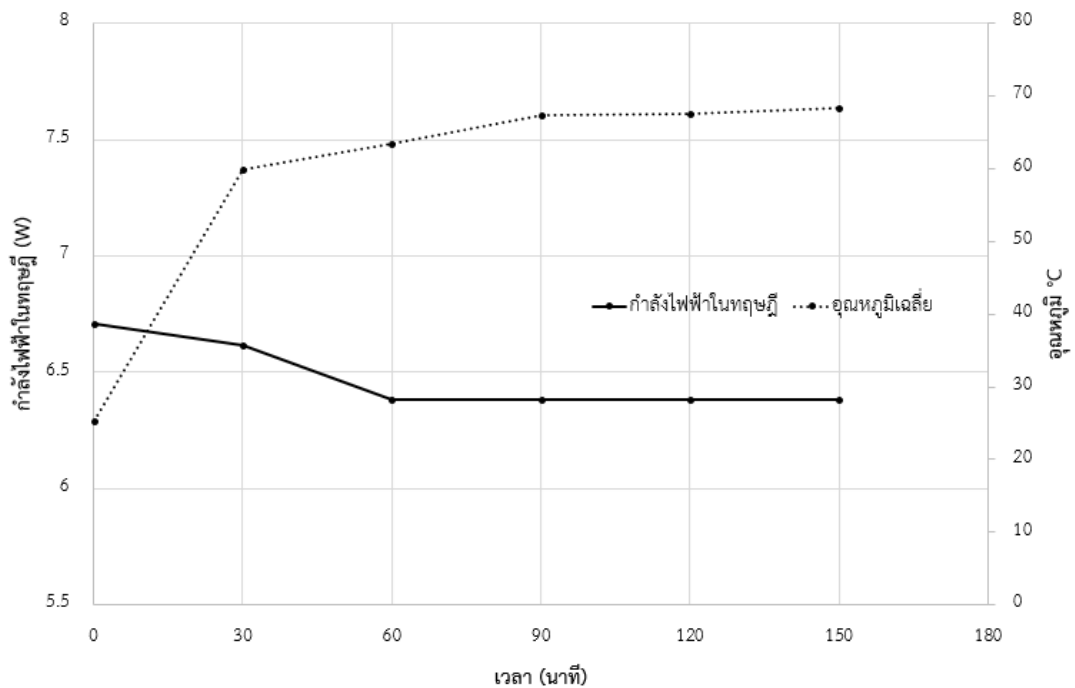
การใช้งานร่วมกันระหว่างโซลาร์เซลล์แบบฟลิกทีบและโซลาร์เซลล์โปร่งแสงโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน ค่ากระแสมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และมีค่ากระแสคงที่หลังจากผ่านไป 60 นาที



#### 4.5.6 กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎี (theoretical power; PT) จะหาได้จาก แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Voc) คูณด้วยกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 35

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีโดยการเชื่อมต่อแบบขนาน



ภาพประกอบที่ 35 แสดงกำลังไฟฟ้าในทฤษฎีการเชื่อมต่อแบบขนาน

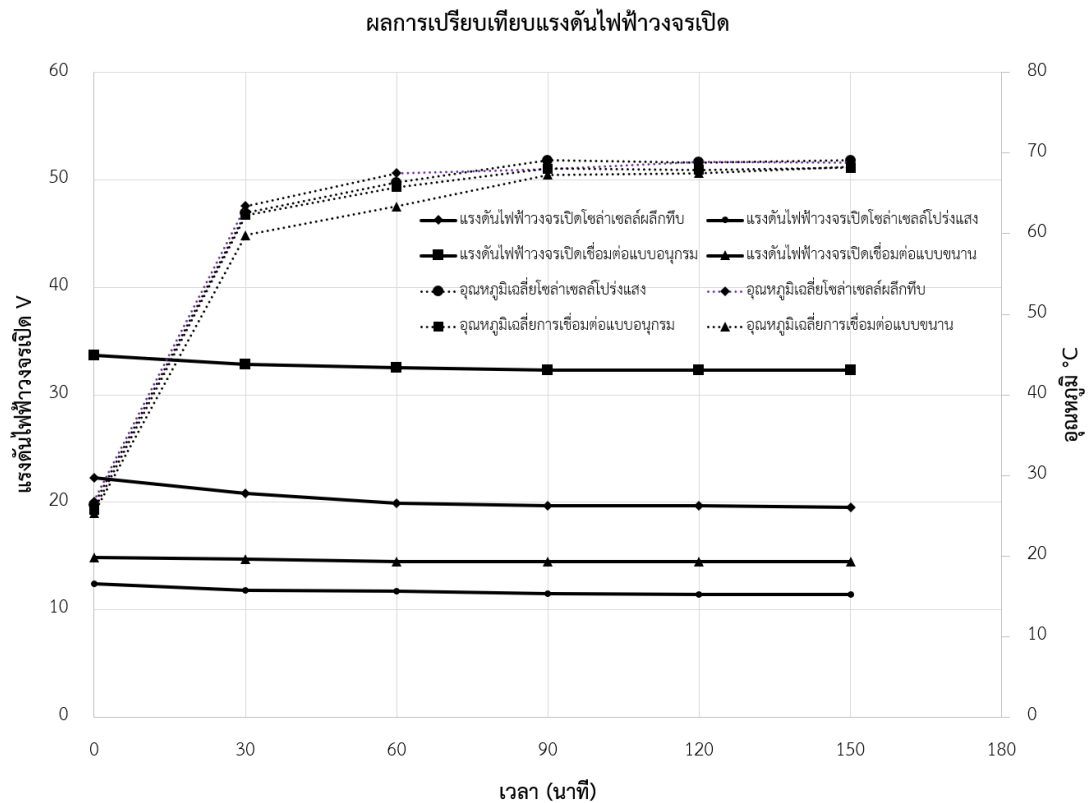
จากภาพประกอบที่ 35 กำลังไฟฟ้าในทฤษฎีการเชื่อมต่อแบบขนาน จะเป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณโดยใช้แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด คูณกับกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร

#### 4.6 ผลการเปรียบเทียบ โซลาร์เซลล์ผลึกทึบ โซลาร์เซลล์โปร่งแสง และการเชื่อมต่อร่วมกัน

หลังจากได้ผลการทดสอบของทั้งโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ โซลาร์เซลล์โปร่งแสง และการเชื่อมต่อร่วมกันแล้ว จะนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบ ดังต่อไปนี้

#### 4.6.1 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

จะนำค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่ได้ จาก 0 นาที ถึง 150 นาที เนื่องจากอุณหภูมิ และค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่แล้ว นำมาแสดงดังภาพประกอบที่ 36

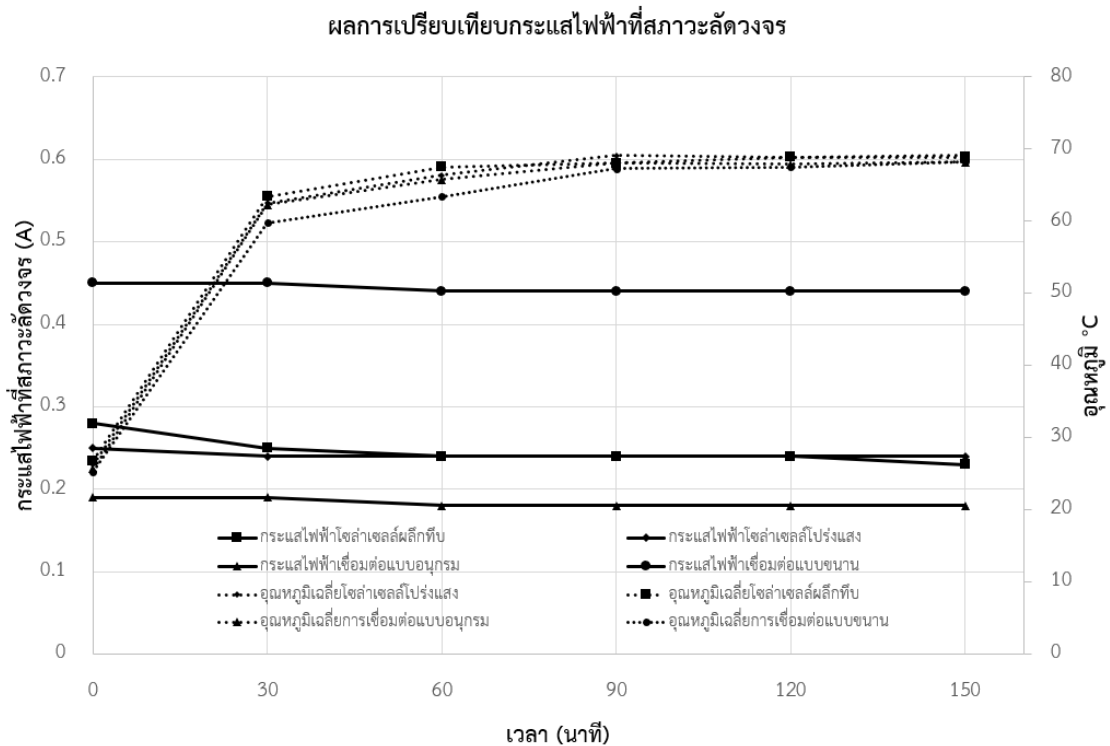


ภาพประกอบที่ 36 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

จากภาพประกอบที่ 36 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ได้แรงดันไฟฟ้ามากที่สุด และรองลงมาคือ แรงดันไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ แรงดันไฟฟ้าการเชื่อมต่อแบบขนาน แรงดันไฟฟ้าโซลาร์เซลล์โปร่งแสง ตามลำดับ

#### 4.6.2 ผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร

จะนำค่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรที่ได้ จาก 0 นาที ถึง 150 นาที เนื่องจาก อุณหภูมิและค่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจรมีค่าคงที่แล้ว นำมาแสดงดังภาพประกอบที่ 37

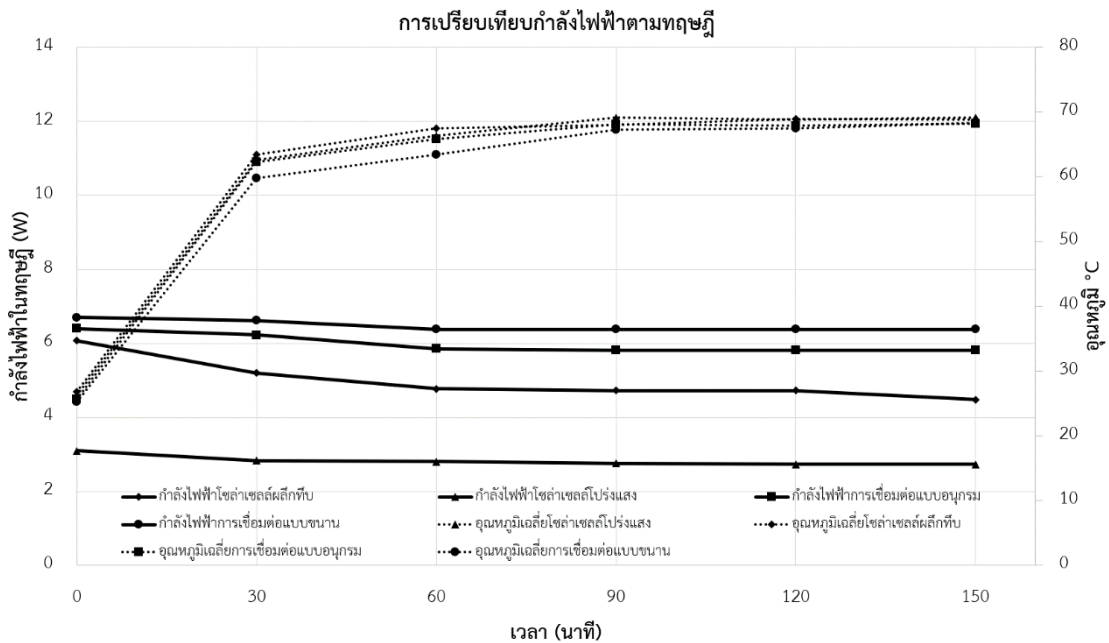


ภาพประกอบที่ 37 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร

จากภาพประกอบที่ 37 แสดงผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร โดย กระแสไฟฟ้าของการเชื่อมต่อกันแบบขนานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือกระแสไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ กระแสไฟฟ้าโซลาร์เซลล์โปร่งแสง และกระแสไฟฟ้าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ตามลำดับ

#### 4.6.3 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าตามทฤษฎี

กำลังไฟฟ้าในทฤษฎี (theoretical power; PT) จะหาได้จาก แรงดันไฟฟ้าวงจรมีเปิด (Voc) คูณด้วยกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (Isc) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 38



ภาพประกอบที่ 38 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าตามทฤษฎี

พบว่ากำลังไฟฟ้าการเชื่อมต่อแบบขนานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือกำลังไฟฟ้าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม กำลังไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ผลึกทึบ และกำลังไฟฟ้าโซลาร์เซลล์โปร่งแสง ตามลำดับ

พหุ ประถมศึกษา



## บทที่ 5

### สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาโซล่าเซลล์โปร่งแสงด้วยเกลือสินเธาว์ร่วมกับโพลีเมทิลเมทาคริเลต เพื่อลดข้อจำกัดของโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ และให้สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในด้านอื่นๆ

2. โซล่าเซลล์โปร่งแสงที่จัดสร้างขึ้นเป็นไปตามการออกแบบโดยสมบูรณ์ ซึ่งมีส่วนประกอบทั้งหมดได้แก่ เซลล์ไฟฟ้า 96 เซลล์ กริดโซล่าเซลล์โปร่งแสง 24 กริด โพลีเมทิลเมทาคริเลตขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตรหนา 5 มิลลิเมตร ซึ่งจากการออกแบบและคำนวณแรงดันไฟฟ้าของแต่ละกริด 2 โวลต์ กระแสไฟฟ้าในแต่ละกริด 0.16 แอมแปร์ ใช้แท็บปิงไวร์และตะกั่วในการเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้า และการออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างกริด นำโซล่าเซลล์โปร่งแสงจำนวน 6 กริด เชื่อมต่อด้วยรูปแบบอนุกรม เป็นจำนวน 4 แถว แล้วจึงนำแต่ละแถวมาเชื่อมต่อในรูปแบบขนาน

3. การออกแบบห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม ใช้การออกแบบและคำนวณผ่านโปรแกรมDIALUX ในขนาดห้องทดสอบ กว้าง 0.35 เซนติเมตร ยาว 0.40 เซนติเมตร สูง 0.50 เซนติเมตร โดยใช้หลอดชนิดฮาโลเจน ยี่ห้อ Sylvania Reflector Lamp QR51 GU/GX 5.3 + 35W/38DG จ่ายไฟด้วยสวิชชิงพาวเวอร์ซัพพลาย ขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 100 แอมแปร์ จัดเรียงในแนวกว้าง x ยาว คือ 3 x 6 หลอด ระยะห่างจากหลอดถึงพื้นที่ทดสอบ 0.18 เมตร ซึ่งมีเส้นการกระจายตัวของแสงภายในห้องทดสอบ มีค่า 50,000 ลักซ์, และ 60,000 ลักซ์ โดยมีค่าเฉลี่ย 50,122 ลักซ์ และติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ ด้านข้างทั้ง 2 ฝั่ง ซึ่งเซ็นเซอร์จะยกลอยจากพื้นที่ทดสอบ 2.5 เซนติเมตร

4. การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และกระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร ของโซล่าเซลล์ผลึกทึบ และโซล่าเซลล์โปร่งแสง รวมถึงการเชื่อมต่อร่วมกัน โดยวัดค่าทุก 30 นาที เป็นจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งอุณหภูมิของห้องทดสอบ จะเริ่มคงที่ คือประมาณ 87 – 89 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาทีหลังการทดสอบ จนถึง 600 นาทีของการทดสอบ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของทั้ง โซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ และโซล่าเซลล์โปร่งแสง จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิห้อง หรือ 26 องศา และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะมีแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิกงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที จนถึง 570 นาที กระแสไฟฟ้าที่

สภาวะลัดวงจรของทั้ง โซล่าเซลล์แบบผลึกทึบและโซล่าเซลล์โปร่งแสง จะมีค่าแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า และจะลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลง ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดลง โดยค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจรของโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ ลดลงสูงสุด 15.79% ในขณะที่โซล่าเซลล์โปร่งแสง ลดลง 8% และกำลังไฟฟ้าในทฤษฎี การเชื่อมต่อแบบขนานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ กำลังไฟฟ้าการเชื่อมต่อแบบอนุกรม กำลังไฟฟ้าโซล่าเซลล์ผลึกทึบ และกำลังไฟฟ้าโซล่าเซลล์โปร่งแสงตามลำดับ

## 5.2 อภิปรายผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในบทที่ 4 เนื่องจากในการทดสอบผ่านห้องทดสอบระบบแสงอาทิตย์เทียม โซล่าเซลล์แบบผลึกทึบรับความร้อนจากหลอดไฟโดยตรง แต่โซล่าเซลล์โปร่งแสงได้รับแสงจากการสะท้อนและหักเหผ่านตัวกลางคือเกลือและโพลีเมทิลเมทาคริเลต ทำให้ความร้อนที่ตกกระทบเซลล์ไฟฟ้าของโซล่าเซลล์โปร่งแสงนั้นต่ำกว่าโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าของทั้ง 2 ชนิดต่ำลง และเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าลดลง โดยค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจรของโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ ลดลงสูงสุด 15.79% ในขณะที่โซล่าเซลล์โปร่งแสง ลดลง 8% ในขณะที่ยังมีการเชื่อมต่อร่วมกัน เนื่องจากโซล่าเซลล์โปร่งแสงใช้แสงอินฟราเรดผลิตไฟฟ้าและปล่อยให้แสงขาวยทะลุผ่าน ทำให้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดส่งถึงแผงแบบผลึกทึบน้อยลง จึงทำให้กำลังไฟฟ้าการเชื่อมต่อแบบขนานมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะ สำหรับการวิจัยต่อยอดในอนาคต ดังนี้

1. ข้อเสนอแนะในการจัดสร้างห้องทดสอบ ควรเพิ่มหลอดที่มีสเปคตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ต ภายในห้องทดสอบ สำหรับงานในอนาคต
2. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับโซล่าเซลล์โปร่งแสง ควรใช้เซลล์ไฟฟ้าในกริด เป็นชนิดที่รับแสงในช่วงสเปคตรัม อินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ตได้ดี สำหรับการวิจัยในอนาคต
3. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการพิจารณาในการใช้ทดแทนกระจกต่างๆ เพื่อให้สามารถใช้เป็นกระจกผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ และทดแทนโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบได้
4. ข้อเสนอแนะในการพิจารณาการใช้ร่วมกันระหว่างโซล่าเซลล์แบบผลึกทึบ และโซล่าเซลล์โปร่งแสง

บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- (1) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2558 - 2579 (AEDP2015)
- (2) การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมและแสงอาทิตย์ กับข้อจำกัดเรื่องขนาดพื้นที่  
[https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=793:2014-12-16-07-06-10&catid=49&Itemid=251](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=793:2014-12-16-07-06-10&catid=49&Itemid=251)
- (3) Wang, H., Liu, X., & Zhang, Z. M. (2013). Absorption coefficients of crystalline silicon at wavelengths from 500 nm to 1000 nm. *International Journal of Thermophysics*, 34(2), 213-225.
- (4) Ronald Brakels, (2017), The Solar Spectrum And Why “UV Solar Panels” Are A Con Job., Retrieved 3 April 2021, from <https://www.solarquotes.com.au/blog/uv-solar-panels/>
- (5) Solar Energy Technologies Office., (2016), Energy Materials Network Workshop, Retrieved 3 April 2021, from <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/energy-materials-network-workshop>
- (6) Department of Alternative Energy Development and Efficiency., (2017), ศักยภาพรังสีรวม ปี 2560, Retrieved 3 April 2021, from [https://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=47941&filename=solar\\_energy](https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47941&filename=solar_energy)
- (7) ศุภลักษณ์ สติรชีวิน, (2019), อีสานแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ Retrieved 3 April 2021, from <https://theisaanrecord.co/2019/08/10/alternative-energy-solar-cell-isaan/>
- (8) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). พลังงานแสงอาทิตย์. In สารานุกรมพลังงานทดแทน (pp. 32-33, 35, 38). กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- (9) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), (2560). ฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ระดับตำบล ปี 2560 Retrieved 3 April 2021, from [https://www.dede.go.th/article\\_attach/solar\\_radiation\\_database60.xlsx](https://www.dede.go.th/article_attach/solar_radiation_database60.xlsx)
- (10) Yang, C., Liu, D., & Lunt, R. R. (2019). How to accurately report transparent luminescent solar concentrators. *Joule*, 3(12), 2871-2876.
- (11) Traverse, C. J., Pandey, R., Barr, M. C., & Lunt, R. R. (2017). Emergence of highly transparent photovoltaics for distributed applications. *Nature Energy*, 2(11), 849-860.

- (12) Zhao, Y., Meek, G. A., Levine, B. G., & Lunt, R. R. (2014). Light Harvesting: Near - Infrared Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators (Advanced Optical Materials 7/2014). *Advanced Optical Materials*, 2(7), 599-599.
- (13) Tom Oswald, (2014), Solar energy that doesn't block the view, Retrieved 3 April 2021, from <https://msutoday.msu.edu/news/2014/solar-energy-that-doesnt-block-the-view/>
- (14) Freitas, V. T., Fu, L., Cojocariu, A. M., Cattoen, X., Bartlett, J. R., Le Parc, R., ... & Carlos, L. D. (2015). Eu<sup>3+</sup>-based bridged silsesquioxanes for transparent luminescent solar concentrators. *ACS applied materials & interfaces*, 7(16), 8770-8778.
- (15) อมฤต หมวด ทอง. (2015). เกลื้อ และ ประวัติศาสตร์ การ ตั้ง ถิ่นฐาน ชุมชน ใน อีสาน. *NAJUA: Architecture, Design and Built Environment*, 29, 165-165.
- (16) ทิดหมู มั๊กม่วง. (2021). การทำนาเกลื้อสินเชาว์ Retrieved 20 Jan 2022, from <https://www.isangate.com/new/32-art-culture/knowledge/466-na-klua-sin-tao.html>
- (17) Li, X. C., Zhao, J. M., Liu, L. H., & Tan, J. Y. (2015). Optical properties of edible oils within spectral range from 300 to 2500 nm determined by double optical pathlength transmission method. *Applied Optics*, 54(13), 3886-3893.
- (18) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2014). ประวัติพลาสติก • MTEC A Member Of NSTDA. Retrieved 4 April 2021, from <https://www.mtec.or.th/home-2/plastic-history/>
- (19) Della Sala, P., Buccheri, N., Sanzone, A., Sassi, M., Neri, P., Talotta, C., ... & Gaeta, C. (2019). First demonstration of the use of very large Stokes shift cycloparaphenylenes as promising organic luminophores for transparent luminescent solar concentrators. *Chemical Communications*, 55(21), 3160-3163.
- (10) Frias, A. R., Cardoso, M. A., Bastos, A., Correia, S. F., André, P. S., Carlos, L. D., ... & Ferreira, R. A. (2019). Transparent luminescent solar concentrators using Ln<sup>3+</sup>-based ionosilicas towards photovoltaic windows. *Energies*, 12(3), 451.
- (21) Mattiello, S., Sanzone, A., Bruni, F., Gandini, M., Pinchetti, V., Monguzzi, A., ... & Beverina, L. (2020). Chemically Sustainable Large Stokes Shift Derivatives for High-Performance Large-Area Transparent Luminescent Solar Concentrators. *Joule*, 4(9), 1988-2003.

- (22) ERIC WESOFF. (2020). ClearVue's luminescent solar concentrators create clear PV windows. Retrieved 4 April 2021., from <https://pv-magazine-usa.com/2020/04/14/clearvues-luminescent-solar-concentrators-create-clear-pv-windowsclearvue-is-using-a-luminescent-solar-concentrator-to-create-clear-pv-windows/>
- (23) Eni. (n.d.). LSC: transparent sheets for capturing solar energy. Retrieved 4 April 2021., from <https://www.eni.com/en-IT/operations/concentrators-solar-luminescent.html>
- (24) Vasiliev, M., & Alameh, K. (2019). Recent developments in solar energy-harvesting technologies for building integration and distributed energy generation. *Energies*, 12(6), 1080.
- (25) kwangdeermy. (n.d.). พลังงานแสงอาทิตย์. Retrieved 4 April 2021., from <https://sites.google.com/site/kwangdeermy/phlangngan-saeng-xathity>
- (26) U.S. Energy Information Administration. (2021). Primary energy. Retrieved 4 April 2021., from <https://www.eia.gov/totalenergy/>
- (27) พลังงานแสงอาทิตย์. (2021). วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. สืบค้นเมื่อ 08:11, พฤศจิกายน 30, 2021 จาก //th.wikipedia.org/w/index.php?
- (28) อนุตร จำลองกุล. (2009). การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์. Retrieved 4 April 2021., from [http://www.thailandindustry.com/indust\\_newweb/articles\\_preview.php?cid=8946](http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=8946)
- (29) Greenpeace Thailand. (n.d.). พลังงานแสงอาทิตย์ – การเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นพลังงาน Retrieved 4 April 2021., from <https://www.greenpeace.org/thailand/explore/transform/renewables/solar/>
- (30) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). พลังงานแสงอาทิตย์. In สารานุกรมพลังงานทดแทน (pp. 15, 17, 24, 29, 34). กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- (31) Smee, A. (1849). Elements of electro-biology, or the voltaic mechanism of man; of electro-pathology, especially of the nervous system; and of electro-therapeutics.
- (32) ชลล์แสงอาทิตย์. (2021, ตุลาคม 5). วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. สืบค้นเมื่อ 18:15, ตุลาคม 5, 2021 จาก //th.wikipedia.org/w/index.php?

- (33) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). พลังงานแสงอาทิตย์. In สารานุกรมพลังงานทดแทน (pp. 26-27,29,39). กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- (34) นิพนธ์ เกตุน้อย (2010). Outdoor performance of amorphous silicon photovoltaic module in hot climate Phase. มหาวิทยาลัยนเรศวร
- (35) baanjomut. (n.d.) ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์ Retrieved 4 April 2021., from [https://www.baanjomut.com/library\\_2/extension-2/solar\\_cell/01.html](https://www.baanjomut.com/library_2/extension-2/solar_cell/01.html)
- (36) เจ้าของร้าน. (2018). หลักการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์เบื้องต้น. Retrieved 4 April 2021., from <http://www.sunpro-solar.net/b/5>
- (37) Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., & Mohsen, M. (2015). Types of solar cells and application. American Journal of optics and Photonics, 3(5), 94-113.
- (38) เจ้าของร้าน. (2020). ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ และการเลือกใช้งาน. Retrieved 4 April 2021., from <http://www.store.asolar.co.th/b/86>
- (39) Ciesielski, P. N., Hijazi, F. M., Scott, A. M., Faulkner, C. J., Beard, L., Emmett, K., ... & Jennings, G. K. (2010). Photosystem I-Based biohybrid photoelectrochemical cells. Bioresource technology, 101(9), 3047-3053.
- (40) Yehezkeili, O., Tel-Vered, R., Wasserman, J., Trifonov, A., Michaeli, D., Nechushtai, R., & Willner, I. (2012). Integrated photosystem II-based photo-bioelectrochemical cells. Nature communications, 3(1), 1-7.
- (41) Fthenakis, V., & Kim, H. C. (2010). Life-cycle uses of water in US electricity generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), 2039-2048.
- (42) Goody, Y. K. (2009). Publications, presentations, and news database: Cadmium telluride. National Renewable Energy Laboratory.
- (43) Zweibel, K., Mason, J., & Fthenakis, V. (2008). A solar grand plan. Scientific American, 298(1), 64-73.
- (44) Raj, H. J. (2008). Further mention of cost competitiveness: Solar power lightens up with thin-film technology. Scientific American.
- (45) Maka, A. O., & O'Donovan, T. S. (2020). Transient thermal-electrical performance modelling of solar concentrating photovoltaic (CPV) receiver. Solar Energy, 211, 897-907.

(46) Singh, M., Jiu, J., Sugahara, T., & Sukanuma, K. (2014). Thin-film copper indium gallium selenide solar cell based on low-temperature all-printing process. *ACS applied materials & interfaces*, 6(18), 16297-16303.

(47) Muduli, S., Game, O., Dhas, V., Vijayamohanan, K., Bogle, K. A., Valanoor, N., & Ogale, S. B. (2012). TiO<sub>2</sub>-Au plasmonic nanocomposite for enhanced dye-sensitized solar cell (DSSC) performance. *Solar Energy*, 86(5), 1428-1434.

[48] Moss, S. J., & Ledwith, A. (1989). *Chemistry of the Semiconductor Industry*. Springer Science & Business Media.

[49] ศุภ ณ์ ฐ, & เสาท วิโรจน์. การ ศึกษา การ ผลิต พิล์ม บาง ซิลิคอน ด อ ท จาก การนำ แผ่น ซิลิคอน เสียหาย มา ผลิต ใหม่ เพื่อ ประยุกต์ เป็น ชั้น รับ แสง บน เซลล์ แสงอาทิตย์ ชนิด ซิลิคอน (Doctoral dissertation, สาขา วิชา วิศวกรรม ไฟฟ้า สำนัก วิชา วิศวกรรมศาสตร์)

[50] Cat DiStasio. (2015). New hybrid solar cells generate 5 times more energy by harnessing sunlight and heat at the same time. Retrieved 5 April 2021., from <https://inhabitat.com/new-hybrid-solar-cells-generate-5-times-as-much-energy-by-harnessing-suns-light-and-heat-at-the-same-time/>

[51] Debije, M. G., Verbunt, P. P., Nadkarni, P. J., Velate, S., Bhaumik, K., Nedumbamana, S., ... & Hoeks, T. L. (2011). Promising fluorescent dye for solar energy conversion based on a perylene perinone. *Applied optics*, 50(2), 163-169.

[52] Heywang, W., & Zaininger, K. H. (2004). Silicon: the semiconductor material. In *Silicon* (pp. 25-42). Springer, Berlin, Heidelberg.

[53] Photovoltaics, M. G. T. G. (2003). *Advanced Solar Energy Conversion* Springer Series in Photonics.

[54] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). พลังงานแสงอาทิตย์. In *สารานุกรมพลังงานทดแทน* (pp. 22, 26, 28, 39-41). กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.

[55] Park, N. G. (2015). Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. *Materials today*, 18(2), 65-72.

[56] กลุ่มพลังงานสะอาดใหม่ สำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน. (n.d.). การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis). Retrieved 4 April 2021., from <http://www2.dede.go.th/hydronet/01Knowledge/02Electrolysis/Electrolysis2.html>



- [57] Helgesen, M., Søndergaard, R., & Krebs, F. C. (2010). Advanced materials and processes for polymer solar cell devices. *Journal of Materials Chemistry*, 20(1), 36-60.
- [58] Gangopadhyay, U., Jana, S., & Das, S. (2013). State of art of solar photovoltaic technology. In *Conference papers in science* (Vol. 2013). Hindawi.
- [59] Enaganti, P. K., Dwivedi, P. K., Srivastava, A. K., & Goel, S. (2020). Study of solar irradiance and performance analysis of submerged monocrystalline and polycrystalline solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(7), 725-735.
- [60] Kamat, P. V. (2013). Quantum dot solar cells. The next big thing in photovoltaics. *The journal of physical chemistry letters*, 4(6), 908-918.
- [61] Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V. (2004). Thin - film solar cells: an overview. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 12(2-3), 69-92.
- [62] Tek Think Reports. (20 Jul 2015). *Black Silicon Solar Cells and the Race for Higher Efficiency*. Retrieved from <http://tek-think.com/>
- [63] Hermann, A. M. (1982). Luminescent solar concentrators—a review. *Solar Energy*, 29(4), 323-329.
- [64] Wilfried G.J.H.M. van Sark "Luminescent Solar Concentrators - A review of recent results," *Opt. Express* 16, 21773-21792 (2008)
- [65] Yang, C., Moemeni, M., Bates, M., Sheng, W., Borhan, B., & Lunt, R. R. (2020). High - Performance Near - Infrared Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators. *Advanced Optical Materials*, 8(8), 1901536.
- [66] Yang, C., Sheng, W., Moemeni, M., Bates, M., Herrera, C. K., Borhan, B., & Lunt, R. R. (2021). Ultraviolet and Near - Infrared Dual - Band Selective - Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators. *Advanced Energy Materials*, 11(12), 2003581.
- [67] Yang, C., Liu, D., & Lunt, R. R. (2019). How to accurately report transparent luminescent solar concentrators. *Joule*, 3(12), 2871-2876.

- [68] Banal, J. L., Zhang, B., Jones, D. J., Ghiggino, K. P., & Wong, W. W. (2017). Emissive molecular aggregates and energy migration in luminescent solar concentrators. *Accounts of chemical research*, 50(1), 49-57.
- [69] Bergren, M. R., Makarov, N. S., Ramasamy, K., Jackson, A., Guglielmetti, R., & McDaniel, H. (2018). High-performance CuInS<sub>2</sub> quantum dot laminated glass luminescent solar concentrators for windows. *ACS Energy Letters*, 3(3), 520-525.
- [70] อนุชา โปวัน, ปฐมาภรณ์ ศรีผดุงธรรม, อมรรัตน์ ลิ้มมณี, เอกชาติ หัตถา. 2554. การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพสิซีลิกอน และฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซีลิกอนที่ติดตั้งในประเทศไทยด้วยการใช้โปรแกรม จำลอง , การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2554.
- [71] เอกพันธ์ ผัดศรี., Efficiency and Performance Analysis of a 300 kW Grid-tied Solar Power Generation System.,2018
- [72] National Renewable Energy Laboratory. (2020). Best research-cell efficiency chart.
- [73] Hill, G. T., Lee, D. T., Williams, P. S., Needham, C. D., Dandley, E. C., Oldham, C. J., & Parsons, G. N. (2019). Insight on the Sequential Vapor Infiltration Mechanisms of Trimethylaluminum with Poly (methyl methacrylate), Poly (vinylpyrrolidone), and Poly (acrylic acid). *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(26), 16146-16152.
- [74] บริษัท ไชยเจริญเทค จำกัด. (n.d.). อะคริลิกกับ คุณสมบัติเด่น และการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างเหมาะสม. Retrieved 6 April 2021., from <https://www.chi.co.th/article/article-861/>
- [75] The Editors of Encyclopaedia Britannica. (n.d.) polymethyl methacrylate. Retrieved 6 April 2021., from <https://www.britannica.com/science/polymethyl-methacrylate>
- [76] Polymethylmethacrylate (PMMA, Acrylic) Archived 2015-04-02 at the Wayback Machine. Makeitfrom.com. Retrieved 2015-03-23.
- [77] DATA TABLE FOR: Polymers: Commodity Polymers: PMMA Archived 2007-12-13 at the Wayback Machine. Matbase.com. Retrieved 2012-05-09.
- [78] Refractive index and related constants – Poly(methyl methacrylate) (PMMA, Acrylic glass) Archived 2014-11-06 at the Wayback Machine. Refractiveindex.info. Retrieved 2014-10-27.

- [79] Altuglas International Plexiglas UF-3 UF-4 and UF-5 sheets Archived 2006-11-17 at the Wayback Machine. Plexiglas.com. Retrieved 2012-05-09.
- [80] Myer Ezrin Plastics Failure Guide: Cause and Prevention Archived 2016-04-21 at the Wayback Machine, Hanser Verlag, 1996 ISBN 1-56990-184-8, p. 168
- [81] Ishiyama, Chiemi; Yamamoto, Yoshito; Higo, Yakichi (2005). Buchheit, T.; Minor, A.; Spolenak, R.; et al. (eds.). "Effects of Humidity History on the Tensile Deformation Behaviour of Poly(methyl methacrylate) (PMMA) Films". MRS Proceedings. 875: O12.7. doi:10.1557/PROC-875-O12.7.
- [82] "Tangram Technology Ltd. – Polymer Data File – PMMA". Archived from the original on 2010-04-21.
- [83] Sarntima, T., Arjwech, R., & Everett, M. E. (2019). Geophysical mapping of shallow rock salt at Borabue, Northeast Thailand. Near Surface Geophysics, 17(4), 403-416.
- [84] Sodium chloride <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-chloride>
- [85] กรมทรัพยากรธรณี 2548. โครงการศึกษาปัจจัยทางธรณีวิทยาที่ทำให้เกิดดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พ.ศ. 2547 สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี 277 หน้า.
- [86] เจริญ เพียรเจริญ. 2515. แหล่งเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ข้าราชการกรมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี.
- [87] เต็นโชค มั่นใจ. 2545. ทบทวนงานศึกษาธรณีวิทยา บริเวณที่ราบสูงโคราช รายงานสัมมนาภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [88] ธวัช จาปะเกษตร 1985. การสำรวจแร่เกลือหินและโปแทชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย Proceedings of the Conference on Geology and Mineral Resources Development of the Northeast, Thailand. Department of Geotechnology, Khon Kaen University, 26-29 November, Khon Kaen, Thailand.
- [89] พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์. 2542. แหล่งแร่เกลือหินในประเทศไทย. วารสารเศรษฐศาสตร์ธรณีวิทยา ปีที่ 1 ฉบับที่ 10.
- [90] (น ภัทร วัจ น เทพินทร์, & ปกรณ์ สมบูรณ์ กิจ. (2012). การ พัฒนา ชุด กำเนิด แสงอาทิตย์ เทียม อัดโนมิติ สำหรับ ชุด ทดลอง ระบบ ผลิต ไฟฟ้า ด้วย เซลล์ แสงอาทิตย์. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports, 15(3), 236-242.)

[91] กฤติยา บรรพต. (2015). ชุดการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งอิสระ. DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING BURAPHA UNIVERSITY, 26.

[92] NATE. (2014). How to Use a Multimeter. Retrieved 6 April 2021. From <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-use-a-multimeter>

[93] Dellsie, N., & Gartan, D. (1990). A formal specification of an oscilloscope. IEEE software, 7(5), 29-36.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธนารักษ์ โพธิ์สิงห์
วันเกิด	21 พฤษภาคม 2541
สถานที่เกิด	มหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	1/100 วิลล่านารา ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2559 มัธยมปลาย โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม พ.ศ.2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2565 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม

พหุบัณฑิต ชีวะ