

การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุด  
ในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

STUDY ON SOLDERING SOLAR CELL TO IMPROVE  
MAXIMUM POWER IN CRYSTALLINE SILICON  
PV MODULE INDUSTRIAL ASSEMBLY LINE

สันติ มั่นคง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุด  
ในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

สันติ มั่นคง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน  
Study on Soldering Solar Cell to Improve Maximum Power in Crystalline Silicon PV Module Industrial Assembly Line

ชื่อ - นามสกุล

นายสันติ มั่นคง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย หิรัญวโรดม, Ph.D.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์วิบูลย์ ชื่นแขก, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(อาจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย หิรัญวโรดม, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน
ชื่อ - นามสกุล	นายสันติ มั่นคง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย หิรัญวโรดม, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยใช้หัวแรงไฟฟ้าในกระบวนการเชื่อมต่อเซลล์แท็บบิ่งและสตรีง เป็นวิธีการพื้นฐานด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่ากระบวนการเชื่อมต่อเซลล์อัตโนมัติ จึงทำให้มีผู้ประกอบการดำเนินกิจการอยู่เป็นจำนวนมาก จากการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแรงไฟฟ้าในสถานประกอบการ พบปัญหาการยึดติดระหว่างรีบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ยึดติดกันไม่ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และพบแผ่นเซลล์บางแผ่นแตกร้าว ซึ่งมีผลต่อราคาต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยใช้เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์คือ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งบัสบาร์ และขนาดรีบบอนเพื่อปรับปรุงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมตรวจสอบการยึดติดและการแตกร้าวของเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับการควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตวิธีเดิม

ผลการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ พบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการผลิตคือ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ 5 วินาทีต่อบัสบาร์ และรีบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.33 ตรวจสอบการยึดติดมีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอดี และไม่พบแผ่นเซลล์แตกร้าวจากการเชื่อมต่อเซลล์และการเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้ราคาต้นทุนผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงคิดเป็นร้อยละ 4.93 เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตวิธีเดิม

**คำสำคัญ:** การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลึกซิลิกอน



<b>Thesis Title</b>	Study on Soldering Solar Cell to Improve Maximum Power in Crystalline Silicon PV Module Industrial Assembly Line
<b>Name - Surname</b>	Mr.Santi Mankhong
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Somchai Hiranvarodom, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

The crystalline silicon Photovoltaic (PV) module industrial assembly line using soldering iron station in tabbing and string processes is basic method for connecting each solar cell. Its capital cost of production line is considerably lower than an automation process. Many assembly factories have popularly used this method to produce PV modules. However, the main problem is the bonding of each cell between the ribbon and cell busbar that is non-uniform and it is also discontinuous form. Accordingly, it can cause to reduce maximum power and the cracking cell problem. Because of these, the capital cost of production line can be surely increased.

This thesis purposes the study on soldering solar cell to improve maximum power in crystalline silicon PV module assembly industry using the parameter controlling techniques in terms of temperature, soldering time for connecting each cell per busbar and suitable ribbon sizing. These techniques are actually used in the production line to improve maximum power of PV module and checking the quality of bonding including cracking of each solar cell compared to the old process.

The results of study shown that the suitable parameters for production line in terms of the temperature, the soldering time and the ribbon sizing of PV module are 390 °C, 5 seconds per busbar and 0.20×2.00 mm respectively. The maximum power can be increased to 2.33 percent and the bonding between the ribbon and cell busbar is uniform. The cracking cells cannot be found. As a result, capital cost of production can be reduced to 4.93 percent compared to the old process.

**Keywords:** soldering solar cell, maximum power, crystalline silicon

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้และเรียบร้อยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ประธานกรรมการสอบ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนวทางการแก้ปัญหาและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีคุณค่าและความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท โซล่าเพาเวอร์ เทคโนโลยี จำกัด เอื้อเฟื้อสถานที่ทดลองงานวิจัยในสถานประกอบการอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และจัดหาวัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาทดลองงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณพนักงานของบริษัททุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาทดลองงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำระเบียบการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้แต่งและเรียบเรียงตำรา เอกสาร ผลงานวิจัยต่างๆ ที่ผู้วิจัยนำมาใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหาร และเจ้าหน้าที่บุคลากร ตลอดจนสถานการศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สันติ มั่นคง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	4
1.7 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	4
1.8 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความหมายของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.5 ลักษณะเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.6 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.7 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	30
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเซลล์ .....	30
3.2 หลักการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อเซลล์ .....	34
3.3 ตัวพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์ .....	36
3.4 กำหนดค่าควบคุมพารามิเตอร์สำหรับแผงเซลล์ตัวอย่าง .....	36
3.5 ขั้นตอนการปฏิบัติศึกษาทดลองการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ .....	37
3.6 สรุปท้ายบท .....	48
4 ผลการวิจัย .....	49
4.1 วิธีศึกษาการทดลองเชื่อมต่อเซลล์ .....	49
4.2 การกำหนดเกณฑ์ตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อเซลล์ .....	50
4.3 ผลการตรวจสอบการยึดติดและจำนวนเซลล์แตกในการทดลองเชื่อมต่อเซลล์ .....	52
4.4 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในการทดลองเชื่อมต่อเซลล์ .....	59
4.5 วิเคราะห์ผลการวิจัย .....	65
4.6 สรุปท้ายบท .....	67
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	68
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	68
5.2 สรุปการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ .....	70
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	71
รายการอ้างอิง .....	72
ภาคผนวก .....	75
ภาคผนวก ก ภาพเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	76
ภาคผนวก ข ภาพทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ .....	80
ภาคผนวก ค เอกสารข้อมูลวัสดุประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	84
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	92
ประวัติผู้เขียน .....	114

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมการคำนวณหาความต้านทานอนุกรมในส่วนต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	19
3.1	การกำหนดค่าควบคุมพารามิเตอร์ในแต่ละตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	36
4.1	เกณฑ์ตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อระหว่างรีบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ .....	51
4.2	ผลการตรวจสอบการยึดติดและจำนวนเซลล์แตกของตัวอย่างแผงเซลล์ .....	52
4.3	ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ตัวอย่างด้วยเครื่อง Module Tester.....	59
5.1	ผลการวิจัยทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ .....	68
5.2	ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้การเชื่อมต่อเซลล์วิธีเดิม .....	69



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ .....	7
2.2	เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน .....	8
2.3	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน .....	8
2.4	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน.....	8
2.5	หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน.....	9
2.6	โครงสร้างรอยต่อพี - เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน .....	10
2.7	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....	11
2.8	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.9	เส้นโค้งลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.10	ผลของความต้านทานต่อเส้นโค้งลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเทียบกับค่าอุดมคติ ....	17
2.11	ส่วนประกอบของความต้านทานอนุกรมในเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
2.12	วัสดุเคลือบประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.13	กระจกประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
2.14	แผ่นฟิล์มอีวีเอ (EVA Film) .....	22
2.15	แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Mono Crystalline Silicon).....	23
2.16	แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน (Multi Crystalline Silicon) .....	24
2.17	แผ่นปิดด้านหลังโครงสร้างเป็นพีวีเอฟและพีอีที.....	26
2.18	แผ่นปิดด้านหลังโครงสร้างเป็นโมดิไฟด์พอลิเอไมด์.....	27
2.19	กรอบโลหะ (Frame) อลูมิเนียมชุบแข็ง (Anodized Aluminum) .....	27
2.20	กล่องรวมสาย (Junction Box) สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	28
3.1	หัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Station) สำหรับเชื่อมต่อเซลล์.....	30
3.2	แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน.....	31
3.3	ลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอน (Ribbon) สำหรับเชื่อมต่อเซลล์ .....	32
3.4	นาฬิกาจับเวลา สำหรับควบคุมเวลาการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่งปีสบาร์ .....	32
3.5	เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester).....	33
3.6	แผนผังกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน.....	38
3.7	เส้นโลหะฟิงเกอร์ไม่ต่อเนื่องหนึ่งจุด.....	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Cell Tester) .....	39
3.9 การเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์ หรือ แทบบิ่ง (Tabbing) .....	40
3.10 การเชื่อมต่อด้านหลังเซลล์อนุกรมกันเป็นแถว หรือ สตริง (String).....	41
3.11 การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า (Connecting) ไปยังกล่องรวมสาย.....	41
3.12 เครื่องจัดวางวัสดุเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Lay Up Machine).....	42
3.13 วัสดุเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	43
3.14 ทดสอบวงจรไฟฟ้า (Circuit Testing).....	44
3.15 เครื่องเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Laminator).....	44
3.16 รออุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมปกติ .....	45
3.17 ติดตั้งกล่องรวมสาย (Junction Box).....	45
3.18 เครื่องทดสอบฉนวนไฟฟ้า (Hipot Tester).....	46
3.19 เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester) .....	47
3.20 ไคอะแกรมเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
4.1 ระยะเวลาขีดยึดและเกณฑ์การตรวจสอบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ .....	51
4.2 ทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส เวลา 4 วินาที และริบบอน ขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร .....	53
4.3 ทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 7 วินาที และริบบอน ขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร .....	54
4.4 ทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และริบบอน ขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร .....	56
4.5 เซลล์แตกในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 6 วินาที และ ริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร .....	57
4.6 เซลล์แตกในขั้นตอนเคลือบแผงที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 4 วินาที และ ริบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร .....	58
4.7 เซลล์แตกในขั้นตอนเคลือบแผงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 6 วินาที และ ริบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร .....	58
4.8 ไคอะแกรมเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	60

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 ผลทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสุด ( $P_{mp}$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร .....	60
4.10 ผลทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสุด ( $P_{mp}$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร .....	61
4.11 ผลทดสอบค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร.....	62
4.12 ผลทดสอบค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร.....	62
4.13 ผลทดสอบค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร .....	63
4.14 ผลทดสอบค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร .....	63
4.15 ผลทดสอบค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร.....	64
4.16 ผลทดสอบค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร .....	64
4.17 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างการ ควบคุมค่าพารามิเตอร์วิธีเดิมและวิธีใหม่.....	66



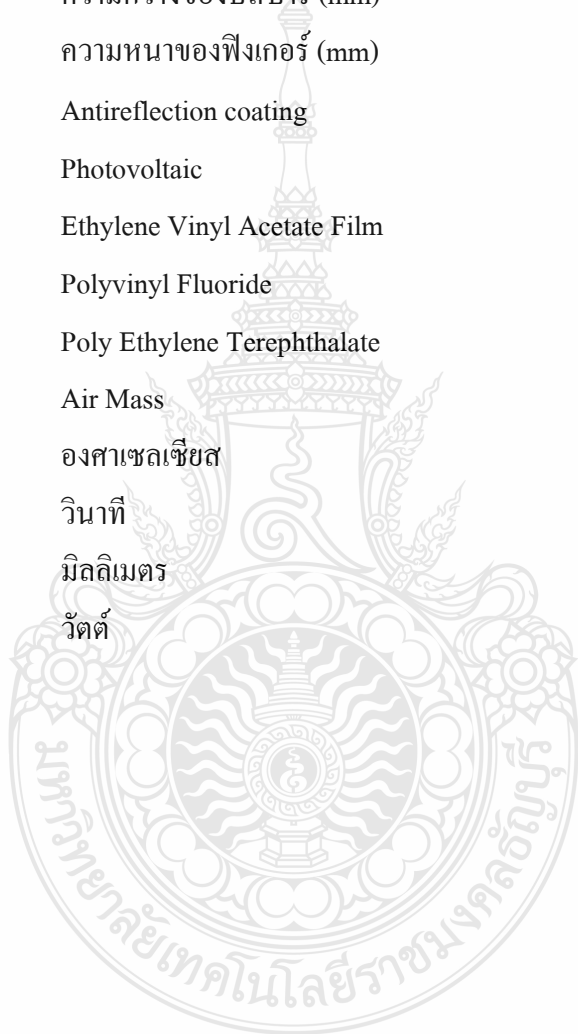


## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$I$	กระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$I_{sh}$	กระแสวงจรมืด (A)
$I_D$	กระแสไดโอด (A)
$I_{ph}$	กระแสโฟตอน (A)
$I_0$	กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
$q$	ประจุอิเล็กตรอน $1.602 \times 10^{-19}$ C
$V$	แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (V)
$n$	แฟกเตอร์ทางอุดมคติ
$k$	ค่าคงที่ Boltzmann $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/K
$T$	อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (K)
$R_{sh}$	ความต้านทานขนาน ( $\Omega$ )
$R_s$	ความต้านทานอนุกรม ( $\Omega$ )
$FF$	ฟิลล์แฟกเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
$V_{mp}$	แรงดันสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
$I_{mp}$	กระแสสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$V_{oc}$	แรงดันวงจรเปิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
$I_{sc}$	กระแสวงจรมืดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$\eta$	ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
$P_{mp}$	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
$P_{in}$	กำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
$A_{irr}$	พื้นที่รับความเข้มแสงอาทิตย์ ( $m^2$ )
$I_{rrdiance}$	ความเข้มแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
$R_e$	ความต้านทานที่อิมิตเตอร์ ( $\Omega$ )
$R_b$	ความต้านทานที่เบส ( $\Omega$ )
$R_{fc}$	ความต้านทานสัมผัสด้านหน้า ( $\Omega$ )
$R_{bc}$	ความต้านทานสัมผัสด้านหลัง ( $\Omega$ )

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$R_f$	ความต้านทานที่ฟิงเกอร์ ( $\Omega$ )
$R_{bb}$	ความต้านทานที่บัสบาร์ ( $\Omega$ )
$W_f$	ความกว้างของฟิงเกอร์ (mm)
$W_{bb}$	ความกว้างของบัสบาร์ (mm)
$t_f$	ความหนาของฟิงเกอร์ (mm)
ARC	Antireflection coating
PV	Photovoltaic
EVA	Ethylene Vinyl Acetate Film
PVF	Polyvinyl Fluoride
PET	Poly Ethylene Terephthalate
AM	Air Mass
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
sec	วินาที
mm	มิลลิเมตร
W	วัตต์



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลายปีที่ผ่านมาสืบเนื่องจนถึงปัจจุบัน อุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon) ได้มีการปรับปรุงพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมต่อเซลล์ในขั้นตอนแทบบิง (Tabbing) และขั้นตอนสตริง (String) โดยใช้วิธีเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแรงไฟฟ้า (Soldering Iron Station) เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม และการพัฒนาเทคโนโลยีวิธีการเชื่อมต่อเซลล์ที่ก้าวล้ำด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาวิจัยการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแรงไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการผลิตดังกล่าวมีข้อดีคือ ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า และสามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงรูปแบบและขนาดได้ง่ายกว่า กระบวนการผลิตที่ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าย่อมหมายถึงกำลังผลิตส่วนใหญ่เป็นพนักงาน ฉะนั้นขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์แทบบิงและสตริง จึงปฏิบัติหน้าที่โดยพนักงาน การเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแรงไฟฟ้ามีปัญหาที่ควรปรับปรุงคือการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของลวดตัวนำไฟฟ้าหรือแทบบิงริบบอน (Tabbing Ribbon) กับผิวสัมผัสของบัสบาร์เซลล์แสงอาทิตย์ยังยึดติดไม่สม่ำเสมอและเหนียวแน่นพอ บางครั้งแผ่นเซลล์แตกร้าวจนทำการเชื่อมต่อเซลล์ เนื่องจากการปรับตั้งค่าอุณหภูมิไม่เหมาะสมกับเวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ และบางครั้งการยึดติดของรอยเชื่อมไม่ผ่านการตรวจสอบจากเจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพ จึงต้องนำมาแก้ไขใหม่โดยการเชื่อมต่อเซลล์ซ้ำที่ตำแหน่งเดิมอีกครั้ง (Rework) การควบคุมอุณหภูมิจะมีผลต่อความร้อนสะสมทำให้จุดหลอมเหลวของลวดตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีส่วนผสมของดีบุกและตะกั่วจะหลอมละลายเร็วกว่าเดิมทำให้ผิวสัมผัสบนบัสบาร์ของเซลล์หลุดร่อนได้ง่ายและความร้อนสะสมที่สูงขึ้นนี้จะไปทำลายการยึดติดของรอยเชื่อมฝั่งตรงข้าม ถ้ารุนแรงมากถึงขั้นทำให้แผ่นเซลล์เสียหายแตกร้าวนได้ การยึดติดของผิวสัมผัสระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับแผ่นเซลล์ยิ่งแย่มากยิ่งขึ้นมีผลต่อความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) มีค่าสูงขึ้นตาม ทำให้ค่ากระแสลดลงและเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์ลดลง จากปัญหาที่กล่าวมาจึงต้องดำเนินการศึกษาวิธีทดลองโดยใช้เทคนิคการควบคุมค่าพารามิเตอร์ (Parameter) บางตัวที่มีผลในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์คือ อุณหภูมิ (Temperature) เวลา (Time) ในการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และขนาด (Size) ของลวดตัวนำไฟฟ้า (Conductive Wire) หรือริบบอน (Ribbon) เพื่อให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการนำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตได้จริง สามารถปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและ

ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงขึ้นได้ และทำให้ต้นทุนการผลิตที่เกิดจากแผ่นเซลล์แตกร้าวในขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์มีค่าลดลงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการควบคุมพารามิเตอร์ที่มีผลในการเชื่อมต่อเซลล์คือ อุณหภูมิ เวลาเชื่อมต่อเซลล์ต่อหนึ่งบัสบาร์ และขนาดลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอน

1.2.2 เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยการควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อที่เหมาะสม

1.2.3 เพื่อลดจำนวนแผ่นเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์

1.2.4 เพื่อลดค่าใช้จ่ายของต้นทุนการผลิตในส่วนของแผ่นเซลล์

## 1.3 สมมุติฐานการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสและกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ได้มีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งที่เกิดจากความต้านทานอนุกรม (Serial Resistance;  $R_s$ ) ความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อหน้าสัมผัสการเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ การยึดติดของหน้าสัมผัสของวัสดุทั้งสองมีผลต่อค่าความต้านทานอนุกรม การเชื่อมต่อที่หน้าสัมผัสไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องมีผลทำให้เกิดความต้านทานอนุกรมเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้กระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ซึ่งถือว่าเป็นทฤษฎีหลักที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้

การใช้เทคนิควิธีการควบคุมพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการศึกษาการวิจัย สามารถทำให้การยึดติดของหน้าสัมผัสระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์มีการยึดติดที่สม่ำเสมอและต่อเนื่องดีมากยิ่งขึ้น จะสามารถทำให้ความต้านทานอนุกรมมีค่าลดลงตามทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น และสามารถปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) และประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นได้

การใช้เทคนิควิธีการควบคุมพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการศึกษาการวิจัย สามารถช่วยลดจำนวนแผ่นเซลล์แตกร้าวในขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์ได้ เนื่องจากการควบคุมปริมาณความร้อนที่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อเซลล์ แทนการใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น ซึ่งเป็นเหตุทำให้แผ่นเซลล์แตกร้าวจากความเครียดของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เมื่อจำนวนแผ่นเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ลดลง จึงทำให้ค่าใช้จ่ายของต้นทุนการผลิตลดลง

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ใช้หัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Station) เชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับขั้วบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน (Polycrystalline Silicon)

1.4.2 ศึกษาการยึดติดระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับขั้วบัสบาร์เซลล์แสงอาทิตย์ตรวจสอบผิวสัมผัสด้วยสายตาจากการทดลองลอกคิง (Peeling) ลวดตัวนำไฟฟ้าออกจากขั้วบัสบาร์เซลล์แสงอาทิตย์

1.4.3 ศึกษากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าได้จากเครื่องวัดสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ (Module Tester)

#### 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัย

1.5.2 จัดทำรูปแบบในการเสนอหัวข้อครั้งที่ 1 และศึกษาการทำวิทยานิพนธ์ในทุกส่วน

1.5.3 ศึกษาขอบเขตของตัวพารามิเตอร์ที่จะนำมาทดลองจากข้อมูลของทางโรงงาน

1.5.4 ทดลองการเชื่อมต่อเซลล์ระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับขั้วบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ หรือ การเชื่อมต่อแท็บบิง (Tabbing) ตามค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุม

1.5.5 ทดลองการเชื่อมต่อเซลล์อนุกรมกันเป็นแถวระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับขั้วบัสบาร์ด้านหลังเซลล์ หรือ การเชื่อมต่อสตริง (String) ตามค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุม

1.5.6 ตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับขั้วบัสบาร์ของเซลล์ด้วยการลอกคิงลวดตัวนำไฟฟ้าออกจากขั้วบัสบาร์ของเซลล์และสังเกตพื้นผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง

1.5.7 ตรวจสอบจำนวนแผ่นเซลล์แตกร้าวในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ตามค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุม

1.5.8 กระบวนการผลิตแผงเซลล์ตัวอย่างนอกเหนือจากขั้นตอนทดลองเชื่อมต่อเซลล์ (แท็บบิงและสตริง) ปฏิบัติตามกระบวนการผลิตของทางโรงงาน

1.5.9 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตเสร็จนำมาตรวจสอบหาเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์

1.5.10 ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า (Module Tester)

1.5.11 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองของตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการควบคุมพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

1.5.12 จัดทำรูปเล่มฉบับสมบูรณ์

## 1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย

1.6.1 ทดลองเชื่อมต่อเซลล์โดยการควบคุมอุณหภูมิ 380, 390 และ 400 องศาเซลเซียส

1.6.2 ทดลองเชื่อมต่อเซลล์โดยการควบคุมเวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์

1.6.3 ทดลองเชื่อมต่อเซลล์โดยการควบคุมขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้า คือ  $0.20 \times 2.00$  และ  $0.24 \times 2.00$  มิลลิเมตร

1.6.4 ตัวอย่างทดลองการเชื่อมต่อเซลล์รวมทั้งหมด 24 ตัวอย่าง จากเงื่อนไขการควบคุมความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันทั้ง อุณหภูมิ เวลา และขนาดลวดตัวนำไฟฟ้า

## 1.7 กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากการศึกษากระบวนการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Iron Station) และการยึดติดระหว่างผิววัสดุของลวดตัวนำไฟฟ้าหรือรียบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon Solar Cell) มีการยึดติดที่ไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่อง เมื่อทดลองลวดตัวนำไฟฟ้าออกจากบัสบาร์ของเซลล์ พบว่าผิวโลหะของบัสบาร์ไม่หลุดลอกติดออกมากับลวดตัวนำไฟฟ้า หรือบางครั้งมีผิวโลหะติดออกมาบ้างแต่ไม่สม่ำเสมอ และมีบางครั้งการควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่ไม่เหมาะสมในการเชื่อมต่อเซลล์ อุณหภูมิที่สูงเกินไปและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อนานเกินไปจนทำให้แผ่นเซลล์ได้รับความเสียหายแตกร้าวได้ และจากการศึกษาทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งมาจากผิวสัมผัสที่เป็นรอยต่อของโลหะระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับบัสบาร์ของเซลล์ทำให้เกิดความต้านทานอนุกรม (Serial Resistance) สูงขึ้นจึงทำให้กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง จากการศึกษาทางทฤษฎีร่วมกับการสังเกตการเชื่อมต่อเซลล์ในกระบวนการผลิต จึงวิเคราะห์หาตัวพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงกับการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสลวดตัวนำไฟฟ้ากับบัสบาร์ของเซลล์ คือ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ และขนาดลวดตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเซลล์อนุกรมกันเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น ในการเลือกค่าพารามิเตอร์พิจารณาได้จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 380 องศาเซลเซียส เวลาเร็วสุดที่ทำให้ได้ 4 วินาที การเชื่อมต่อบางจุดหลุดลอกได้ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 7 วินาที ช้ากว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณงานที่ได้รับและความคุ้นเคยของพนักงานเชื่อมต่อเซลล์ จากข้อมูลบันทึกคุณภาพของกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิ 410 ถึง 430 องศาเซลเซียส พบเซลล์แตกจากขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ค่อนข้างสูง และการพิจารณาการเพิ่มขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อต้องการให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นในทางปฏิบัติไม่สามารถเพิ่มความกว้างของลวดตัวนำไฟฟ้าได้ ถูกจำกัดด้วยความกว้างของบัสบาร์ เมื่อเพิ่มความหนาให้สูงขึ้นจะทำให้ลวดตัวนำไฟฟ้ามีความแข็งเพิ่มขึ้นและบิดงอ

ได้ยากจะส่งผลทำให้เซลล์แตกทั้งในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์และขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์ เมื่อศึกษาข้อมูลเชิงปฏิบัติการในกระบวนการผลิตและทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเป็นที่มาของการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการใช้หัวแรงไฟฟ้า เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.8 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.8.1 สามารถปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยการควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อที่เหมาะสม

1.8.2 สามารถทำให้แผ่นเซลล์ที่แตกร้าวจากขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์มีจำนวนลดลง

1.8.3 สามารถทำให้ต้นทุนการผลิตในส่วนของแผ่นเซลล์มีค่าใช้จ่ายลดลง



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยและศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดและลำดับหัวข้อดังนี้

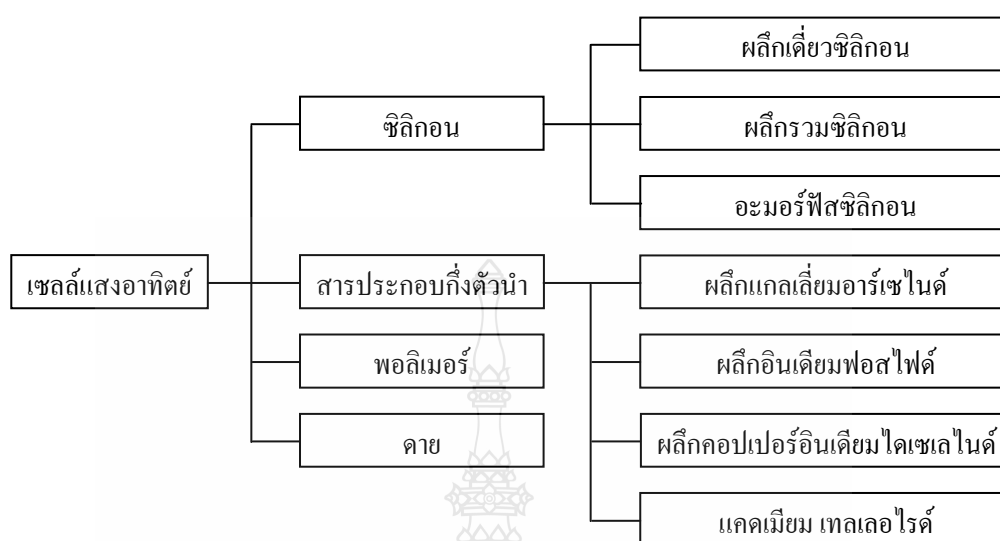
1. ความหมายของเซลล์แสงอาทิตย์
2. ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์
3. โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์
4. หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
5. ลักษณะเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์
6. ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
7. ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความหมายของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) คือสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ อาทิ ซิลิกอน (Silicon) แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium phosphide) แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง และไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) จัดเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่ง (Renewable Energy) สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆในขณะที่ใช้งาน เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้นทำให้สามารถทำงานได้ [1]



## 2.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์



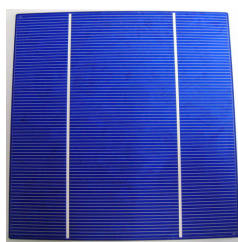
ภาพที่ 2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

สารกึ่งตัวนำที่ใช้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 2.1 แบ่งชนิดวัสดุได้ดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell หรือ Mono Crystalline Silicon Solar Cell) แสดงดังภาพที่ 2.2 และ 2.3 มีความหนาประมาณ 200 ถึง 300 ไมครอน มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 15 ถึง 17
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ชนิดผลึกรวม (Poly Crystalline Silicon Solar Cell หรือ Multi Crystalline Silicon Solar Cell) แสดงดังภาพที่ 2.2 และ 2.3 ลักษณะเป็นแผ่นซิลิกอนแข็ง และบางมาก มีความหนาประมาณ 180 ถึง 220 ไมครอน มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 12 ถึง 15
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon Solar Cell) แสดงดังภาพที่ 2.2 และ 2.3 ลักษณะเป็นฟิล์มบาง มีความหนาประมาณ 0.5 ถึง 1.0 ไมครอน มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 5 ถึง 10
4. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ อาทิ แกเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียม ฟอสไฟด์ แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกเลียม อาร์เซไนด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 20 ถึง 25 ผลึกอินเดียมฟอสไฟด์



(ก) ชนิดผลึกเดี่ยว



(ข) ชนิดผลึกรวม



(ค) อะมอร์ฟัสซิลิกอน

ภาพที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน



(ก) ชนิดผลึกเดี่ยว



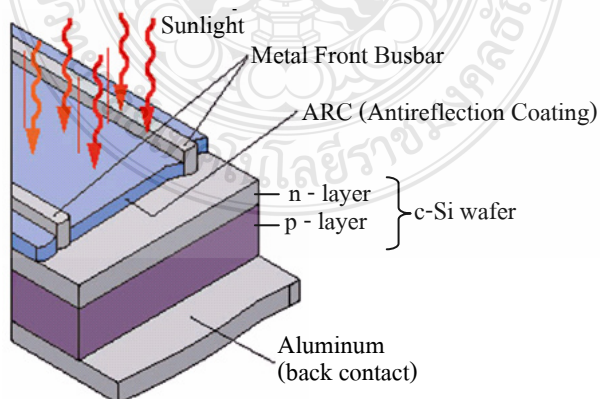
(ข) ชนิดผลึกรวม



(ค) อะมอร์ฟัสซิลิกอน

ภาพที่ 2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน

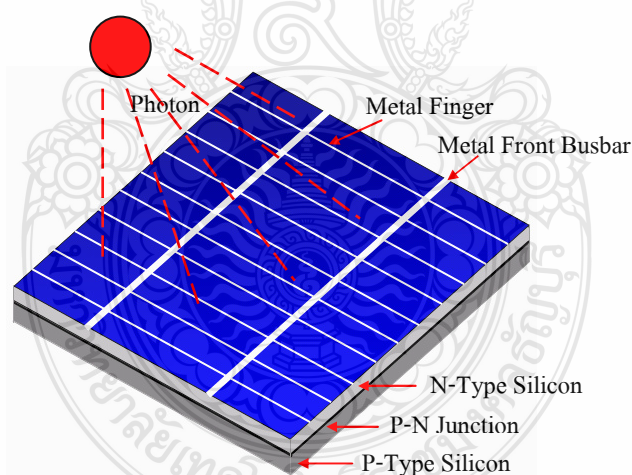
2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน

จากภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมมากที่สุดได้แก่รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนโลก [2] คือ ซิลิกอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิกอนมาถูกลง และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอนจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮล ซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกันจะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 180 ถึง 200 ไมครอน ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะคล้ายกางปลา คือ เส้นโลหะฟิงเกอร์ (Metal Finger) และแถบโลหะบัสบาร์ (Metal Front Busbar) เพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (Metal Back Busbar) เป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว [3]

#### 2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

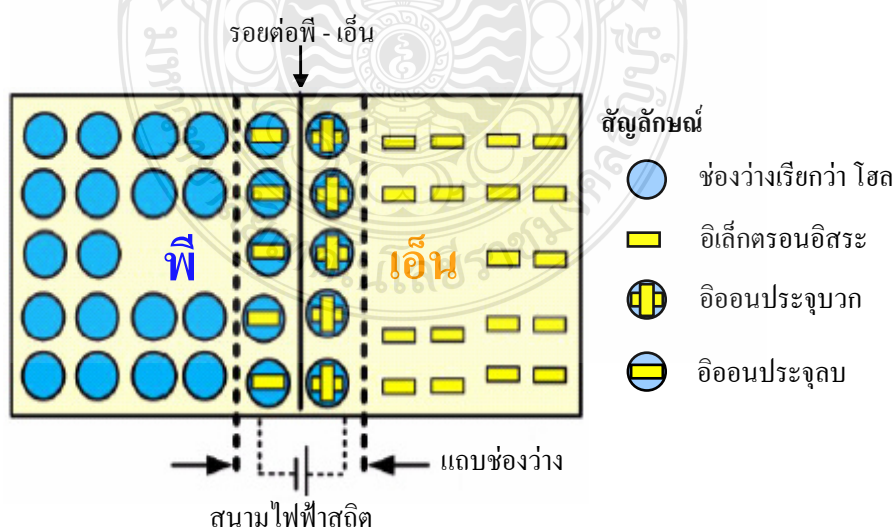


ภาพที่ 2.5 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิกอน

จากภาพที่ 2.5 แสดงหลักการทำงานของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของ

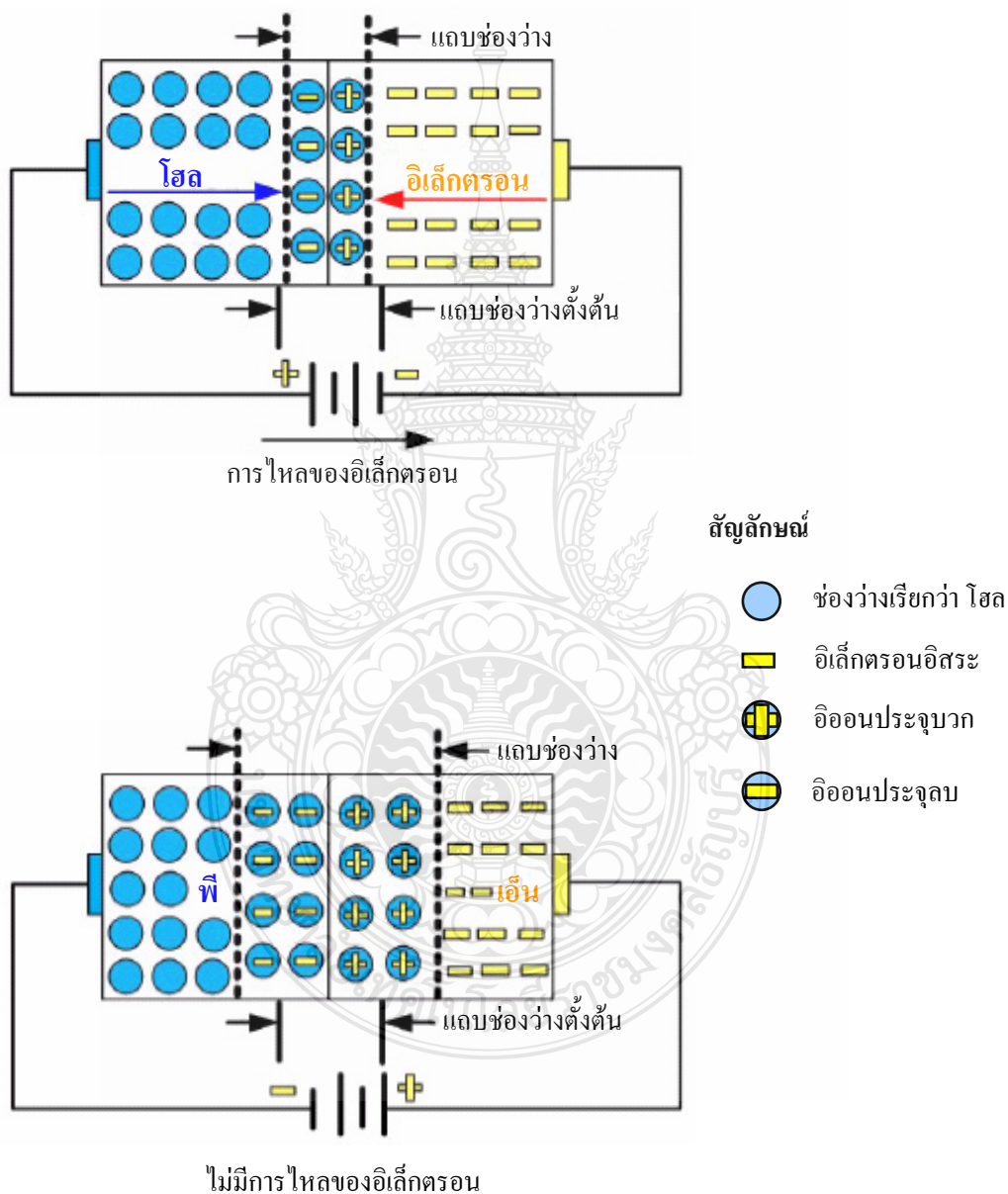
อะตอม (Atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่อนำมาต่อครบวงจรจะทำให้เกิดการผลิตเป็นไฟฟ้า กระแสตรง [4] กระแสที่ผลิตได้จะถูกดึงไปที่แถบโลหะด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์ โดยด้านหน้าเป็นแถบโลหะเส้นเล็กๆ หลายเส้นวางแนวขวางเรียกว่า ฟิงเกอร์ (Fingers) จะนำกระแสส่งไปยังเส้นแถบโลหะใหญ่เรียกว่า บัสบาร์ (Busbar) และไหลไปกับลวดตัวนำไฟฟ้า หรือ ริปบอน เพื่อส่งไปยังเซลล์ที่เชื่อมต่ออนุกรมกัน เพราะฉะนั้นฟิงเกอร์และบัสบาร์ จะต้องบังแสงให้น้อยที่สุดและเป็นตัวนำการไหลของกระแสได้สูง ด้านหน้าของแผ่นเซลล์ต้องเคลือบด้วยสารลดการสะท้อนแสง (Antireflection Coating; ARC) จากความสำคัญของด้านรับแสงของแผ่นเซลล์โดยเฉพาะเส้นฟิงเกอร์และบัสบาร์จะต้องมีสมบัติทนต่อการไหลของกระแสได้สูง และทนต่อการทำลายของสภาพแวดล้อม คือ ความชื้นและความร้อนจากแสงแดด

โครงสร้างที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกับไดโอดทั่วไปประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้น ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นขั้วบวกและสารกึ่งตัวนำเอ็นเป็นขั้วลบ สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานในลักษณะดังกล่าวส่วนมากเป็นซิลิกอนและเพื่อให้เข้าใจได้ง่าย โดยส่วนใหญ่จะใช้การอธิบายสารกึ่งตัวนำที่ทำจากซิลิกอน แม้ว่าปัจจุบันจะมีสารกึ่งตัวนำที่ทำจากวัสดุตัวอื่นก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอนใช้สารเจือปนคือ โบรอน เพื่อทำให้เป็นวัสดุขาดอิเล็กตรอนอิสระ ทั้งนี้การขาดอิเล็กตรอนทำให้เกิดช่องว่างเรียกว่า โฮล (Hole) และการขาดอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบ ทำให้ส่วนนี้เทียบได้กับอนุภาคประจุบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นผ่านการเติมสารเจือปนคือ ฟอสฟอรัส เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนส่วนเกิน ซึ่งจุดเชื่อมต่อเรียกว่า รอยต่อพี - เอ็น ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างรอยต่อพี - เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

การเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติต่างกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electrical Field) ในบริเวณรอยต่อ โดยสนามไฟฟ้านี้มีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าสถิต อันจะทำให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และอนุภาคของประจุบวกที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตรงข้าม อาทิ การใช้ฮีแมงกับเล็ออนสตั๊ว เป็นต้น



ภาพที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิดอื่นทำให้เกิดกระแสได้ดังภาพที่ 2.7 เมื่อต่อเข้ากับวงจรภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสผ่านตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกของอิเล็กตรอนในกรณีของสารกึ่งตัวนำโดยผ่านวัสดุตัวนำที่ติดอยู่กับผิวด้านหน้าของเซลล์ในเวลาเดียวกันโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามผ่านเนื้อเซลล์จนไปถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งที่ยึดติดอยู่กับด้านล่างของเซลล์ ทำให้ครบวงจรโดยร่วมกับอิเล็กตรอนที่อยู่อีกด้านหนึ่งของวงจรภายนอก แต่ในทางตรงข้ามการไหลของอิเล็กตรอนไม่เกิดขึ้นหากไม่สามารถทำให้ครบวงจร

กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องอาศัยทั้งแรงดันและกระแส โดยที่กระแสเกิดขึ้นเมื่อมีการไหลของอิเล็กตรอน และแรงดันเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวจะออกแบบให้แรงดันประมาณ 0.5 โวลต์ ที่กระแสประมาณ 7.5 แอมแปร์ ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3.75 วัตต์ (ขึ้นกับรายละเอียดในการออกแบบ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นๆ อาจมีแรงดันหรือกระแสสูงหรือต่ำกว่านี้)

## 2.5 ลักษณะเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์

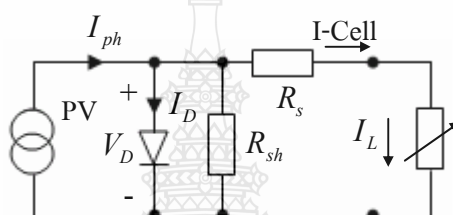
1. เป็นการนำพลังงานจากแหล่งธรรมชาติมาใช้อย่างคุ้มค่าและไม่มีวันหมดไปจากโลกนี้
2. ใช้พลังงานจากธรรมชาติ คือ แสงอาทิตย์ ซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ ไม่ก่อปฏิกิริยาที่จะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ
3. สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทุกพื้นที่บนโลก และได้พลังงานไฟฟ้าใช้โดยตรง
4. ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นใดนอกจากแสงอาทิตย์ รวมถึงไม่มีการเผาไหม้ จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ ด้านอากาศและน้ำ
5. ไม่เกิดของเสียขณะใช้งาน จึงไม่มีการปล่อยมลพิษทำลายสิ่งแวดล้อม
6. ไม่เกิดเสียงและไม่มีการเคลื่อนไหวนขณะใช้งาน จึงไม่เกิดมลภาวะด้านเสียง
7. เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ และไม่มีชิ้นส่วนใดที่มีการเคลื่อนไหวนขณะทำงาน จึงไม่เกิดการสึกหรอ
8. ต้องการการบำรุงรักษาน้อยมาก
9. อายุการใช้งานยืนยาวและประสิทธิภาพคงที่
10. มีน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย เคลื่อนย้ายสะดวกและรวดเร็ว
11. เนื่องจากมีลักษณะเป็น โมดูล จึงสามารถประกอบได้ตามขนาดที่ต้องการ



12. ช่วยลดปัญหาของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ อาทิ คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ฯลฯ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจำพวกน้ำมัน ถ่านหิน และ ก๊าซธรรมชาติ ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก ทำให้โลกร้อนขึ้นเกิดฝนกรด และอากาศเป็นพิษ ฯลฯ

## 2.6 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [1] แสดงดังภาพที่ 2.8 พิจารณากระแสได้จากสมการที่ 2.1



ภาพที่ 2.8 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

$I_{sh}$  คือ กระแสวงจรมืด (A)

$I_D$  คือ กระแสไดโอด (A)

$I_{ph}$  คือ กระแสโฟตอน (A)

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสไปอัสอิมตัวย้อนกลับ (A)

$q$  คือ ประจุอิเล็กตรอน  $1.602 \times 10^{-19}$  C

$V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (V)

$n$  คือ แฟกเตอร์ทางอุดมคติ

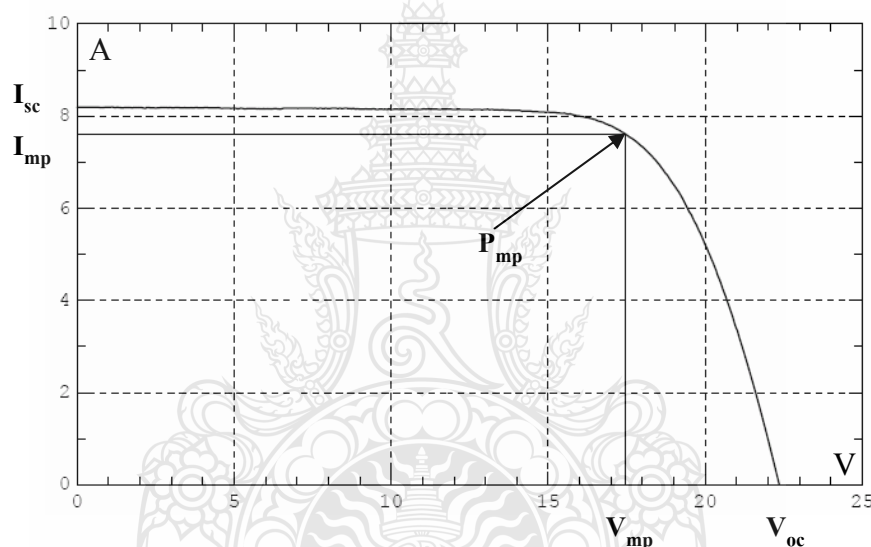
$k$  คือ ค่าคงที่ Boltzmann  $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/K

$T$  คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (K)

$R_{sh}$  คือ ความต้านทานขนานที่เกิดจากสภาพรอยต่อที่สร้างขึ้น ( $\Omega$ )

$R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรมที่เกิดจากความต้านทานของผิวสัมผัสขั้วโลหะ ( $\Omega$ )

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่มีแสงลักษณะแสดงดังภาพที่ 2.9 แสดงกระแสที่ไหลผ่านภาระทางไฟฟ้าหรือโหลด เมื่อแรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มจากศูนย์ถึงแรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) หรือการเปลี่ยนแปลงโหลดตั้งแต่ศูนย์ถึงอนันต์



ภาพที่ 2.9 เส้นโค้งลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสวงจรถัด ( $I_{sc}$ ) เกิดขึ้นในสถานะที่แรงดันเท่ากับศูนย์ เป็นค่ากระแสที่วัดจากการลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อภาระมีค่าเป็นศูนย์ กระแสวงจรถัดจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบนหน้าเซลล์แสงอาทิตย์

แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) เกิดขึ้นในสถานะที่ไม่มีกระแสไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นค่าแรงดันที่วัดขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเป็นค่าแรงดันเมื่อภาระไฟฟ้ามีค่าสูงมาก ค่าแรงดันวงจรเปิดนี้มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงในรูป ลอการิทึม

กระแสสูงสุด ( $I_{mp}$ ) เป็นค่ากระแสที่ภาระทางไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

แรงดันสูงสุด ( $V_{mp}$ ) เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมภาระทางไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ความเข้มแสงตกกระทบและอุณหภูมิของตัวเซลล์มีค่าหนึ่ง เมื่อนำภาระทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.3

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (2.3)$$

ประสิทธิภาพ (Efficiency;  $\eta$ ) คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) เทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นที่รับแสงของเซลล์ พิจารณาได้จากสมการที่ 2.4 หรืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเทียบกับกำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{in}$ ) พิจารณาได้จากสมการที่ 2.5

$$\eta = \frac{P_{mp}}{A_{irr} \times I_{rradiance}} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$\text{หรือ } \eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.5)$$

เมื่อ	$\eta$	คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
	$P_{mp}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
	$P_{in}$	คือ กำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
	$A_{irr}$	คือ พื้นที่รับความเข้มแสงอาทิตย์ ( $m^2$ )
	$I_{rradiance}$	คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

กำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{in}$ ) หรือผลคูณระหว่างพื้นที่รับความเข้มแสงอาทิตย์กับความเข้มแสงอาทิตย์ เกิดจากแสงตกกระทบในหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) หรือในเทอมของ หนึ่งแสงอาทิตย์เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $1 \text{ Sun} = 1,000 \text{ W/m}^2$ ) โดยพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์มีหน่วยเป็นตารางเมตร ( $m^2$ ) ค่าประสิทธิภาพสูงสุด ( $\eta$ ) หาได้จากแสงที่ใช้ทดสอบเส้นโค้งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve) ประสิทธิภาพจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม อาทิ อุณหภูมิ และสเปกตรัมของความเข้มแสงที่

ตกกระทบ ด้วยเหตุดังกล่าวการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องอยู่ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความเข้มแสง (STC : 1000W/m<sup>2</sup> 25 °C AM 1.5)

ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor;  $FF$ ) คือ พารามิเตอร์วัดคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์ที่ดีควรมีค่ามาก โดยทั่วไปฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์พาณิชย์มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.82 และแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ซึ่งฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของผลคูณระหว่างแรงดันสูงสุดกับกระแสสูงสุดหารด้วย ผลคูณระหว่างกระแสจลัดกับแรงดันวงจรเปิด พิจารณาได้จากสมการที่ 2.6

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $FF$  คือ ฟิลล์แฟกเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

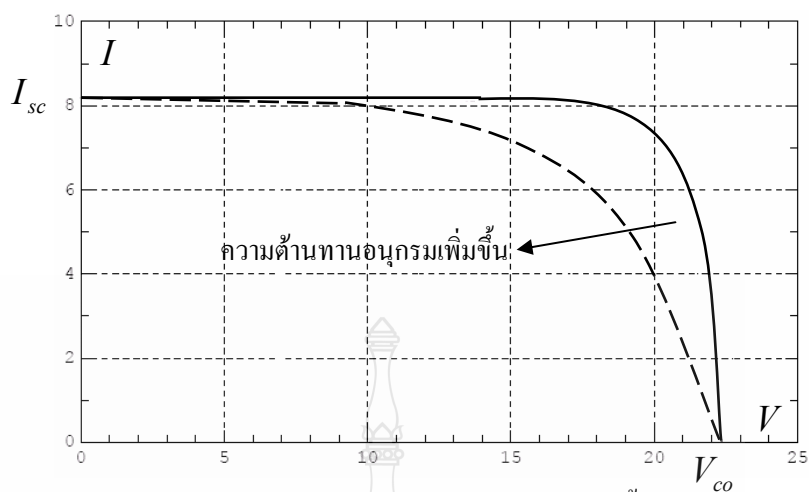
$V_{mp}$  คือ แรงดันสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

$I_{mp}$  คือ กระแสสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

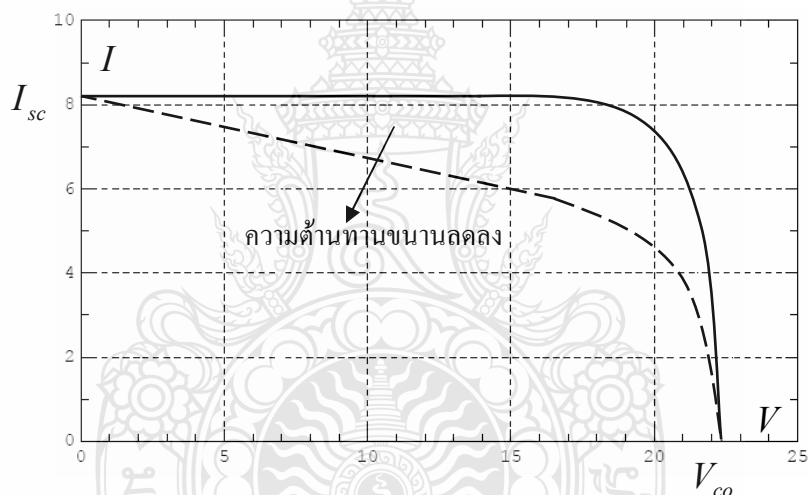
$V_{oc}$  คือ แรงดันวงจรเปิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

$I_{sc}$  คือ กระแสจลัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

ความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรม (Series Resistance;  $R_s$ ) และความต้านทานขนาน (Shunt Resistance;  $R_{sh}$ ) แสดงดังภาพที่ 2.10 เซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ ความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) ควรมีค่าอนันต์ (Infimite) ไม่มีการไหลของกระแสภายใน และกระแสทั้งหมดที่เซลล์ผลิตขึ้นภายในควรวไหลออกไปจ่ายโหลดภายนอก ขณะที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ควรมีค่าเป็นศูนย์ และไม่มีแรงดันตกคร่อมส่วนใดของเซลล์ก่อนไปถึงโหลด ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์) มีค่าเท่ากับแรงดันที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังคงมีความต้านทานอนุกรมอยู่เสมอ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการหาวิธีลดความต้านทานอนุกรมที่เกิดจากหน้าสัมผัสของการเชื่อมต่อเซลล์ระหว่างริบบอน (Ribbon) หรือลวดตัวนำไฟฟ้า (Conductive Wire) ที่เป็นโลหะทองแดงกับบัสบาร์ (Busbar) ด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ การยึดติดของหน้าสัมผัสในการเชื่อมต่อเซลล์ที่มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่อง สามารถทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมลดลงได้ [5-6]



(ก) ผลของความต้านทานอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้น

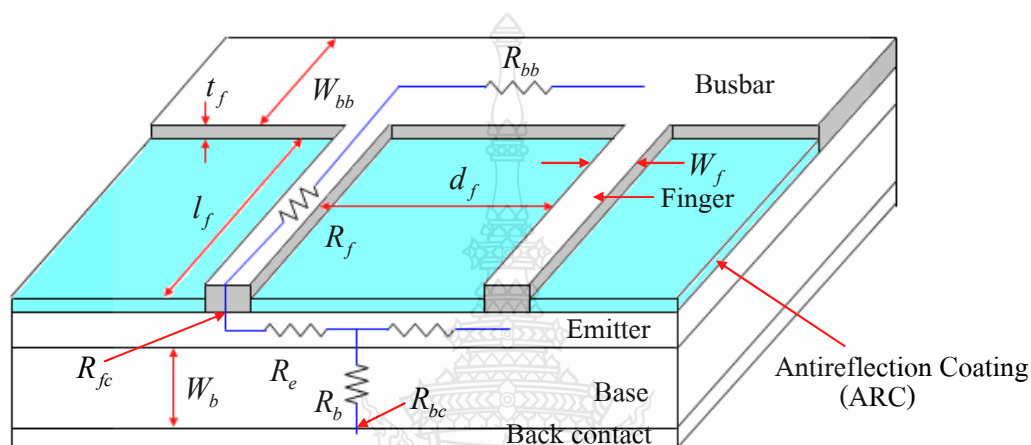


(ข) ผลของความต้านทานขนานมีค่าเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 2.10 ผลของความต้านทานต่อเส้นโค้งลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเทียบกับค่าอุดมคติ

ความต้านทานอนุกรม (Series Resistance;  $R_s$ ) ในเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นความต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกระแสที่ผ่านชั้นสารกึ่งตัวนำด้านรับแสง ซึ่งสร้างพาหะด้านบน (Emitter) และพื้นหลังของเซลล์แสงอาทิตย์รวมถึงในเนื้อสารด้วย ส่วนที่สองเป็นความต้านทานของหน้าสัมผัสระหว่างโลหะและซิลิกอน และส่วนสุดท้ายเป็นความต้านทานที่โลหะด้านบนและด้านล่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอน [7-8]

ถึงแม้ว่าค่าความต้านทานอนุกรมที่สูงจะลดกระแสแสงจรลัด ( $I_{sc}$ ) ก็ตาม แต่ผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ความต้านทานอนุกรมที่กล่าวมานี้สามารถแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ส่วนประกอบของความต้านทานอนุกรมในเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานอนุกรมสามารถแบ่งเป็นความต้านทานที่บัสบาร์ (Busbar) ความต้านทานที่ฟิงเกอร์ (Finger) ความต้านทานที่อิมิตเตอร์ (Emitter) ความต้านทานที่เบส (Base) และความต้านทานระหว่างเบสและบัสบาร์ด้านหลัง (Back Contact) โดยมีสมมุติฐานของบัสบาร์ (Busbar) มีการเชื่อมต่อตลอดแนว ในที่นี้  $R_{ps}$  เป็นความต้านทานบนพื้นผิว (Sheet Resistance) ของชั้นอิมิตเตอร์ (Emitter) หน่วยเป็น ( $\Omega/\text{cm}^2$ )  $\rho_{cf}$  และ  $\rho_{cr}$  เป็นความต้านทานที่สัมผัสด้านหน้าและด้านหลัง (Contact Resistance) หน่วยเป็น ( $\Omega/\text{cm}^2$ )  $\rho_b$  เป็นความต้านทานที่ฐาน (Base) และ  $\rho_m$  เป็นความต้านทานของโลหะด้านหน้า ความต้านทานอนุกรมในส่วนต่างๆ สามารถหาได้จากสมการแสดงความสัมพันธ์กับมิติความต้านทานผิว ความต้านทานสัมผัส และความต้านทานอื่นๆ แสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการคำนวณหาความต้านทานอนุกรมในส่วนต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์

ส่วนประกอบของความต้านทาน	สัญลักษณ์	สมการ
ความต้านทานที่อิมิตเตอร์ (Emitter Resistance)	$R_e$	$R_e = \frac{R_{sp} d_f}{7l_f}$
ความต้านทานที่เบส (Base Resistance)	$R_b$	$R_b = AW_b \rho_b$
ความต้านทานสัมผัสด้านหน้า (Front Resistance)	$R_{fc}$	$R_{fc} = \frac{\sqrt{R_{sp} \rho_{cf}}}{l_f} \coth \left( w_f \sqrt{\frac{R_{sp}}{\rho_{cf}}} \right)$
ความต้านทานสัมผัสด้านหลัง (Rear Resistance)	$R_{bc}$	$R_{bc} = A \rho_{cr}$
ความต้านทานที่ฟิงเกอร์ (Finger Resistance)	$R_f$	$R_f = \frac{l_f \rho_m}{3t_f W_f}$
ความต้านทานที่บัสบาร์ (Bus Resistance)	$R_{bb}$	$R_{bb} = \frac{\rho_m}{3t_f W_{bb}}$

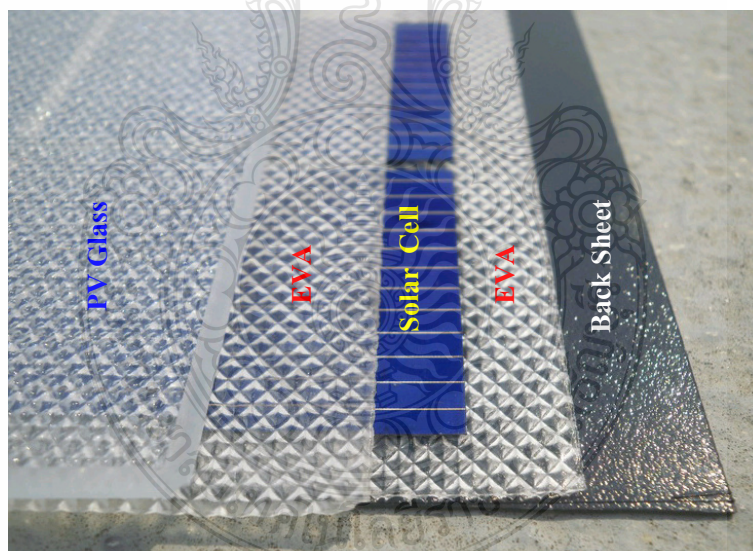
ความต้านทานขนานของเซลล์ในอุดมคติควรมีค่าอนันต์และไม่มีกระแสไหลของกระแสภายในแต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานขนานไม่เป็นไปตามอุดมคติ ความต้านทานขนานที่ต่ำเป็นสาเหตุทำให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าของเซลล์ โดยที่กระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกแบ่งบางส่วนไหลผ่านรอยต่อของเซลล์ ทำให้แรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ความต้านทานขนานมีผลมากที่ความเข้มแสงต่ำ การสูญเสียของกระแสเพราะความต้านทานขนานจึงมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline) และหลายผลึก (Poly Crystalline) มีอยู่ 9 ชนิด ซึ่งค้นพบจากหลายวิธี การวิเคราะห์ภาพทางความร้อน (Lock-In Thermography) การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) ที่มี Electron Beam Induced Current (EBIC) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และ Energy Dispersive X-Ray (EDX) ซึ่งวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ความแตกต่างของความต้านทานขนานเหล่านี้ พิจารณาจากเส้นโค้งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ และรูปร่างลักษณะทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ามีความต้านทานขนาน 6 ชนิด เกิดจากกระบวนการผลิต และอีก 3 ชนิด เกิดจากจุดบกพร่องในวัสดุของการปลูกผลึก สิ่งที่สำคัญที่สุดของ

กรณีแรกคือการตกค้างของอิมิตเตอร์ ที่ขอบของเซลล์ การแตกร้าว การรวมกันของพาหะที่บริเวณขอบเซลล์ การหลุดออกของอ็อนบวกหรืออ็อนลบจากโครงสร้างผลึก การเกิดรอยขีดข่วน และการเกิดอนุภาคของอลูมิเนียมที่ผิวเซลล์ ส่วนความต้านทานขนานที่เกิดในเนื้อวัสดุ มักจะมีการรวมกัน โดยเฉพาะตำแหน่งการโตะของจุดบกพร่อง อาทิ ขอบเกรนตำแหน่งของซิลิกอนไนไตรด์ที่เป็นสารมลทิน และบริเวณชั้นต่างๆที่เกิดจากการตกตะกอนของผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์บนขอบเกรน ภาคตัดขวางของแผ่นเซลล์ ความต้านทานขนาน โดยทั่วไปมาจากความบกพร่องของกระบวนการผลิตมากกว่าการออกแบบเซลล์ที่ไม่ดี

## 2.7 ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุเคลือบประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon) ในอุตสาหกรรมประกอบด้วยแผ่นกระจก (PV Glass) แผ่นฟิล์มอีวีเอ (EVA Film) แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon Solar Cell) และแผ่นปิดด้านหลัง (Back Sheet) แสดงดังภาพที่ 2.12 โดยวัสดุเคลือบเหล่านี้จะวางซ้อนประกบกันในขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2.12 วัสดุเคลือบประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การติดตั้งใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพแวดล้อมที่ประกอบด้วยความร้อน ความชื้น ใอน้ำ ฝุ่น และสารเคมีต่างๆ ที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุเคลือบประกอบแผงเซลล์จึงมีความสำคัญอย่างมาก

ในการห่อหุ้มแผ่นเซลล์เพื่อความสามารถในการรับแสงและปกป้องการทำลายจากสภาพแวดล้อมภายนอกวัสดุเคลือบประกอบแผงเซลล์มีชั้นส่วนและหน้าที่ดังนี้

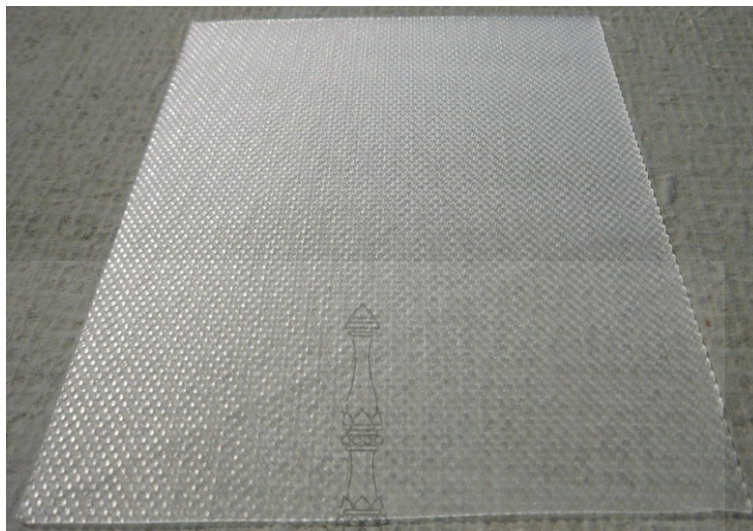
1. กระจกปิดด้านหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Low Iron Tempered Patterned Glass) คือ กระจกนิรภัยที่มีส่วนผสมของเหล็กต่ำ ผิวด้านหนึ่งขรุขระอีกด้านหนึ่งเรียบ มีความหนา 3.2 มิลลิเมตร เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง (Mechanical Rigidity) มีสมบัติทนต่อแรงกระแทก (Impact Resistance) สูงกว่ากระจกธรรมดา 3 ถึง 5 เท่า โปร่งใสต่อแสง (Optical Transparency) แสงส่องผ่าน (Light Transmission) มากกว่าคิดเป็นร้อยละ 90 เป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical Isolation of The Solar Cell Circuit) ทนต่อสภาพกลางแจ้ง (Outdoor Weather Ability) และมีความปลอดภัยเมื่อแตกกระจกจะเป็นชิ้นเล็กๆ เหมือนเม็ดข้าวโพดไม่แหลมคมแสดงดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 กระจกประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2. แผ่นฟิล์มอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate Film; EVA Film) มีหน้าที่ห่อหุ้มเซลล์หรือเคลือบ (Laminate) เซลล์ให้ยึดติดกับกระจกและแผ่นวัสดุปิดด้านหลัง มีสมบัติต่อต้านการซึมผ่านของความชื้น แสงส่องผ่านได้ดี ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือ รังสียูวี (Ultraviolet; UV) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีการยึดเกาะระหว่างวัสดุและสามารถยึดหยุ่นได้ดีเนื่องจากการหดและขยายตัวของเซลล์กับกระจกที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 2.14



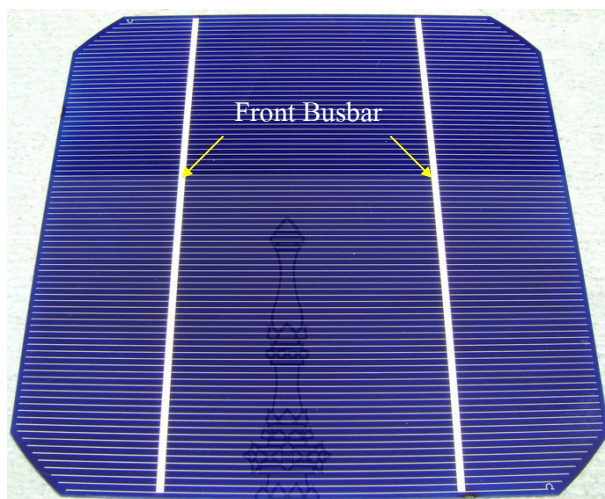


ภาพที่ 2.14 แผ่นฟิล์มอีวีเอ (EVA Film)

3. แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon Solar Cell) คือสารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตเป็นแผ่นบางบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Single Crystalline Silicon หรือ Mono Crystalline Silicon) แสดงดังภาพที่ 2.15 และชนิดผลึกรวมซิลิกอน (Poly Crystalline Silicon หรือ Multi Crystalline Silicon) แสดงดังภาพที่ 2.16 ขนาดที่ผลิตใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ  $125 \times 125$  มิลลิเมตร ( $5 \times 5$  นิ้ว) และ  $156 \times 156$  มิลลิเมตร ( $6 \times 6$  นิ้ว) ความหนาของแผ่นเซลล์ประมาณ 180 ถึง 200 ไมครอน ประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) คิดเป็นร้อยละ 16.0 ถึง 18.0 แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) 0.60 ถึง 0.63 โวลต์ แรงดันสูงสุด ( $V_{mp}$ ) 0.50 ถึง 0.53 โวลต์

ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำไปใช้งานในรูปแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module) จะต้องนำแผ่นเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงดันตามระบบที่นำไปใช้งาน การเชื่อมต่อเซลล์ (Soldering) จะใช้ลวดตัวนำไฟฟ้าที่มีลักษณะแบนบาง (Ribbon) ทำจากโลหะทองแดงบริสุทธิ์ (Purity Copper) คิดเป็นร้อยละ 99.99 เคลือบด้วยโลหะผสมดีบุกและตะกั่ว คิดเป็นร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า (Conductive) เชื่อมต่อระหว่างบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์แรกกับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์ถัดไปและเชื่อมต่อกันไปจนครบวงจร ภายในแผงเดียวกัน โดยการเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับแถบโลหะ (Busbar) ของแผ่นเซลล์ ใช้อุณหภูมิในการเชื่อมต่ออยู่ในช่วง 380 ถึง 400 องศาเซลเซียส



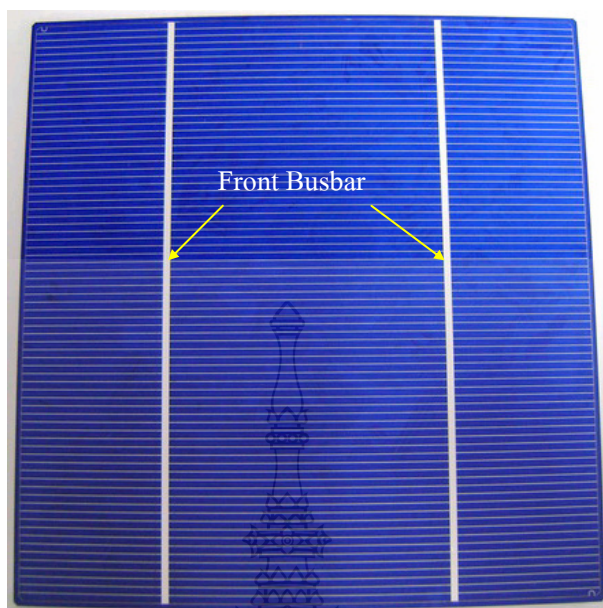


(ก) ด้านหน้าเซลล์ (ขั้วลบ)



(ข) ด้านหลังเซลล์ (ขั้วบวก)

ภาพที่ 2.15 แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Mono Crystalline Silicon)



(ก) ด้านหน้าเซลล์ (ขั้วลบ)



(ข) ด้านหลังเซลล์ (ขั้วบวก)

ภาพที่ 2.16 แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน (Multi Crystalline Silicon)

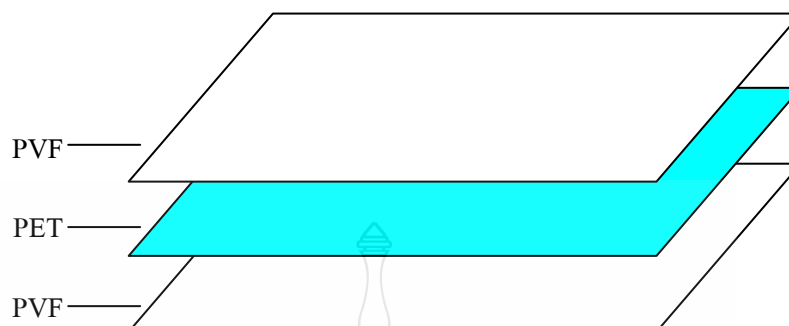
หลักการการทำงานของแผ่นเซลล์เมื่อมีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (Atom) และเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระ เมื่อนำมาต่อครบวงจรจะทำให้เกิดการผลิตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง กระแสที่ผลิตได้จะถูกดึงไปที่แถบโลหะด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์ โดยด้านหน้าเป็นแถบโลหะเส้นเล็กๆ หลายเส้นวางแนวขวางเรียกว่า ฟิงเกอร์ (Fingers) จะนำกระแสส่งไปยังเส้นแถบโลหะใหญ่เรียกว่า บัสบาร์ (Busbar) และไหลไปกับลวดตัวนำไฟฟ้า หรือ รีบบอน เพื่อส่งไปยังเซลล์ที่เชื่อมต่ออนุกรมกัน เพราะฉะนั้นฟิงเกอร์ (Finger) และบัสบาร์ (Busbar) จะต้องบังแสงให้น้อยที่สุดและเป็นตัวนำการไหลของกระแสได้สูง ด้านหน้าของแผ่นเซลล์ต้องเคลือบด้วยสารลดการสะท้อนแสง จากความสำคัญของด้านรับแสงของแผ่นเซลล์โดยเฉพาะเส้นฟิงเกอร์และบัสบาร์จะต้องมีสมบัติทนต่อการไหลของกระแสได้สูง และทนต่อการทำลายของสภาพแวดล้อมคือ ความชื้นและความร้อนจากแสงแดด

4. วัสดุแผ่นปิดด้านหลัง (Back Sheet) คือ วัสดุป้องกันการทำลายเซลล์แสงอาทิตย์จากสภาพแวดล้อม อาทิ ความชื้นและความร้อนจากแสงแดด โดยการซึมผ่านและแผ่รังสีเข้าไปทำลายเซลล์ วัสดุแต่ละชั้นของแผ่นปิดด้านหลังประกอบด้วย พอลิไวนิลฟลูออไรด์ หรือ ทีวีเอฟ (Tedlar® Polyvinyl Fluoride; PVF) และ พอลิเอธิลีนทีเรพทาเลตฟิล์ม (Poly Ethylene Terephthalate; PET)

พอลิไวนิลฟลูออไรด์ฟิล์ม หรือ ทีวีเอฟ (Tedlar® Polyvinyl Fluoride; PVF) คือวัสดุที่เป็นฟลูออโรโพลีเมอร์ฟิล์ม เป็นวัสดุจากบริษัท ดูปอนต์ (Dupont) ที่ขายภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อว่า เทดลาร์ (Tedlar®) มีสมบัติเหนียว มีเสถียรภาพทางแสง ด้านทานทางเคมีและความชื้นได้ดี

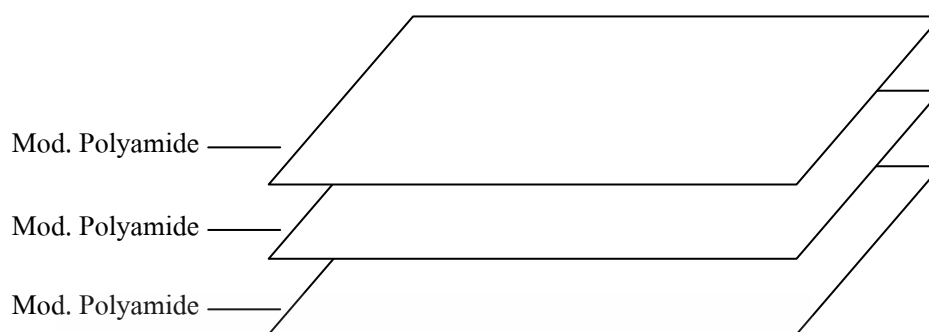
พอลิเอธิลีนทีเรพทาเลตฟิล์ม หรือ พีอีที หรือ เพท (Poly Ethylene Terephthalate; PET) หรือ ไมลาร์ เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง มีสมบัติแข็งแรง คงทนและคงตัวทุกสภาพทำให้ด้านทานการดูดซึมและแทรกซึมผ่านของความชื้น ก๊าซและเคมีได้ดี มีค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกสูง (Dielectric Constant) สามารถกักเก็บประจุหรือพลังงานไฟฟ้าได้ดีจึงมีค่าฉนวนทางไฟฟ้าสูง

ส่วนใหญ่วัสดุแผ่นปิดด้านหลังจะมีโครงสร้างสามชั้นคือ PVF / PET / PVF เป็นการใชพอลิไวนิลฟลูออไรด์ฟิล์ม หรือ ทีวีเอฟ ป้องกันทั้งสองด้านของพอลิเอสเตอร์ฟิล์มหรือเพท จากการเสื่อมสภาพทางแสง (Photo Degradation) และการรวบรวมสมบัติที่ดีของวัสดุทีวีเอฟ คือ ค่าการซึมผ่านของความชื้นลดต่ำลง และเพท คือ ค่าการฉนวนทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) เพิ่มสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แผ่นปิดด้านหลังโครงสร้างเป็นพีวีเอฟและพีอีที

ปัจจุบันมีผู้ผลิตหลายรายพยายามปรับปรุงพัฒนา คัดค้นหาวัสดุอื่นมาทดแทนวัสดุที่มีการใช้อยู่เดิม เพื่อต้องการให้วัสดุแผ่นปิดด้านหลังมีสมบัติป้องกันแผ่นเซลล์และต้านทานการทำลายจากสภาพแวดล้อมได้สูงขึ้น ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น ลดค่าใช้จ่ายจากต้นทุนการผลิตและค่าลิขสิทธิ์ของผู้ผลิตเทดลาร์ (Tedlar®) อาทิ บริษัท BS-A ได้มีการศึกษาและพัฒนา โพลีเอไมด์ หรือ พีเอ (Polyamide; PA) คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกวิศวกรรม ซึ่งมีสมบัติทนอุณหภูมิสูงได้ดี เพราะจุดหลอมเหลวสูง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส และมีสมบัติเด่น คือ เหนียวและแข็งแรง ต้านทานแรงดึงและแรงฉีกขาดได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนและการเสียดสีไม่เสีรูปทรงง่าย สามารถยืดหยุ่น (Flexible) และทนการบิดพับงอได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและกลิ่นต่างๆ ได้ แต่มีสมบัติด้อยคือ ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้น้อย ความแข็งแรงและการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น จากข้อด้อยดังกล่าวจึงได้ทำการปรับแต่งโครงสร้างของโพลีเอไมด์ ให้มีสมบัติสามารถป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้สูงขึ้น ทำให้เสถียรทางโครงสร้างและทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โพลีเอไมด์ หรือ พีเอ ที่ได้ปรับแต่งโครงสร้างนี้คือ โมดิไฟด์โพลีเอไมด์ (Modified Polyamide) ทางผู้ผลิตแผ่นปิดด้านหลังใช้วัสดุโมดิไฟด์โพลีเอไมด์แทนวัสดุพีวีเอฟและพีอีที โดยใช้โครงสร้าง โมดิไฟด์โพลีเอไมด์ทั้ง 3 ชั้น แสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 แผ่นปิดด้านหลังโครงสร้างเป็นโพลิเอไมด์

5. กรอบ (Frame) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นโครงสร้างภายนอกที่ทำจากโลหะอลูมิเนียมชุบแข็ง (Anodized Aluminum) มีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอก อีกทั้งยังปกป้องโครงสร้างภายในจากการกระแทกภายนอก แสดงดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 กรอบโลหะ (Frame) อลูมิเนียมชุบแข็ง (Anodized Aluminum)

6. กล่องรวมสาย (Junction Box) เป็นกล่องอุปกรณ์สำหรับติดตั้งวงจรเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย สายไฟสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 เส้น (ขั้วบวกและขั้วลบ) พร้อมหัวต่อสายตัวผู้และตัวเมีย และติดตั้งไดโอดบายพาส (By Pass Diode) อยู่ภายในเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดจุดความร้อนในแผ่นเซลล์ (Hot Spot) ในกรณีที่เซลล์ใดเซลล์หนึ่งในแผงนั้นถูกเงาบดบัง เนื่องจากเซลล์ข้างเคียงจะส่งผ่านแรงดันมายังเซลล์ที่ถูกเงาบดบังอาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ แสดงดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 กล่องรวมสาย (Junction Box) สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์



## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Schneider, L. Rubin, G. Rubin, A. Osipov, A. Smirnov and P. Antipov, ได้ศึกษาวิจัย เรื่อง “A New Approach in Solar Cell Module Interconnection Technique Resulting in 5-10% Higher PV Module Power Out Put,” [5] นำเสนอเทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์แบบใหม่โดยวิธีการหลอมติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ ในขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์ ทำให้การยึดติดของหน้าสัมผัสระหว่างริบบอนกับ บัสบาร์แน่นดึขึ้น จำนวนแผ่นเซลล์แตกลดลง ลดความต้านทานอนุกรม ส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าด้านขาออกเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 5 ถึง 10 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยวิธีบัดกรีโดยตรง

R. Klengel, M. Petzold, D. Schade and B. Sykes, ได้ศึกษาวิจัย “Improved Testing of Soldered Busbar Interconnects on Silicon Solar Cells,” [6] ได้ทำการปรับปรุงการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดปัญหาเซลล์แตก โดยการทดลองเชื่อมต่อเซลล์และตรวจสอบการยึดติดของริบบอนเพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่อุณหภูมิการเชื่อมแตกต่างกัน

S. Schindler and S. Wiese, ได้ศึกษาวิจัย “Investigation of Wettability and Interface Reactions of Sn-Pb, Sn-Cu, Sn-Ag and Sn-Ag-Cu Solders for Solar Cell Interconnections,” [7] ได้ทำการทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวอย่างริบบอนทองแดงที่เคลือบโลหะผสมที่แตกต่างกัน อาทิ ดีบุกกับตะกั่ว ดีบุกกับทองแดง ดีบุกกับเงิน และดีบุก เงินและทองแดง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น

Fu-Ming Lin, Cheng-Yu Peng, Ray-Chien Lai, Fang-Yao Yeh and Wen-Ching Sun, ได้ศึกษาวิจัย “Performance Determination of Cell String by Measuring the Series Resistance Associated with the Soldering Ribbon and Soldering Temperature,” [8] ได้ทำการทดสอบริบบอนและอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์เพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนและวิธีการดำเนินการในส่วนต่างๆ ภายในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเซลล์ หลักการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อเซลล์ ตัวพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์ กำหนดค่าควบคุมพารามิเตอร์สำหรับแผงเซลล์ตัวอย่าง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเซลล์

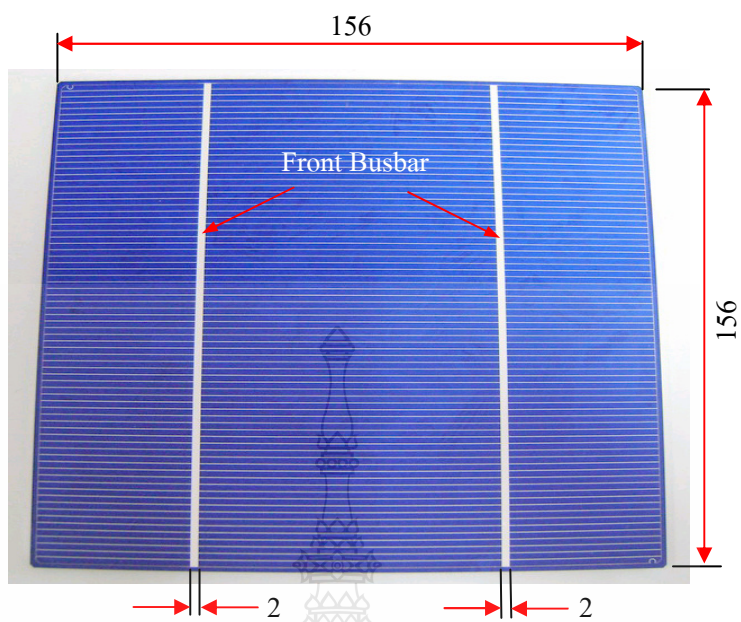
1. หัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Station) สำหรับเชื่อมต่อเซลล์ ยี่ห้อ XYTRONIC กำลังไฟฟ้าขาออก 80 วัตต์ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 200 ถึง 480 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 3.1



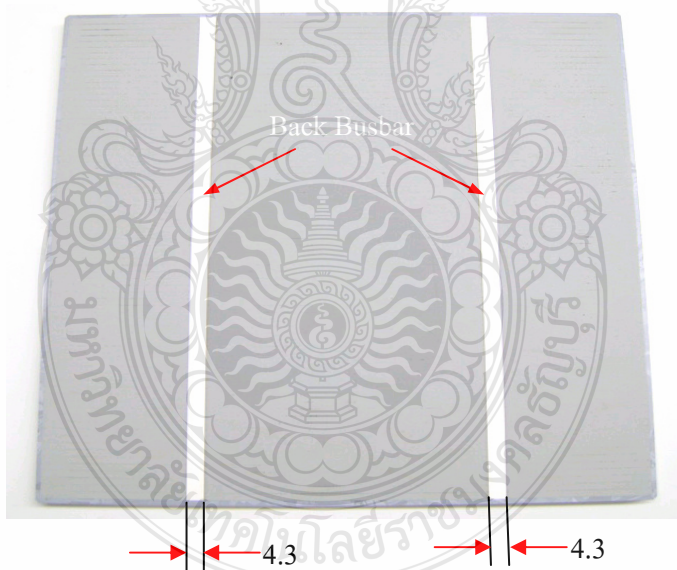
ภาพที่ 3.1 หัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Station) สำหรับเชื่อมต่อเซลล์

2. แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ยี่ห้อ MOTECH ขนาดความกว้าง 156×156 มิลลิเมตร ขนาดความหนา 200 ไมครอน ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) ของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ 3.85 วัตต์ ประสิทธิภาพของแผ่นเซลล์ ( $\eta$ ) คิดเป็นร้อยละ 15.8 แสดงดังภาพที่ 3.2





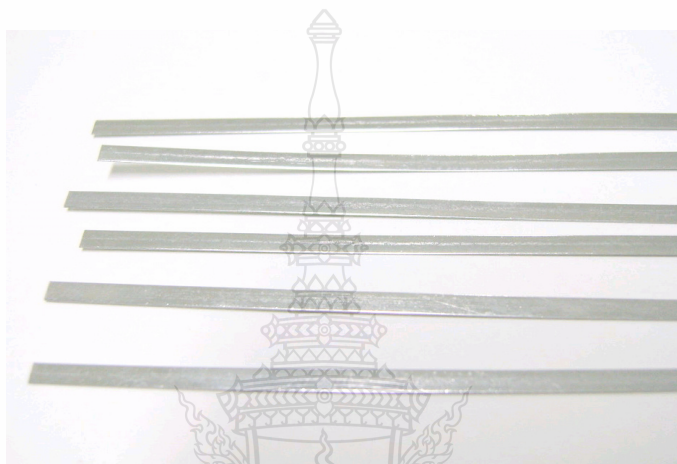
(ก) ภาพด้านหน้าเซลล์



(ข) ภาพด้านหลังเซลล์

ภาพที่ 3.2 แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน

3. ลวดตัวนำไฟฟ้า (Conductive Wire) หรือริบบอน (Ribbon) [9] ใช้สำหรับเชื่อมต่อ เซลล์ขนาดพื้นที่หน้าตัด (หนา×กว้าง) คือ  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร และ  $0.24 \times 2.00$  มิลลิเมตร ทำจาก โลหะทองแดง (Copper) ความบริสุทธิ์ (Purity) คิดเป็นร้อยละ 99.99 ค่านำไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 100 IACS (International Annealed Copper Standard) และเคลือบผิวทองแดง 20 ไมครอน ด้วยโลหะผสม ระหว่างดีบุก (Tin; Sn) และตะกั่ว (Lead; Pb) คิดเป็นร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอน (Ribbon) สำหรับเชื่อมต่อเซลล์

4. นาฬิกาจับเวลา สำหรับควบคุมเวลาการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่งปีสบาร์ ในการศึกษา วิจัยการทดลองในครั้งนี้ แสดงดังภาพที่ 3.4

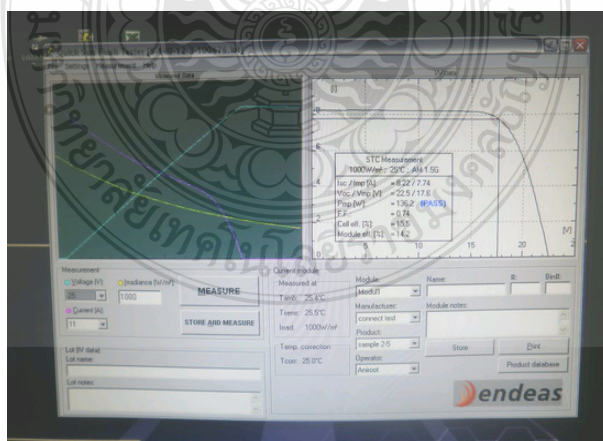


ภาพที่ 3.4 นาฬิกาจับเวลา สำหรับควบคุมเวลาการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่งปีสบาร์

5. เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester) โดยทดสอบด้วยการจำลองแสงอาทิตย์ ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มวลอากาศ (Air Mass; AM) 1.5 แสดงดังภาพที่ 3.5



(ก) ภายในห้องเครื่องทดสอบแผงเซลล์



(ข) คอมพิวเตอร์และหน้าจอแสดงผลการทดสอบ

ภาพที่ 3.5 เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester)

### 3.2 หลักการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อเซลล์

จากการศึกษาเอกสารบันทึกคุณภาพการตรวจสอบกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเลือกและกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับงานวิจัยการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์ในครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

1. การกำหนดค่าอุณหภูมิ (Temperature) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวรีงไฟฟ้า (Soldering Station) โดยการเชื่อมต่อด้วยวิธีการพื้นฐานในการดำเนินการ อุณหภูมิต่ำสุดที่ 380 องศาเซลเซียส การยึดติดของลวดตัวนำไฟฟ้าติดบ้างไม่ติดบ้าง หรือมีการยึดติดและหลุดลอกเท่าๆกันในเวลา 4 ถึง 5 วินาที และที่อุณหภูมิ 410 ถึง 430 องศาเซลเซียส การยึดติดของลวดตัวนำไฟฟ้าระหว่างบัสบาร์ด้านหลังเซลล์กับพื้นผิวของลวดตัวนำไฟฟ้า ยึดติดเกาะกันสม่ำเสมอ แต่มีปัญหาที่การยึดติดของลวดตัวนำไฟฟ้ากับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์หลุดลอกออกหลังจากการเชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง (Soldering String) ซึ่งมีผลมาจากการให้อุณหภูมิในการเชื่อมต่อที่ด้านหลังเซลล์สูงเกินไป ทำให้ความร้อนถ่ายเทจากด้านหลังเซลล์ลงมาด้านหน้าเซลล์ เป็นผลทำให้เกิดการทำลายการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ (Soldering Tabbing) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมต่อเซลล์ขั้นตอนแรกก่อนการเชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง (Soldering String) ฉะนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาทดลองในกระบวนการผลิตของทางโรงงานควรอยู่ที่ 380, 390 และ 400 องศาเซลเซียส [10]

2. การกำหนดเวลา (Time) ที่ใช้ในการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาจากการปฏิบัติงานของพนักงานในตำแหน่งแทบบิง (Tabbing) และพนักงานในตำแหน่งสตริง (String) ประกอบกับความเหมาะสมระหว่างอุณหภูมิจากหัวรีงไฟฟ้ากับการหลอมละลายของริบบอนทองแดงที่เคลือบด้วยโลหะผสมที่ช่วยในการประสานการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของทั้งริบบอนและบัสบาร์ โดยมีส่วนผสมโลหะระหว่างดีบุก (Tin; Sn) และตะกั่ว (Lead; Pb) คิดเป็นร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ จากการศึกษาข้อมูลจากเอกสารขั้นตอนปฏิบัติงาน ประสบการณ์และทักษะของพนักงานเชื่อมต่อเซลล์ และจากการสังเกตของผู้ทำการวิจัยในครั้งนี้ พบว่าเมื่อลดเวลาการเชื่อมต่อเซลล์ลงเป็น 4 วินาทีต่อระยะการเชื่อมหนึ่งบัสบาร์ ในขณะที่ควบคุมอุณหภูมิของหัวรีงไฟฟ้า 380 องศาเซลเซียส จะมีปัญหาในการยึดติดอย่างเห็นได้ชัดคือ ผิวของริบบอนจะไม่ยึดติดกับผิวของบัสบาร์ของเซลล์ แต่เมื่อใช้เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ ที่ 7 วินาที และควบคุมอุณหภูมิของหัวรีงไฟฟ้าที่ 400 องศาเซลเซียส การยึดติดระหว่างผิวริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ เหนียวแน่นแข็งแรงและมีความสม่ำเสมอ ลักษณะทางกายภาพของเซลล์จะโค้งงอขึ้นเล็กน้อยตามความยาวริบบอนและพบว่าบางเซลล์มีรอยแตกร้าวให้เห็น จากการตรวจสอบด้วยสายตาปัญหามาจากการควบคุมอุณหภูมิในการเชื่อมต่อเซลล์ที่สูงและให้ปริมาณความร้อนที่วัสดุลวดตัวนำไฟฟ้าเพื่อการหลอมละลายของโลหะเคลือบให้ยึดติดกับผิวของบัสบาร์ที่ต่อเนื่องและนานเกินไปเกิดความร้อนสะสมในเซลล์สูงจนเกิด

ความเครียดทำให้เซลล์แตกร้าวในที่สุด และยังเป็นผลให้เกิดการทำลายการยึดติดระหว่างริบบอนกับ บัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ (Soldering Tabbing) และเมื่อทดลองลอกดึงริบบอนออกจากบัสบาร์ของเซลล์ สังเกตพบผิวของบัสบาร์ที่เหลืออยู่เป็นสีดำคล้ายรอยไหม้ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ความเข้มของสีจะจางลงมากกว่า ดังนั้นจากการศึกษาข้อมูลและการปฏิบัติจริงใน กระบวนการผลิตของทางโรงงานจึงกำหนดค่าพารามิเตอร์ สำหรับเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ ระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ โดยใช้เวลาการเชื่อมต่อเซลล์เทียบต่อระยะ 1 บัสบาร์ หรือระยะ ความยาว 156 มิลลิเมตร ฉะนั้นในการควบคุมเวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ในการศึกษาการทดลองครั้งนี้ คือ 4, 5, 6 และ 7 วินาที

3. การกำหนดขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้า (Conductive Size) จากการศึกษาในข้อมูลการ ตรวจสอบคุณภาพของกระบวนการผลิต และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าเมื่อต้องการให้กระแสที่ เกิดขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการไหลที่ดีขึ้นหรือเพิ่มขึ้น จะต้องเพิ่มขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้าหรือ ริบบอนที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์อนุกรมกันภายในแผงแสงอาทิตย์ (PV Module) ให้มีขนาด ใหญ่หรือโตขึ้น จะยิ่งดีแต่เชิงปฏิบัติกระทำเช่นนั้นไม่ได้ เพราะถูกจำกัดลักษณะทางกายภาพของ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผู้ผลิตได้ออกแบบและจัดทำขึ้นมาคือ เส้นแถบโลหะด้านหน้าเซลล์ (Front Busbar) ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับริบบอน มีความกว้างในแต่ละซี่ห่อ ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นไม่ สามารถที่จะเพิ่มความกว้างของริบบอนให้มากกว่านี้ได้ เพราะขนาดของริบบอนจะบดบังแสงอาทิตย์ ทำให้พื้นที่การรับแสงของเซลล์ลดลง และเป็นผลทำให้กำลังไฟฟ้าของเซลล์ลดลง และมีผู้ผลิตแผง เซลล์แสงอาทิตย์บางรายต้องการเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์ให้สูงขึ้น โดย การเพิ่มความหนาของริบบอน ผลการทดลองพบว่าต้องปรับเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นกว่าเดิม เพื่อให้ สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างการหลอมละลายของริบบอนกับเวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ ถึงแม้ว่าขณะเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอนกับผิวของบัสบาร์จะไม่มีปัญหา แต่ หลังจากการเชื่อมต่อเซลล์ผ่านไปสังเกตพบว่าแผ่นเซลล์โค้งงอขึ้นตามความยาวของเซลล์เล็กน้อย ในขณะที่เซลล์โค้งงอก็ทำให้การยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์หลุดลอกออกในบางจุด และในบางเซลล์พบร่องรอยการแตกร้าว ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นมาจากการใช้อุณหภูมิสูงมากเกินไป ทำให้ ความร้อนสะสมในเซลล์มากจนเกิดความเครียดและแตกในที่สุด ส่วนริบบอนที่มีความหนาเพิ่มขึ้นทำ ให้ต้องเพิ่มอุณหภูมิของหัวแรงไฟฟ้าให้สูงขึ้นตามไปด้วยและริบบอนที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะมี สมบัติที่แข็งแกร่งหรือการให้ตัวที่ไม่ดี จึงมีผลต่อการยึดตัวออกจากพื้นผิวของบัสบาร์ และการ ใช้ริบบอนที่มีความหนาสูงเกินไป ยังพบปัญหาแผ่นเซลล์แตกร้าวจากริบบอนกดทับในกระบวนการ กดเคลือบแผงเซลล์ ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของเครื่องเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากข้อมูลที่ได้

ทำการศึกษาจากกระบวนการผลิตและจากวัสดุที่ใช้ภายในโรงงาน ขนาดลวดตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการทดลองครั้งนี้มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (หนา × กว้าง) คือ 0.20×2.00 มิลลิเมตร และ 0.24×2.00 มิลลิเมตร [11-13]

### 3.3 ตัวพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์

จากการศึกษาตามหลักการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลในเอกสาร ขั้นตอนปฏิบัติงาน การควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิต และเอกสารที่เกี่ยวข้อง สามารถกำหนดค่าตัวพารามิเตอร์สำหรับงานวิจัยศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์ได้ดังนี้

1. ควบคุมค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ (Temperature) ที่ใช้สำหรับการทดลองในตัวอย่างเชื่อมต่อเซลล์ ประกอบด้วย 3 ค่า คือ 380, 390 และ 400 องศาเซลเซียส
2. ควบคุมค่าพารามิเตอร์เวลา (Time) ต่อระยะเวลาการเชื่อมหนึ่งบัสบาร์ ที่ใช้สำหรับการทดลองในตัวอย่างเชื่อมต่อเซลล์ ประกอบด้วย 4 ค่า คือ 4, 5, 6 และ 7 วินาที
3. ควบคุมค่าพารามิเตอร์ขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้า (Conductive Wire Size) หรือขนาดของริบบอน ที่ใช้สำหรับการทดลองในตัวอย่างเชื่อมต่อเซลล์ ประกอบด้วย 2 ขนาด คือ 0.20×2.00 มิลลิเมตร และ 0.24×2.00 มิลลิเมตร

### 3.4 กำหนดค่าควบคุมพารามิเตอร์สำหรับแผงเซลล์ตัวอย่าง

การกำหนดค่าควบคุมพารามิเตอร์ในแต่ละตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อการศึกษาทดลองการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยครั้งนี้ มีรายละเอียดแสดงดัง ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าควบคุมพารามิเตอร์ในแต่ละตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวอย่าง แผงเซลล์	การควบคุมค่าพารามิเตอร์		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาต่อหนึ่งบัสบาร์ (วินาที)	ขนาดริบบอน (มิลลิเมตร)
1	380	4	0.20×2.00
2	380	5	0.20×2.00
3	380	6	0.20×2.00
4	380	7	0.20×2.00
5	390	4	0.20×2.00

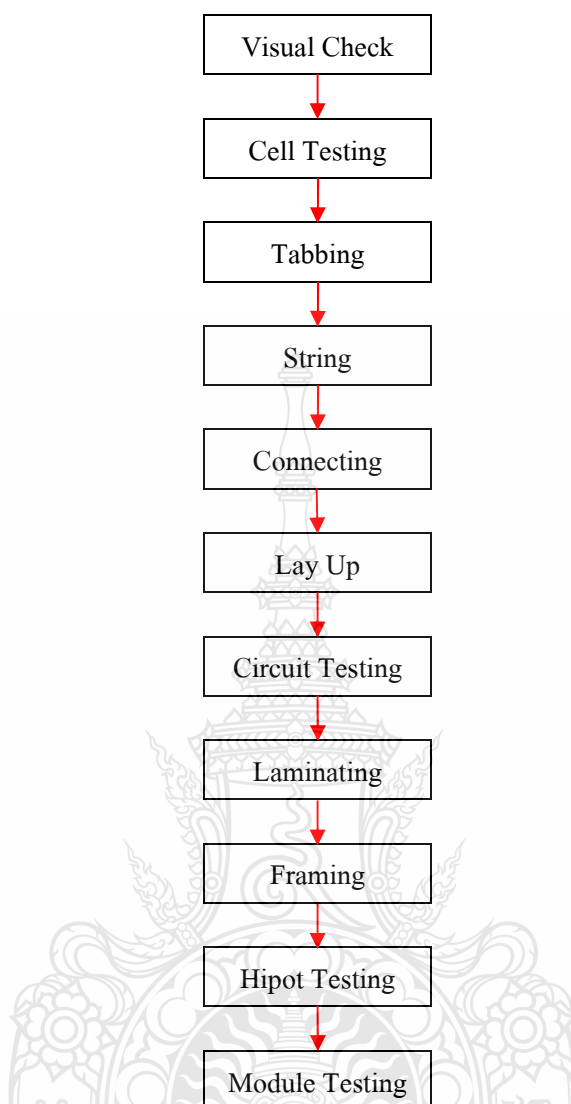


ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าควบคุมพารามิเตอร์ในแต่ละตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ตัวอย่าง แผงเซลล์	การควบคุมค่าพารามิเตอร์		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาต่อหนึ่งบัสบาร์ (วินาที)	ขนาดริบบอน (มิลลิเมตร)
6	390	5	0.20×2.00
7	390	6	0.20×2.00
8	390	7	0.20×2.00
9	400	4	0.20×2.00
10	400	5	0.20×2.00
11	400	6	0.20×2.00
12	400	7	0.20×2.00
13	380	4	0.24×2.00
14	380	5	0.24×2.00
15	380	6	0.24×2.00
16	380	7	0.24×2.00
17	390	4	0.24×2.00
18	390	5	0.24×2.00
19	390	6	0.24×2.00
20	390	7	0.24×2.00
21	400	4	0.24×2.00
22	400	5	0.24×2.00
23	400	6	0.24×2.00
24	400	7	0.24×2.00

### 3.5 ขั้นตอนการปฏิบัติศึกษาทดลองการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

รายละเอียดวิธีดำเนินการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นที่ขั้นตอนเกี่ยวกับการเชื่อมต่อเซลล์เป็นหลัก คือ ขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์แทบบิง (Tabbing) และสตริง (String) ด้วยวิธีใช้หัวแร้งไฟฟ้า และการควบคุมตัวพารามิเตอร์ (Parameter) ส่วนขั้นตอนอื่นๆของกระบวนการผลิต (Process) จะปฏิบัติและดำเนินการตามกระบวนการผลิตของทางโรงงาน เพื่อให้สอดคล้องกับขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงของกระบวนการผลิต

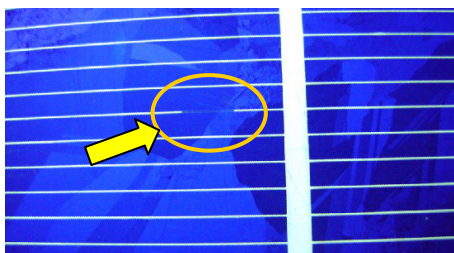


ภาพที่ 3.6 แผนผังกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

จากแผนผังกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ดังแสดงในภาพที่ 3.6 สามารถลำดับขั้นตอนการปฏิบัติศึกษาทดลองการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังต่อไปนี้

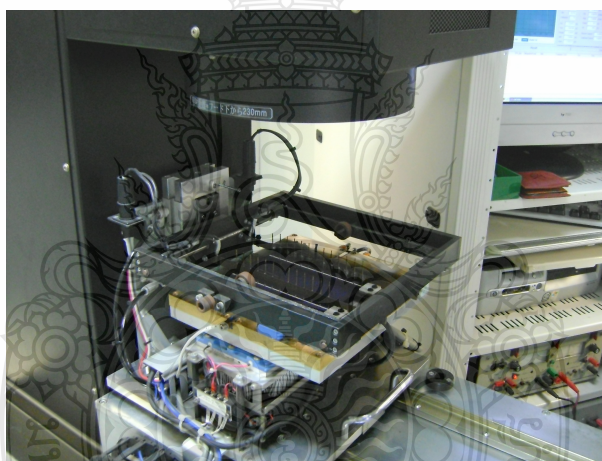
1. ขั้นตอนตรวจสอบตัวอย่างแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา (Visual Check) คือ การตรวจสอบหาร่องรอยการแตกร้าวและ สิ่งผิดปกติทางด้านกายภาพต่างๆ ทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผ่นเซลล์ อาทิ พบรอยบิ่น แตกหรือร้าว ที่บริเวณมุมและขอบของเซลล์ เส้น โลหะฟิงเกอร์และ บัสบาร์มีรอยสนิมขึ้นหรือ เส้นขาดไม่ต่อเนื่องในบางจุด แสดงดังภาพที่ 3.7 เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมีค่าลดลง [14]





ภาพที่ 3.7 เส้นโลหะฟิงเกอร์ไม่ต่อเนื่องหนึ่งจุด

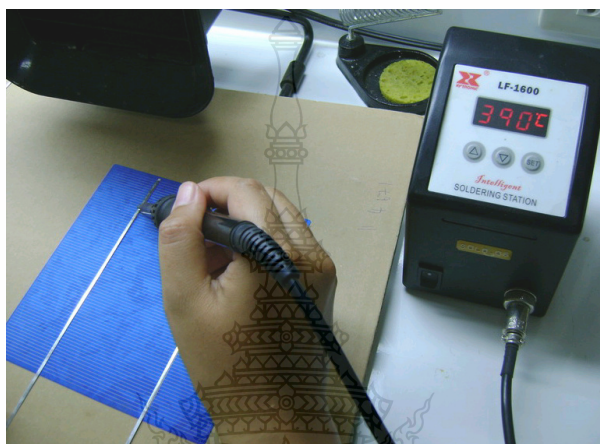
2. ขั้นตอนทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ (Cell Testing) ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ (Cell Tester) แสดงดังภาพที่ 3.8 เพื่อตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์ให้มีค่าตรงกับที่ออกแบบไว้สำหรับศึกษาทดลองในครั้งนี้ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3.83 วัตต์



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Cell Tester)

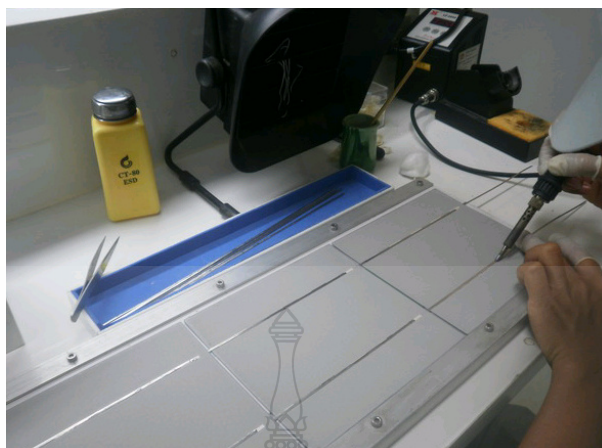
3. ขั้นตอนการทดลองเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์ หรือ ขั้นตอนแทบบิง (Tabbing) แสดงดังภาพที่ 3.9 คือ การนำแผ่นเซลล์ตัวอย่าง จำนวน 36 เซลล์ ของตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 1 มาเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอนกับบัสบาร์ด้านหน้าของเซลล์ โดยการควบคุมอุณหภูมิที่ 380 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ 4 วินาที และใช้ลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร บันทึกผลการทดลอง ตรวจสอบการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ และสังเกตร่องรอยการแตกร้าวของเซลล์ เมื่อเสร็จจากขั้นตอนแทบบิงแล้ว

นำเซลล์ที่ผ่านการเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์ ส่งต่อไปยังขั้นตอนการทดลองเชื่อมต่อด้านหลังเซลล์อนุกรมกันเป็นแถว หรือ ขั้นตอนสตริง (String) ส่วนการเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์ของแผ่นเซลล์ในตัวอย่างแผงที่ 2 จนถึง แผงที่ 24 ได้ควบคุมค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 และปฏิบัติการทดลองตามข้อ 3. พร้อมบันทึกผลการทดลองเหมือนกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 1



ภาพที่ 3.9 การเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์ หรือ แทบปิ้ง (Tabbing)

4. ขั้นตอนการทดลองเชื่อมต่อด้านหลังเซลล์ หรือ ขั้นตอนสตริง (String) แสดงดังภาพที่ 3.10 คือ การนำแผ่นเซลล์ที่ผ่านการเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์ หรือ ขั้นตอนแทบปิ้ง เรียบร้อยแล้วของตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 1 มาทดลองเชื่อมต่อระหว่างปลายริบบอนกับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์ โดยการนำปลายริบบอนของเซลล์แผ่นแรกเชื่อมต่อกับบัสบาร์ด้านหลัง (Back Busbar) ของเซลล์ถัดไปซึ่งเป็นขั้วบวกให้ต่ออนุกรมกันเป็นแถวๆ ละ 9 เซลล์ จำนวน 4 แถว โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 380 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ 4 วินาทีต่อบัสบาร์ และใช้ลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอนขนาด  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ค่าเดียวกันกับขั้นตอนแทบปิ้ง ระหว่างทดลองได้เก็บข้อมูลพร้อมบันทึกผลการทดลอง ตรวจสอบการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์ และสังเกตร่องรอยการแตกร้าวของเซลล์ เมื่อเสร็จจากขั้นตอนสตริงแล้ว นำแผ่นเซลล์ที่ต่อกันเป็นแถวๆ ทั้ง 4 แถว ส่งต่อไปยังขั้นตอนการต่อวงจรไฟฟ้า (Connecting) ส่วนการเชื่อมต่อด้านหลังเซลล์ของแผ่นเซลล์ในตัวอย่างแผงที่ 2 จนถึง แผงที่ 24 ได้ควบคุมค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 และปฏิบัติการทดลองตามข้อ 4. พร้อมบันทึกผลการทดลองเหมือนกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 1



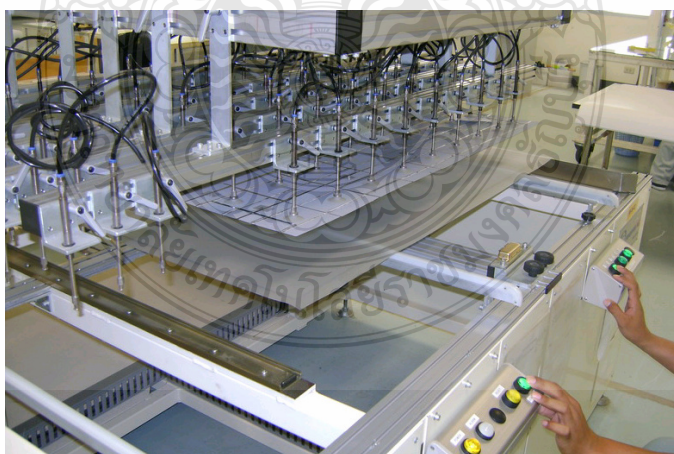
ภาพที่ 3.10 การเชื่อมต่อด้านหลังเซลล์อนุกรมกันเป็นแถว หรือ สตริง (String)

5. ขั้นตอนการต่อวงจรไฟฟ้า (Connecting) แสดงดังภาพที่ 3.11 คือ นำแถวเซลล์ (String) แต่ละแถวที่ได้จากขั้นตอนสตริงมาต่อวงจรอนุกรมกันโดยการเชื่อมต่อริบบอนที่ปลายแถวแรกกับต้นริบบอนของแถวถัดไปต่ออนุกรมกันจนครบทุกแถวและต่อต้นริบบอนของแถวแรก (ขั้วบวก) และต่อปลายริบบอนของแถวสุดท้าย (ขั้วลบ) ออกไปยังจุดต่อด้านหลังแผงเซลล์เพื่อเตรียมต่อเข้ากับกล่องรวมสาย (Junction Box) การต่อวงจรไฟฟ้าในขั้นตอนนี้ไม่มีผลต่อการศึกษารทดลองการเชื่อมต่อเซลล์เพราะเป็นการเชื่อมต่อระหว่างริบบอนกับริบบอน



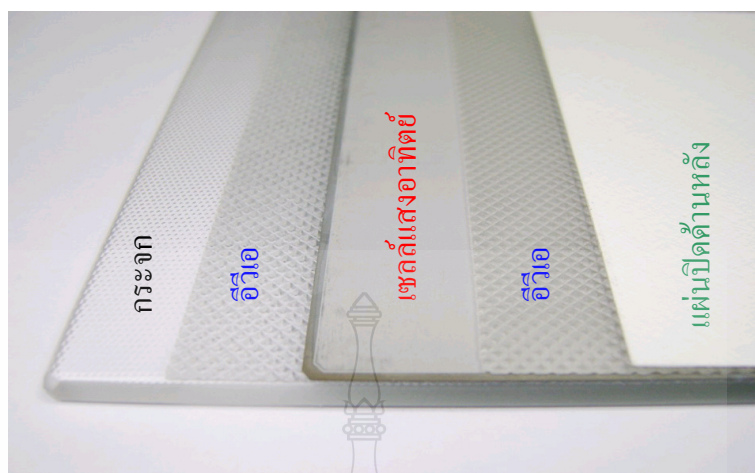
ภาพที่ 3.11 การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า (Connecting) ไปยังกล่องรวมสาย

6. ขั้นตอนจัดวางวัสดุเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Lay Up) แสดงดังภาพที่ 3.12 คือ การจัดวางวัสดุเคลือบแผงเซลล์ ซึ่งประกอบด้วย กระจก (PV Glass) แผ่นฟิล์มอีวีเอ (EVA Film) แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ (Crystalline Solar Cell) และแผ่นปิดด้านหลัง (Back Sheet) แสดงดังภาพที่ 3.13 โดยชั้นล่างสุดจัดวางกระจกสำหรับประกอบแผงเซลล์ (Low Iron Tempered Patterned Glass) เป็นกระจกที่มีส่วนผสมของโลหะเหล็กดำ ผิวด้านหนึ่งขรุขระอีกด้านหนึ่งเรียบ มีความหนา 3.2 มิลลิเมตร และอบความร้อน (Tempering) เพื่อทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทนแรงกระแทกสูงกว่ากระจกธรรมดา 3 ถึง 5 เท่า มีความปลอดภัยเมื่อแตกกระจกจะเป็นชิ้นเล็กๆ เหมือนเม็ดข้าวโพด ไม่แหลมคมและแสงส่องผ่าน (Light Transmission) มากกว่าร้อยละ 90 ชั้นที่สองวางแผ่นวัสดุฟิล์มอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate; EVA) บนแผ่นกระจก สมบัติของฟิล์มอีวีเอ คือ ฟิล์มเคลือบป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือ รังสียูวี (Ultraviolet; UV) ป้องกันความชื้น ให้แสงส่องผ่านได้ดี และยึดติดเหนียวแน่นดีกับกระจก แผ่นเซลล์และแผ่นปิดด้านหลัง (Back Sheet) ช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ชั้นที่สามวางแผงเซลล์ลงบนแผ่นฟิล์มอีวีเอ โดยให้ด้านหน้าเซลล์คว่ำลงบนแผ่นฟิล์มอีวีเอ ชั้นที่สี่วางแผ่นฟิล์มอีวีเอ อีกแผ่นทับบนด้านหลังของแผงเซลล์ และชั้นบนสุดวางวัสดุแผ่นปิดด้านหลัง ที่มีสมบัติป้องกันความชื้นและเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี เพื่อป้องกันการทำลายเซลล์จากสภาพแวดล้อม อาทิ ความชื้นและความร้อนจากแสงแดด โดยการซึมผ่านและแผ่รังสีเข้าไปทำลายเซลล์ วัสดุแต่ละชั้นของแผ่นปิดด้านหลังประกอบด้วย พอลิไวนิลฟลูออไรด์ หรือ พีวีเอฟ (Tedlar® Polyvinyl Fluoride; PVF) และ พอลิเอทิลีนทีเรพทาเลตฟิล์ม (Poly Ethylene Terephthalate; PET)

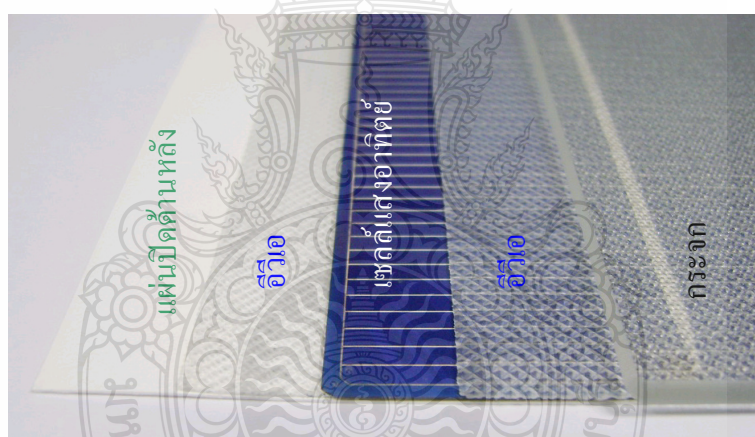


ภาพที่ 3.12 เครื่องจัดวางวัสดุเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Lay Up Machine)





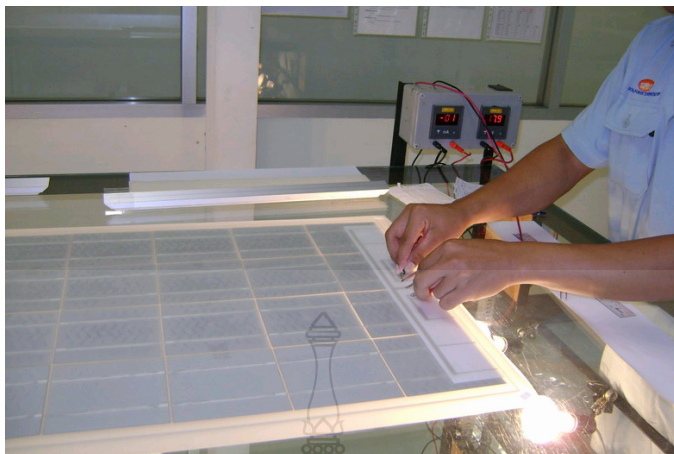
(ก) ภาพมองจากด้านหลังแผงเซลล์สำหรับอ้างอิงในกระบวนการผลิต



(ข) ภาพมองจากด้านหน้าแผงเซลล์สำหรับอ้างอิงในการศึกษา

ภาพที่ 3.13 วัสดุเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

7. ขั้นตอนทดสอบวงจรไฟฟ้า (Circuit Tester) แสดงดังภาพที่ 3.14 เพื่อทวนสอบความถูกต้องของการต่อวงจรไฟฟ้า และตรวจสอบด้วยสายตาสังเกตความผิดปกติอื่นๆ อาทิ แผ่นเซลล์แตกร้าว วัสดุและสิ่งปะปนอื่นๆ เมื่อพร้อมแล้วนำแผงเซลล์ส่งขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์



ภาพที่ 3.14 ทดสอบวงจรไฟฟ้า (Circuit Testing)

8. ขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยเครื่องเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Laminator) แสดงดังภาพที่ 3.15 คือ การเคลือบวัสดุประกอบแผงเซลล์ ได้แก่ กระจก (PV Glass) แผ่นฟิล์มอีวีเอ (EVA Film) แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ (Crystalline Solar Cell) และแผ่นปิดด้านหลัง (Back Sheet) โดยการเคลือบติดเป็นชั้นเดียวกันในระบบสุญญากาศ ซึ่งกระบวนการเคลือบใช้ค่าอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลาทำสุญญากาศ 5 นาที กดเคลือบ (Pass) แผงเซลล์ด้วยแรงกดของบรรยากาศอย่างช้าๆ เป็นเวลา 1 นาที และหน่วงเวลาต่ออีก 10 นาที เมื่อเครื่องลามิเนตทำงานครบกระบวนการเคลือบแล้วนำแผงเซลล์ตัวอย่างออกจากเครื่อง รอจนอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมปกติ แสดงดังภาพที่ 3.16 จากนั้นนำแผงเซลล์ไปยังขั้นตอนเข้ากรอบ (Framing)



ภาพที่ 3.15 เครื่องเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Laminator)



ภาพที่ 3.16 รอกอุนหมุมิตดลงเท่ากับอุนหมุมิเวคดลื้อมปกติ

9. ขั้นตอนเข้ากรอบ (Framing) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ การเข้ากรอบโลหะอลูมิเนียมชุบแข็ง (Anodized Aluminum) เพื่อให้ทนทานต่อการใช้งาน และทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก อีกทั้งยังป้องกันโครงสร้างภายในจากการกระแทกภายนอก หลังจากเข้ากรอบแผงเซลล์เสร็จแล้วติดตั้งกล่องรวมสาย (Junction Box) แสดงดังภาพที่ 3.17

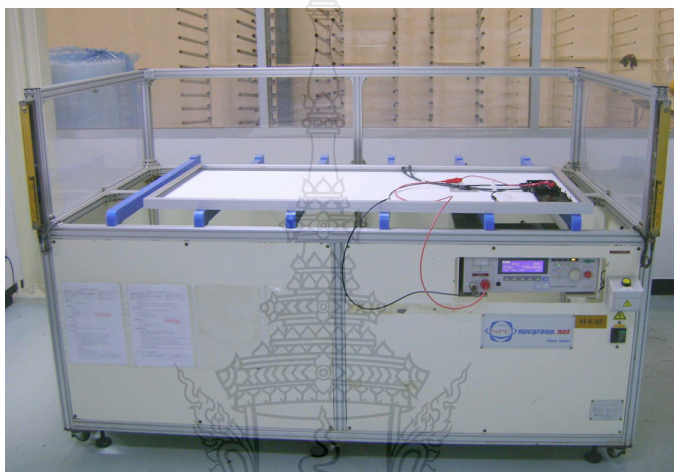


ภาพที่ 3.17 ติดตั้งกล่องรวมสาย (Junction Box)

10. ขั้นตอนทดสอบฉนวนไฟฟ้าด้วยเครื่องทดสอบไฮพอต (Hipot Tester) คือ การทดสอบความทนของฉนวนไฟฟ้าของวัสดุเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผ่นปิดด้านหลัง (Back Sheet) และ



แผ่นฟิล์มอีวีเอ (EVA Film) ที่ผ่านกระบวนการเคลือบมาแล้ว โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage) และกระแสต่ำ (Low Current) ให้กับแผงเซลล์ ด้วยการนำสายไฟขั้วบวกต่อเข้ากับ วงจรไฟฟ้าที่บัสริบบอนของกล่องรวมสายไฟออก (Junction Box) และต่อสายไฟขั้วลบเข้ากับกรอบ อลูมิเนียมของแผงเซลล์ ปรับตั้งค่าแรงดันตามเอกสารข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นปิดด้านหลัง แสดงดังภาพที่ 3.18



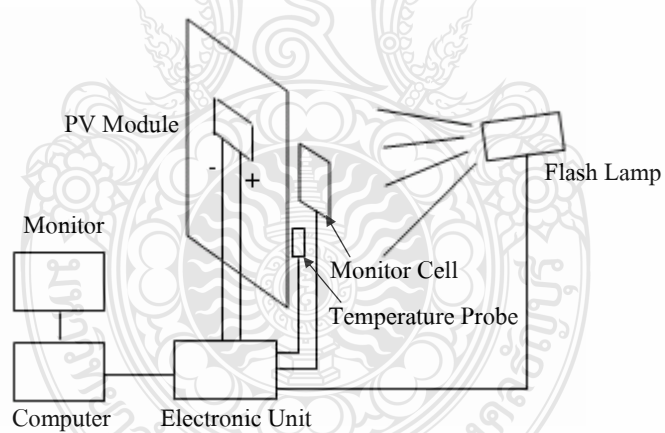
ภาพที่ 3.18 เครื่องทดสอบฉนวนไฟฟ้า (Hipot Tester)

11. ขั้นตอนสุดท้ายการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester) หรือเครื่องทดสอบสมบัติ ทางไฟฟ้าจากการจำลองแสงอาทิตย์ (Sun Simulator) แสดงดังภาพที่ 3.19 ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร มวลอากาศ (Air Mass; AM) 1.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยต่อวงจรการทดสอบแสดงดังภาพที่ 3.20 และนำค่าผลการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์ตัวอย่าง ที่ได้จากเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์มาเป็นผลการทดลองศึกษา การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีใช้หัวแรงไฟฟ้า โดยอาศัยการควบคุมตัวพารามิเตอร์ อุณหภูมิที่ ปลายหัวแรงไฟฟ้า เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งบัสบาร์ และขนาดของลวดตัวนำ หรือริบบอน นำมาเพื่อวิเคราะห์และประเมินการศึกษาร่วมกับปัญหาความเสียหายของแผ่นเซลล์ที่เกิด จากการควบคุมตัวพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อเซลล์ที่ไม่เหมาะสม





ภาพที่ 3.19 เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester)



ภาพที่ 3.20 ไดอะแกรมเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.6 สรุปท้ายบท

วิธีการดำเนินการวิจัยการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ศึกษาวิธีการดำเนินการวิจัยการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานประกอบการทั้งนี้เพื่อต้องการความสอดคล้องกับวิธีการแก้ไขปรับปรุงและการนำไปปฏิบัติใช้ในกระบวนการผลิตของทางโรงงาน โดยการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการปรับปรุงการเชื่อมต่อเซลล์ให้หน้าสัมผัสของลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีการยึดติดที่สม่ำเสมอและต่อเนื่อง โดยใช้เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์ทั้ง 3 คือ อุณหภูมิปลายหัวแรงไฟฟ้า เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ต่อหนึ่งบัสบาร์ และขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้า ซึ่งการศึกษาวิจัยการเชื่อมต่อเซลล์ดังกล่าว จะอยู่ในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์แทบบิง (Tabbing) คือ การเชื่อมต่อริบบอนบนบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ และขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์สตริง (String) คือ การนำแผ่นเซลล์ที่ผ่านการเชื่อมต่อเซลล์แทบบิงมาเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าอนุกรมกันเป็นแถวหรือสตริง หนึ่งสตริงมีจำนวนแผ่นเซลล์ 9 แผ่น หนึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module) ประกอบด้วย 4 สตริง (แถว) และมีจำนวนเซลล์ทั้งหมด 36 แผ่น โดยการเชื่อมต่อริบบอนที่บัสบาร์ด้านหลังเซลล์ ขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์ทั้งสองขั้นตอนที่ดำเนินการวิจัยนี้ เป็น 2 ขั้นตอนที่อยู่ในกระบวนการประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัยอธิบายเฉพาะขั้นตอนการศึกษาวิจัยการเชื่อมต่อเซลล์ โดยเริ่มจากการศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์กับตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 24 ตัวอย่าง ด้วยการควบคุมพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันตามตารางที่ 3.1 ตรวจสอบการยึดติดและจำนวนแผ่นเซลล์แตกในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ของแต่ละตัวอย่างพร้อมบันทึกผลการวิจัย ตรวจสอบและบันทึกผลการวิจัยจำนวนแผ่นเซลล์แตกหลังจากตัวอย่างแผงเซลล์ได้ผ่านขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์แล้ว และทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 24 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester) พร้อมบันทึกผลการวิจัย จากนั้นวิเคราะห์ผลการวิจัยการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดร่วมกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเปรียบเทียบกับ การควบคุมพารามิเตอร์วิธีเดิม

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีการควบคุมพารามิเตอร์ คือ อุณหภูมิ (Temperature) ของหัวแรงไฟฟ้า เวลา (Time) ในการเชื่อมต่อเซลล์ระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และขนาดริบบอน (Ribbon) หรือ ลวดตัวนำไฟฟ้า (Conductive Wire) ที่มีค่าแตกต่างกันตามรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งลำดับผลการทดลองเป็นผลการตรวจสอบการยึดติด และจำนวนเซลล์แตกจากผลของการเชื่อมต่อเซลล์ และผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ตัวอย่างที่ผ่านการทดลองเชื่อมต่อเซลล์โดยวิธีควบคุมพารามิเตอร์

#### 4.1 วิธีศึกษาการทดลองเชื่อมต่อเซลล์

วิธีการทดลองเชื่อมต่อเซลล์เริ่มด้วยการนำแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการคัดเลือกในการตรวจสอบด้วยสายตา และสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมือนกัน ยี่ห้อ MOTECH ขนาด 156×156 มิลลิเมตร ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 3.85 วัตต์ และประสิทธิภาพร้อยละ 15.8 จำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่างแผงเซลล์ ใน 1 ตัวอย่างแผงเซลล์ประกอบด้วยแผ่นเซลล์ 36 แผ่น มาเข้าสู่กระบวนการทดลองเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์ หรือ ขั้นตอนแทบบิง (Tabbing) โดยการนำริบบอนที่มีขนาดตามค่าพารามิเตอร์ในตัวอย่างมาทดลองเชื่อมต่อกับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ (Front Busbar) ควบคุมอุณหภูมิของหัวแรงไฟฟ้า และเวลาในการเชื่อมต่อนำพารามิเตอร์ในแต่ละตัวอย่างตามตารางที่ 4.2 พร้อมสังเกตการณ์ยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ และร่องรอยการแตกร้าวของแผ่นเซลล์ และบันทึกผลการทดลองในตารางที่ 4.2

จากนั้นนำแผ่นเซลล์ที่ผ่านกระบวนการทดลองเชื่อมต่อด้านหน้าเซลล์แล้วทั้ง 36 เซลล์ มาเข้าสู่กระบวนการทดลองเชื่อมต่อด้านหลังเซลล์หรือ ขั้นตอนสตริง (String) โดยการวางเซลล์ให้ด้านหลังเซลล์หงายขึ้นเรียงต่อกันเป็นแถว ในขณะที่วางเรียงต่อกันทีละเซลล์ได้ทดลองเชื่อมต่อระหว่างปลายริบบอนของเซลล์แผ่นที่ 1 กับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์แผ่นที่ 2 และทดลองเหมือนกันกับเซลล์แผ่นถัดไปโดยต่อวงจรอนุกรมกันจนครบ 9 แผ่น ต่อ 1 แถว หรือ 1 สตริง การควบคุมอุณหภูมิของหัวแรงไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมต่อนำพารามิเตอร์ในแต่ละตัวอย่างตามตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นค่าเดียวกับกระบวนการทดลองเชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า พร้อมสังเกตการณ์ยึดติดของรอยเชื่อมต่อระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหลัง และร่องรอยการแตกร้าวของแผ่นเซลล์ และบันทึกผลการทดลองในตารางที่ 4.2

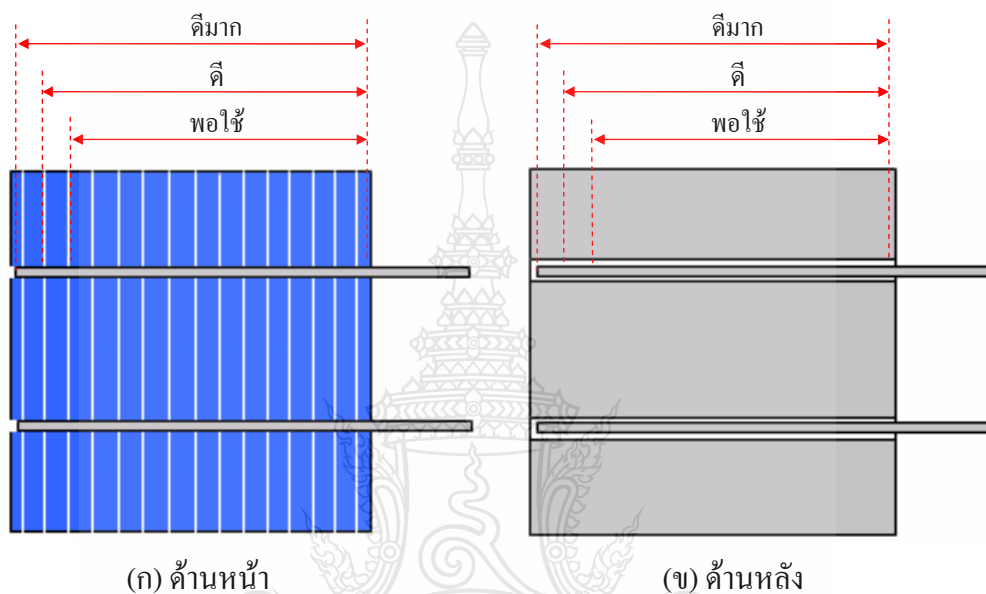
ตรวจสอบด้วยสายตาหาร่องรอยการแตกร้าวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลมาจากการควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อเซลล์ สำหรับตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการเคลือบแผงเซลล์ และบันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 4.2 ซึ่งการศึกษาทดลองการเชื่อมต่อเซลล์ในครั้งนี้ได้ปฏิบัติตามการทดลองตามค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวอย่างทั้งหมด 24 ตัวอย่าง และตรวจสอบบันทึกผลการทดลองเหมือนกันทุกตัวอย่าง

#### 4.2 การกำหนดเกณฑ์ตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อเซลล์

การกำหนดเกณฑ์ในการตรวจสอบการยึดติดระหว่างรีบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ได้พิจารณาจากผลการตรวจสอบในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนที่จะมีการดำเนินการศึกษาทดลองในครั้งนี้ การควบคุมค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 410 ถึง 430 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อประมาณ 6 วินาที จากการสังเกตพบว่าการควบคุมค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว เป็นการให้ความร้อนในการเชื่อมต่อเซลล์ที่สูง และเป็นเวลานานเกินไปจนบางครั้งทำให้แผ่นเซลล์แตกร้าวในขณะที่เชื่อมต่อ และทำให้การยึดติดระหว่างรีบบอนกับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ ต้องถูกทำลายจากความร้อนที่ถ่ายเทจากบัสบาร์ด้านหลังเซลล์ ในขณะที่เชื่อมต่อด้านหลังเซลล์ หรือ ขั้นตอนสตรึง ทำให้การยึดติดระหว่างรีบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ด้านหน้าหลุดลอกออกจากบัสบาร์ประมาณ 1 ถึง 2 จุด จุดหนึ่งระยะประมาณ 8 ถึง 10 มิลลิเมตร รวมแล้วเฉลี่ยไม่เกิน 16 ถึง 20 มิลลิเมตร ต่อหนึ่งบัสบาร์ เป็นผลทำให้การผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกระบวนการผลิตก่อนการศึกษาทดลองในครั้งนี้ ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์ 133.1 วัตต์ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในขณะนั้น [15]

จากการศึกษาผลการตรวจสอบในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนที่จะดำเนินการทดลองงานวิจัยในครั้งนี้ นำมาวิเคราะห์กำหนดเกณฑ์การตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อเซลล์ เพื่อกำหนดเกณฑ์การตรวจสอบให้สอดคล้องกับการปรับปรุงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกระบวนการผลิตให้มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น จึงกำหนดให้ระยะการยึดติดที่ไม่ต่อเนื่องวันระยะที่ไม่ยึดติดรวมกันต่อหนึ่งบัสบาร์ ไม่เกิน 16 มิลลิเมตร อยู่ในเกณฑ์พอใช้ถือว่าเป็นเกณฑ์มาตรฐานในการตัดสินผ่านการยอมรับในการตรวจสอบด้วยสายตาก่อนการศึกษาทดลองในครั้งนี้ แสดงดังภาพที่ 4.1 ส่วนเกณฑ์ที่มีระยะไม่ยึดติดเกินกว่า 16 มิลลิเมตร ให้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ แย่ สำหรับการตรวจสอบในการทดลองครั้งนี้ ส่วนเกณฑ์ตัดสิน ดีมาก คือการยึดติดอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ไม่มีวันระยะที่ไม่มีการยึดติด และเกณฑ์ตัดสิน ดี คือการยึดติดเกือบจะต่อเนื่องและสม่ำเสมอแต่มีวันระยะไม่ยึดติดเพียงเล็กน้อย หลักเกณฑ์การตัดสินการยึดติด

ของريبونกับบัสบาร์ของเซลล์ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ได้อย่างอิงจากผลการตรวจสอบในกระบวนการผลิตที่เกิดปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้การควบคุมค่าพารามิเตอร์แบบเดิม เพื่อการปรับปรุงเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์ จึงได้พิจารณาการยึดติดของการเชื่อมต่อนี้คือ เกณฑ์พอใช้ไปสู่เกณฑ์ ดี และดีมาก สำหรับการศึกษาดังกล่าวในครั้งนี้นี้ เกณฑ์การตรวจสอบการยึดติด แสดงตามตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ระยะการยึดติดและเกณฑ์การตรวจสอบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

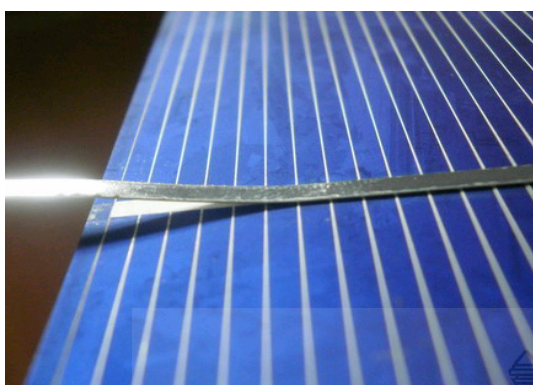
ตารางที่ 4.1 เกณฑ์ตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อระหว่างريبونกับบัสบาร์ของเซลล์

ผลการตรวจสอบ	เกณฑ์ตัดสินการยึดติด	การตรวจสอบ
ดีมาก	ดีมาก = 100 % (ยึดติดกันอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ)	สายตา และการวัด
ดี	$95\% \leq \text{ดี} < 100\%$ (หรือ $0 \text{ mm} < \text{ระยะไม่ยึดติด} \leq 8 \text{ mm}$ )	สายตา และการวัด
พอใช้	$90\% \leq \text{พอใช้} < 95\%$ (หรือ $8 \text{ mm} < \text{ระยะไม่ยึดติด} \leq 16 \text{ mm}$ )	สายตา และการวัด
แย่	$\text{แย่} < 90\%$ (หรือ $16 \text{ mm} < \text{ระยะไม่ยึดติด}$ )	สายตา และการวัด

### 4.3 ผลการตรวจสอบการยึดติดและจำนวนเซลล์แตกในการทดลองเชื่อมต่อเซลล์

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบการยึดติดและจำนวนเซลล์แตกของตัวอย่างแผงเซลล์

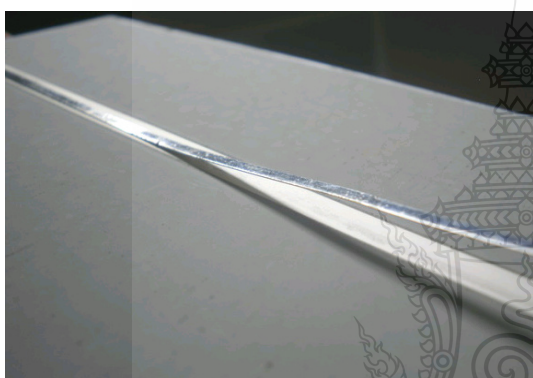
ตัวอย่าง แผงเซลล์	การควบคุมค่าพารามิเตอร์			ผลการตรวจสอบ			
	อุณหภูมิ (°C)	เวลาเชื่อมต่อ (Sec)	ขนาดรีบบอน (mm)	การยึดติด		จำนวนเซลล์แตก	
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	เชื่อมต่อ	เกลือบ
1	380	4	0.20×2.00	แย้	แย้	ไม่พบ	ไม่พบ
2	380	5	0.20×2.00	พอใช้	พอใช้	ไม่พบ	ไม่พบ
3	380	6	0.20×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
4	380	7	0.20×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
5	390	4	0.20×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
6	390	5	0.20×2.00	ดีมาก	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ
7	390	6	0.20×2.00	ดี	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ
8	390	7	0.20×2.00	แย้	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ
9	400	4	0.20×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
10	400	5	0.20×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
11	400	6	0.20×2.00	พอใช้	ดีมาก	1	ไม่พบ
12	400	7	0.20×2.00	แย้	ดีมาก	1	ไม่พบ
13	380	4	0.24×2.00	แย้	แย้	ไม่พบ	ไม่พบ
14	380	5	0.24×2.00	พอใช้	พอใช้	ไม่พบ	ไม่พบ
15	380	6	0.24×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	1
16	380	7	0.24×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
17	390	4	0.24×2.00	พอใช้	พอใช้	ไม่พบ	1
18	390	5	0.24×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
19	390	6	0.24×2.00	ดี	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ
20	390	7	0.24×2.00	พอใช้	ดีมาก	1	1
21	400	4	0.24×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ
22	400	5	0.24×2.00	ดีมาก	ดีมาก	1	ไม่พบ
23	400	6	0.24×2.00	พอใช้	ดีมาก	1	1
24	400	7	0.24×2.00	แย้	ดีมาก	3	2



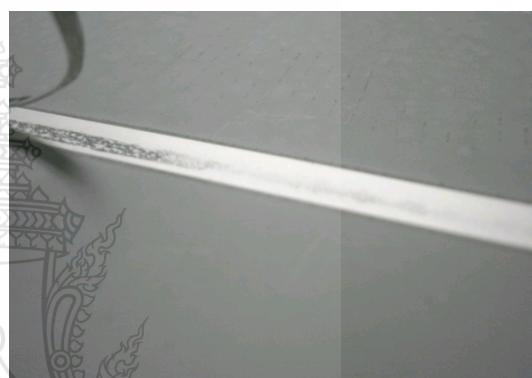
(ก) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า



(ข) ลอกريبบอนด้านหน้าออก



(ค) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง



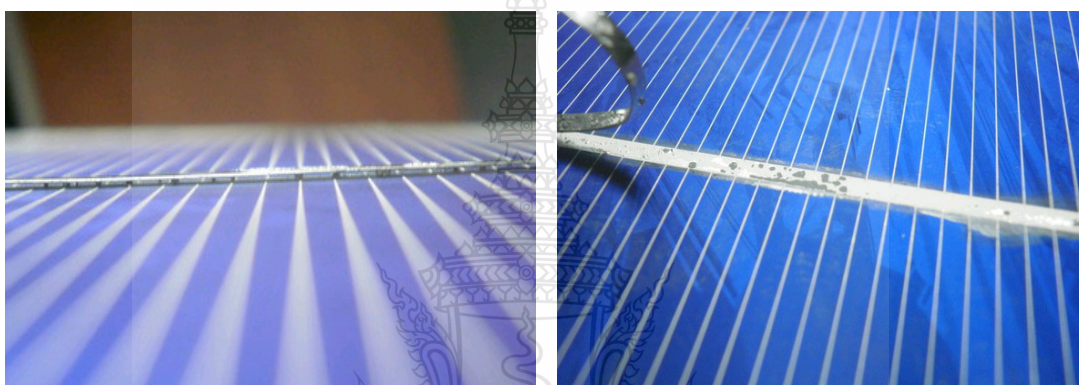
(ง) ลอกريبบอนด้านหลังออก

ภาพที่ 4.2 ทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส เวลา 4 วินาที และริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร

จากการศึกษาทดลองในครั้งนี้พบว่าการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ เมื่อควบคุมค่าอุณหภูมิต่ำ และใช้เวลาเชื่อมต่อเซลล์เร็วเกินไป ในขณะที่ใช้ริบบอนที่มีขนาดเท่ากัน เกิดปัญหาการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังเซลล์ เมื่อทดลองเชื่อมต่อ เซลล์ โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 4 วินาที ต่อระยะ หนึ่งบัสบาร์ และริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร สังเกตพบว่าการยึดติดของลวดริบบอนกับ บัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ แสดงดังภาพที่ 4.2 (ก) ปลายและบางส่วนของริบบอนไม่ยึดติดกับบัสบาร์ ด้านหน้าเซลล์ (Front Busbar) และทดลองลอกดึงริบบอนออกจากบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ แสดงดัง ภาพที่ 4.2 (ข) พบว่าผิวโลหะของบัสบาร์หลุดลอกติดกับผิวริบบอนเป็นบางส่วน และยึดติดไม่



ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลการตรวจสอบการยึดติดอยู่ในเกณฑ์ แย่ และเมื่อทดลองเชื่อมต่อเซลล์ระหว่าง ระบายกับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน พบว่าระบายไม่ยึดติดกับ บัสบาร์ด้านหลังเซลล์ระยะมากเกิน 16 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 14.2 (ค) ซึ่งเป็นผลการยึดติดอยู่ใน เกณฑ์แย่เช่นกัน และเมื่อทดลองลอกดึงระบายออกจากบัสบาร์ด้านหลังเซลล์ พบว่าผิวโลหะของ บัสบาร์หลุดลอกติดกับผิวระบายเป็นบางส่วน ไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งผลการตรวจสอบการ ยึดติดถือว่าอยู่ในเกณฑ์แย่ แสดงดังภาพที่ 14.2 (ง)



(ค) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า

(ข) ลอกระบายด้านหน้าออก



(ค) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง

(ง) ลอกระบายด้านหลังออก

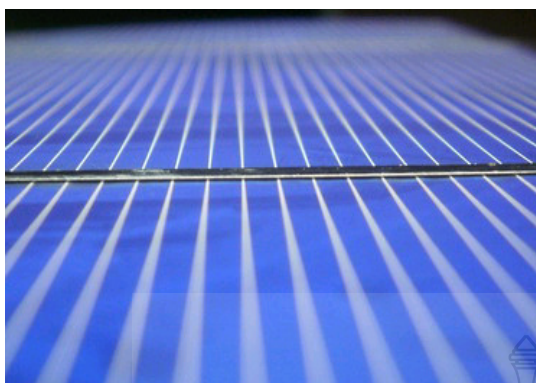
ภาพที่ 4.3 ทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 7 วินาที และระบายขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร



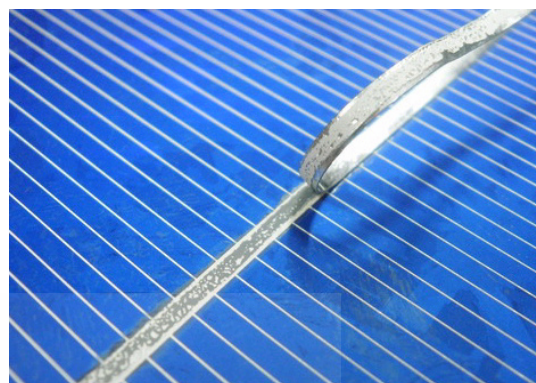
จากการศึกษาทดลองพบว่าการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ เมื่อทดลองเชื่อมต่อเซลล์โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 7 วินาที ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ตรวจสอบพบว่าการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ ผิวสัมผัสของริบบอนหลุดและยกตัวลอยจากผิวของบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ มีระยะประมาณ 30 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4.3 (ก) และเมื่อทดลองลอกดึงริบบอนออกจากบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ แสดงดังภาพที่ 4.3 (ข) พบว่าผิวโลหะของบัสบาร์หลุดลอกติดกับผิวริบบอนเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลตรวจสอบการยึดติดอยู่ในเกณฑ์แย่ ปัญหาการยึดติดลักษณะนี้มาจากสาเหตุ หลังจากเชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า (Tabbing) แล้วนำเซลล์ไปเชื่อมต่อด้านหลังเซลล์ (String) ในขณะที่เชื่อมต่อที่บัสบาร์ด้านหลังเซลล์ควบคุมอุณหภูมิสูงมากและใช้เวลาเชื่อมต่อริบบอนกับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์นานเกินจนทำให้ปริมาณความร้อนสะสมสูงมากและถ่ายเทลงไปยังบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งตรงกันข้าม จนทำให้โลหะเคลือบริบบอนทองแดงหลอมละลายครั้งที่สอง เป็นผลทำให้เกิดการทำลายการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ [16-17]

เมื่อทดลองเชื่อมต่อเซลล์ระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์จากการตรวจสอบพบว่าการยึดติดของริบบอนกับบัสบาร์ด้านหลังเซลล์ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองยึดติดกันดีมาก แสดงดังภาพที่ 4.3 (ค) และทดลองลอกดึงริบบอนออกจากบัสบาร์ด้านหลังเซลล์แสดงดังภาพที่ 4.3 (ง) พบว่าผิวโลหะของบัสบาร์หลุดลอกติดกับผิวริบบอนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ซึ่งผลการตรวจสอบการยึดติดอยู่ในเกณฑ์ดีมาก แต่เมื่อสังเกตรอยผิวของบัสบาร์ของเซลล์ที่ลอกจะมีลักษณะสีคล้ำขึ้น ซึ่งมาจากการเพิ่มอุณหภูมิและการใช้เวลาเชื่อมต่อยาวนานขึ้น จึงทำให้แผ่นเซลล์ได้รับปริมาณความร้อนสูงขึ้น จนทำให้แผ่นเซลล์ได้รับความเสียหายแตกร้าวได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการควบคุมอุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้เซลล์เกิดความเครียดจากความร้อนที่ได้รับจนแผ่นเซลล์แตกร้าว

จากการศึกษาทดลองเมื่อควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาที ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และใช้ริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ตรวจสอบพบว่าการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ยึดติดกันอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ไม่พบระยะที่ไม่ยึดติด และไม่มีจุดหลุดหลุดของริบบอนให้เห็น แสดงดังภาพที่ 4.4 (ก) และเมื่อทดลองลอกดึงริบบอนออกจากบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์อย่างช้าๆ ตรวจสอบด้วยสายตาพบว่าผิวโลหะของบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ได้หลุดลอกติดมากับผิวของริบบอนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ซึ่งผลการตรวจสอบการยึดติดถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดีมาก แสดงดังภาพที่ 4.4 (ข)



(ก) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า



(ข) ลอกريبบอนด้านหน้าออก



(ค) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง



(ง) ลอกريبบอนด้านหลังออก

ภาพที่ 4.4 ทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และريبบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร

เมื่อทดลองเชื่อมต่อเซลล์ระหว่างريبบอนกับขั้วบารด้านหลังเซลล์ จากการตรวจสอบพบว่า การยึดติดของريبบอนกับขั้วบารด้านหลังเซลล์ ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองยึดติดกันดีมาก แสดงดังภาพที่ 4.4 (ค) และทดลองลอกดึงريبบอนออกอย่างช้าๆจากขั้วบารด้านหลังเซลล์ แสดงดังภาพที่ 4.4 (ง) พบว่าผิวโลหะของขั้วบารหลุดลอกติดกับผิวของريبบอนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ซึ่งผลการตรวจสอบการยึดติดถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดีมาก และการควบคุมค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ไม่พบปัญหาเซลล์แตกร้าวในขณะที่เชื่อมต่อเซลล์และหลังจากเคลือบแผงเซลล์ ซึ่งแสดงว่าการควบคุมอุณหภูมิ เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ และขนาดของريبบอน เป็นค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อเซลล์ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

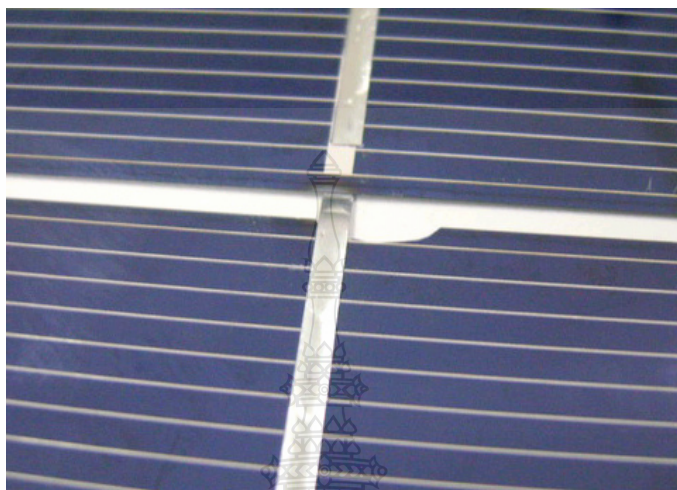


ภาพที่ 4.5 เซลล์แตกในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 6 วินาที และ รับบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร

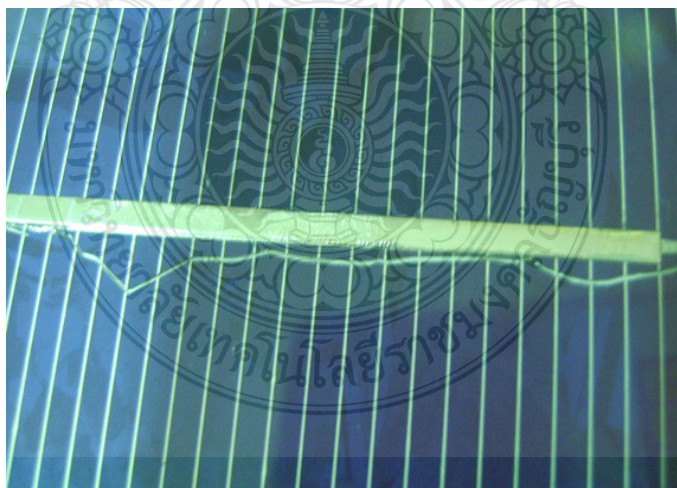
จากการศึกษาทดลองพบว่าการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 11 เมื่อทดลองเชื่อมต่อเซลล์โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 6 วินาทีต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และรับบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร พบปัญหาเซลล์แตกร้าวในขณะทดลองเชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้าหรือ ขั้นตอนแทบบิ่ง แสดงดังภาพที่ 4.5 การแตกร้าวของแผ่นเซลล์ในลักษณะนี้ เมื่อพิจารณาจะพบว่ามาจากการควบคุมอุณหภูมิสูงและใช้เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์นานจนทำให้เซลล์แตกร้าวได้จากความเครียดของความร้อนที่สะสมในแผ่นเซลล์ [18]

เมื่อศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์ระหว่างรับบอนกับบัสบาร์ของเซลล์ในตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 17 โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 4 วินาที ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และใช้รับบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร ตรวจสอบด้วยสายตาพบเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์จำนวน 1 แผ่น แสดงดังภาพที่ 4.6 และเมื่อศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์ในตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 23 โดยควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 6 วินาที ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และใช้รับบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร เหมือนกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 17 และตรวจสอบด้วยสายตาพบเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์จำนวน 1 แผ่น เช่นเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 4.7 จากการสังเกตพบว่าลักษณะรอยแตกร้าวจะอยู่ใกล้กับรับบอนเหมือนกัน ซึ่งเกิดจากการกดเคลือบของเครื่องเคลือบแผงเซลล์ (Laminator) เมื่อพิจารณาขนาดความหนาของรับบอนของตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 17 แล 23 จะมีความหนา 0.24 มิลลิเมตร ซึ่งมีสมบัติ

แข็งและบิดงอได้ยากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับรีบบอนในตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 1 ถึง 12 ที่มีความหนา 0.20 มิลลิเมตร สาเหตุที่ทำให้เซลล์แตกในเครื่องเคลือบมาจากขนาดรีบบอนที่มีความหนามากเกิน



ภาพที่ 4.6 เซลล์แตกในขั้นตอนเคลือบแผงที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 4 วินาทีและรีบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร



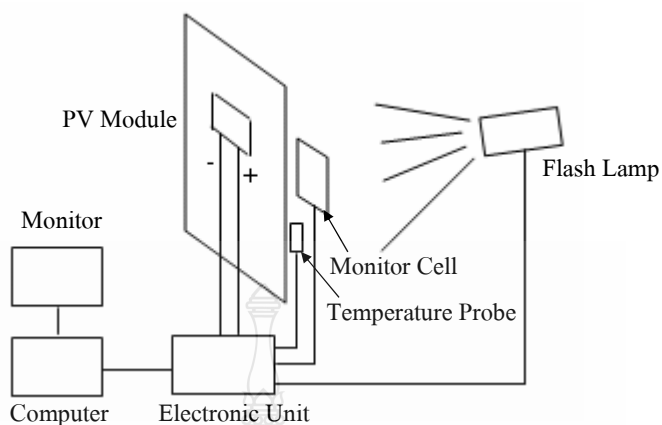
ภาพที่ 4.7 เซลล์แตกในขั้นตอนเคลือบแผงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 6 วินาทีและรีบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร



#### 4.4 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในการทดลองเชื่อมต่อเซลล์

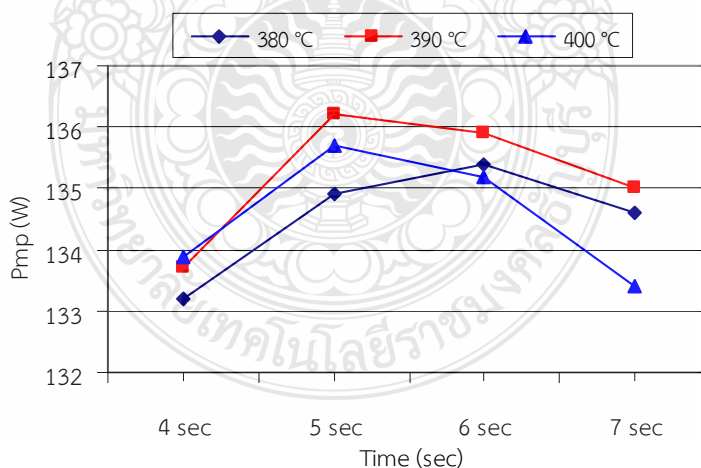
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ตัวอย่างด้วยเครื่อง Module Tester

ตัวอย่าง แผงเซลล์	การควบคุมค่าพารามิเตอร์			ผลการตรวจสอบ			
	อุณหภูมิ (°C)	เวลาเชื่อมต่อ (Sec)	ขนาดรีบบอน (mm)	$P_{mp}$ (W)	$\eta$ (%)	$R_s$ (m $\Omega$ )	$FF$
1	380	4	0.20×2.00	133.2	13.86	6.27	0.7296
2	380	5	0.20×2.00	134.9	14.04	5.41	0.7344
3	380	6	0.20×2.00	135.4	14.09	5.12	0.7348
4	380	7	0.20×2.00	134.6	14.01	5.51	0.7295
5	390	4	0.20×2.00	133.7	13.91	6.16	0.7321
6	390	5	0.20×2.00	136.2	14.17	4.82	0.7364
7	390	6	0.20×2.00	135.9	14.14	4.98	0.7357
8	390	7	0.20×2.00	135.0	14.05	5.42	0.7326
9	400	4	0.20×2.00	133.9	13.93	5.95	0.7340
10	400	5	0.20×2.00	135.7	14.12	4.93	0.7364
11	400	6	0.20×2.00	135.2	14.07	5.59	0.7352
12	400	7	0.20×2.00	133.4	13.88	6.23	0.7298
13	380	4	0.24×2.00	132.8	13.82	6.39	0.7307
14	380	5	0.24×2.00	134.7	14.02	5.56	0.731
15	380	6	0.24×2.00	135.4	14.09	5.12	0.7339
16	380	7	0.24×2.00	134.3	13.98	5.73	0.733
17	390	4	0.24×2.00	133.3	13.87	6.37	0.7325
18	390	5	0.24×2.00	135.9	14.14	4.86	0.7357
19	390	6	0.24×2.00	135.5	14.10	4.86	0.7359
20	390	7	0.24×2.00	134.8	14.03	5.61	0.7297
21	400	4	0.24×2.00	133.8	13.92	6.24	0.7335
22	400	5	0.24×2.00	136.4	14.19	4.71	0.7375
23	400	6	0.24×2.00	135.7	14.12	5.02	0.7355
24	400	7	0.24×2.00	133.6	13.90	6.18	0.7282



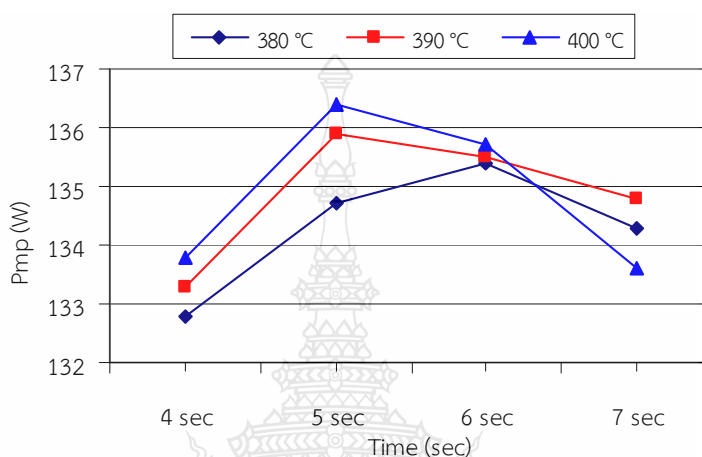
ภาพที่ 4.8 ไดอะแกรมเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์โดยวิธีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ และขนาดริบบอนที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ในตารางที่ 4.3 ได้นำผลการทดสอบมาจากเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บล็อกไดอะแกรมการต่อวงจรทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.8 และได้นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ในรูปแบบของกราฟดังนี้



ภาพที่ 4.9 ผลทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสุด ( $P_{mp}$ ) ใช้ขนาดริบบอน 0.20×2.00 มิลลิเมตร

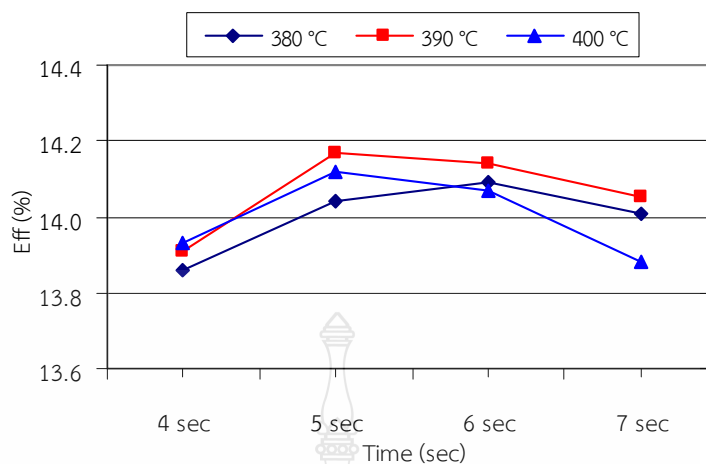
ผลการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด แสดงดังภาพที่ 4.9 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาทีต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และ ระบายขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 136.2 วัตต์ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้ระบายขนาดเท่ากัน



ภาพที่ 4.10 ผลทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) ใช้ระบายขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร

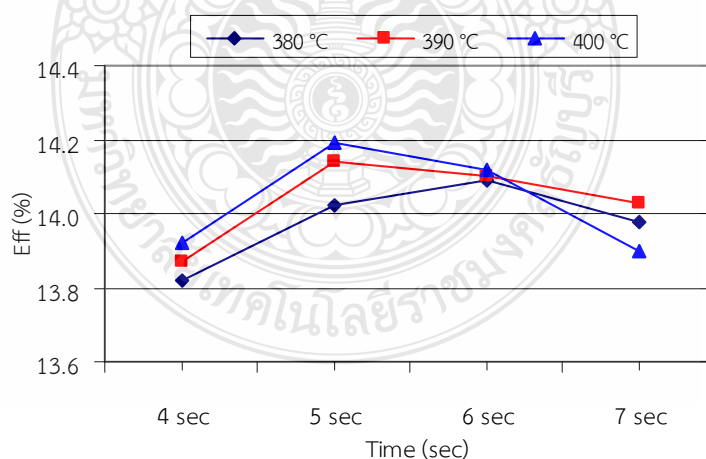
ผลการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด แสดงดังภาพที่ 4.10 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 22 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาทีต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และ ระบายขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 136.4 วัตต์ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้ระบายขนาดเท่ากัน และมีค่ามากกว่าตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ที่ใช้ขนาดระบาย 0.20×2.00 มิลลิเมตร อยู่เพียง 0.2 วัตต์ หรือคิดเป็นร้อยละ 0.147

ผลการทดลองวัดค่าประสิทธิภาพ แสดงดังภาพที่ 4.11 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาทีต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และ ระบายขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ได้ค่าประสิทธิภาพร้อยละ 14.17 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้ระบายขนาดเท่ากัน



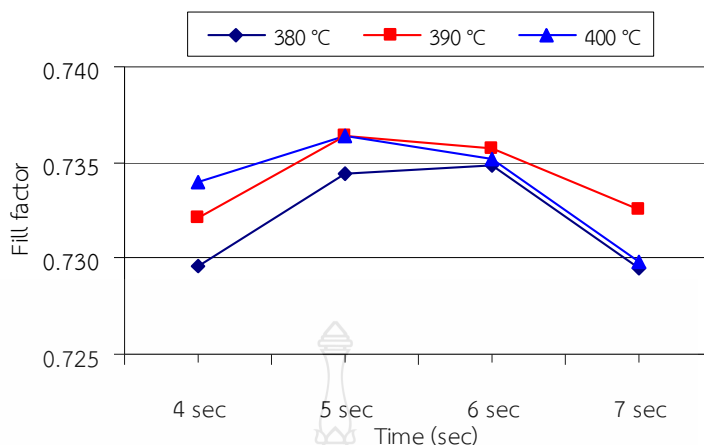
ภาพที่ 4.11 ผลทดสอบค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ใช้ริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร

ผลการทดลองวัดค่าประสิทธิภาพ แสดงดังภาพที่ 4.12 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 22 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาทีต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และริบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร ได้ค่าประสิทธิภาพร้อยละ 14.19 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้ริบบอนขนาดเท่ากัน และมีค่ามากกว่าตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ที่ใช้ขนาดริบบอน 0.20×2.00 มิลลิเมตร อยู่เพียงร้อยละ 0.02



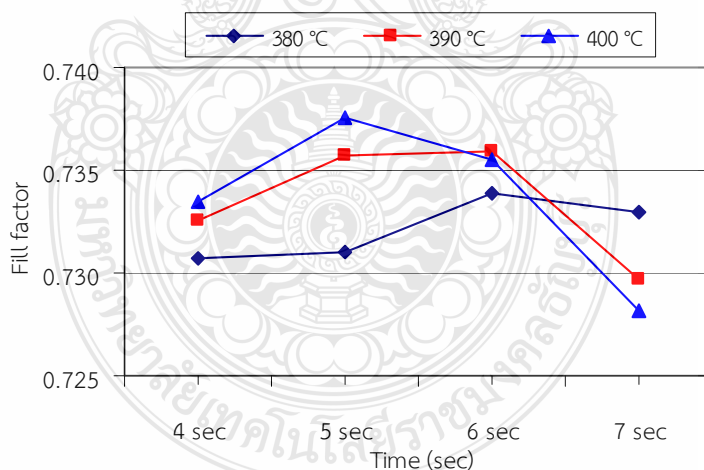
ภาพที่ 4.12 ผลทดสอบค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ใช้ริบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร





ภาพที่ 4.13 ผลทดสอบค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ใช้ริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร

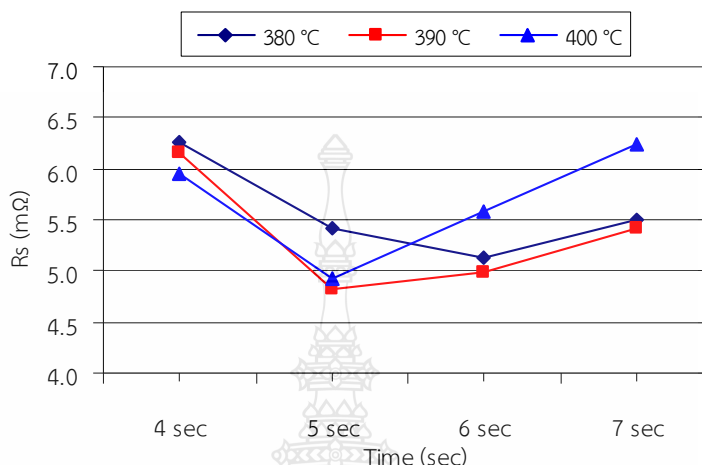
ผลการทดลองวัดค่าฟิลล์แฟกเตอร์ แสดงดังภาพที่ 4.13 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาทีต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ได้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.7364 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้ริบบอนขนาดเท่ากัน



ภาพที่ 4.14 ผลทดสอบค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ใช้ริบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร

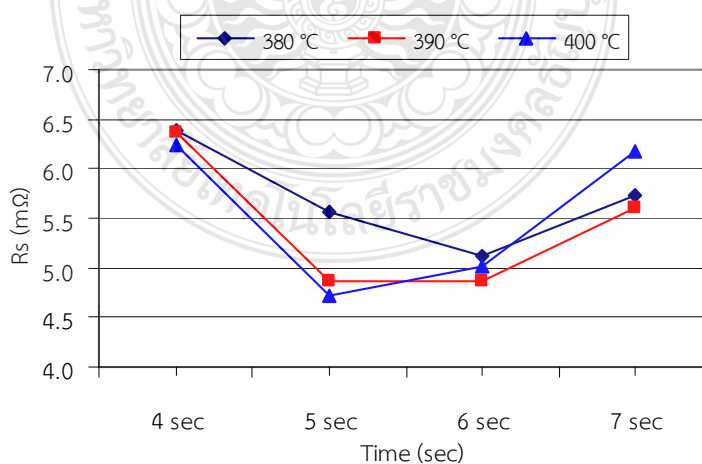
ผลการทดลองวัดค่าฟิลล์แฟกเตอร์ แสดงดังภาพที่ 4.14 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 22 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาทีต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ และริบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร ได้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ 0.7375 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ

ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้รีบบอนขนาดเท่ากัน และมีค่ามากกว่าตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ที่ใช้ขนาดรีบบอน  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร อยู่เพียง 0.0011 หรือคิดเป็นร้อยละ 0.1493



ภาพที่ 4.15 ผลทดสอบค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ใช้รีบบอนขนาด  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร

ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานอนุกรม แสดงดังภาพที่ 4.15 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาทีต่อระยะหนึ่ง บัสบาร์ และรีบบอนขนาด  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร ได้ค่าความต้านทานอนุกรม เท่ากับ 4.82 มิลลิโอห์ม ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้รีบบอนขนาดเท่ากัน



ภาพที่ 4.16 ผลทดสอบค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ใช้รีบบอนขนาด  $0.24 \times 2.00$  มิลลิเมตร

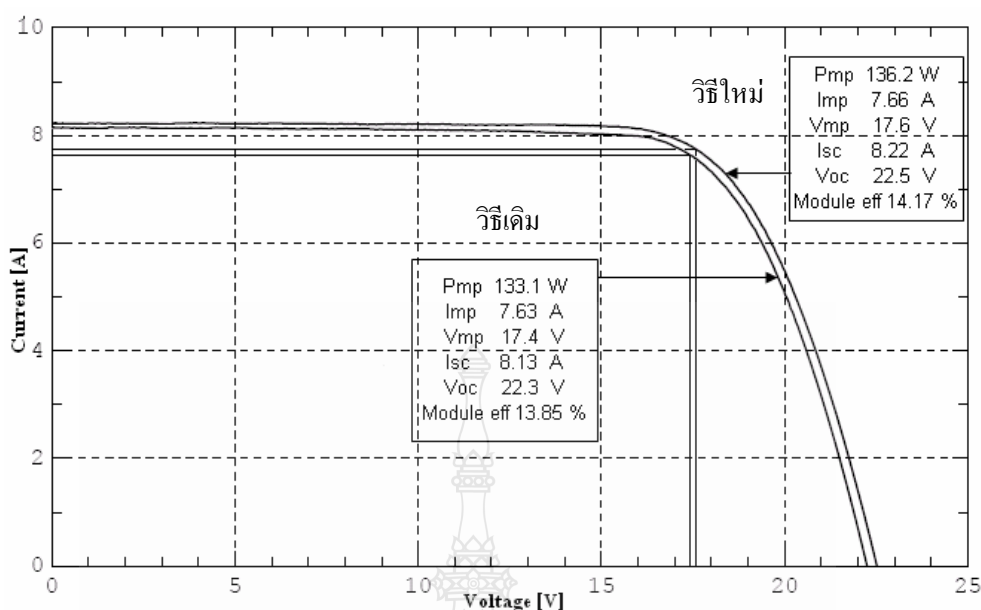
ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานอนุกรม แสดงดังภาพที่ 4.15 ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 22 ควบคุมค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเชื่อมต่อ 5 วินาที ต่อระยะหนึ่ง บัสมาร์ และริบบอนขนาด 0.24×2.00 มิลลิเมตร ได้ค่าความต้านทานอนุกรม เท่ากับ 4.71 มิลลิโอห์ม ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ที่ใช้ริบบอนขนาดเท่ากัน และมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ที่ใช้ขนาดริบบอน 0.20×2.00 มิลลิเมตร อยู่เพียง 0.11 มิลลิโอห์ม หรือคิดเป็นร้อยละ 2.28

#### 4.5 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากการศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์ในงานวิจัยนี้ ตรวจสอบพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ทั้ง 24 ตัวอย่าง คือการควบคุมพารามิเตอร์ในตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งบัสมาร์ 5 วินาทีต่อบัสมาร์ และลวดตัวนำไฟฟ้าขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ตรวจสอบรอยเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับบัสมาร์ของเซลล์ การยึดติดสม่ำเสมอและต่อเนื่องดีมาก และไม่พบแผ่นเซลล์แตกร้าวจากการเชื่อมต่อเซลล์และการเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 136.2 วัตต์ และประสิทธิภาพร้อยละ 14.19

ผลการศึกษาจากปัญหาการควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตวิธีเดิมคือ การควบคุมพารามิเตอร์ อุณหภูมิ 410 ถึง 430 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ 5 ถึง 6 วินาทีต่อหนึ่งบัสมาร์ และลวดตัวนำไฟฟ้าขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร ตรวจสอบรอยเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับบัสมาร์ของเซลล์ การยึดติดอยู่ในเกณฑ์แย่มากและพอใช้ทุกแผ่นเซลล์ และพบปัญหาแผ่นเซลล์แตกร้าวจากการเชื่อมต่อเซลล์คิดเป็นร้อยละ 5.19 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 133.1 วัตต์ และประสิทธิภาพร้อยละ 13.85

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิจัยของการควบคุมพารามิเตอร์ระหว่างวิธีเดิมและวิธีใหม่ที่ใช้เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อเซลล์ แสดงดังภาพที่ 4.17 ผลปรากฏว่าวิธีใหม่ที่ใช้เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมต่อเซลล์คือ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งบัสมาร์ 5 วินาทีต่อบัสมาร์ และลวดตัวนำไฟฟ้าขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร การยึดติดของรอยเชื่อมคุณภาพสูงกว่ามาก จำนวนแผ่นเซลล์แตกร้าวจากการเชื่อมต่อเซลล์ถือว่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 5.19 จึงทำให้ราคาค่าต้นทุนการผลิตลดลงเป็นจำนวนเงินคิดเป็นร้อยละ 4.93 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.33 และ 0.32 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างการควบคุมค่าพารามิเตอร์วิธีเดิมและวิธีใหม่

ส่วนในกรณีที่ใช้เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์เพิ่มขนาดลวดตัวนำไฟฟ้าหรือริบบอนเป็น  $0.24 \times 2.00$  มิลลิเมตร ตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อเซลล์ลักษณะคล้ายกับการยึดติดของริบบอนขนาด  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร โดยการยึดติดจะแปรผันตามอุณหภูมิการเชื่อมต่อเซลล์มากกว่า เนื่องจากริบบอนมีขนาดใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่าในตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 22 ควบคุมอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ 5 วินาทีต่อหนึ่งบัสบาร์ และริบบอนขนาด  $0.24 \times 2.00$  มิลลิเมตร ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 136.4 วัตต์ และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ร้อยละ 14.19 ซึ่งมากกว่าตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสูงมากกว่าคิดเป็นร้อยละ 0.15 แต่มีเหตุผลสำคัญที่ไม่เลือกการควบคุมพารามิเตอร์ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 22 มาเป็นพารามิเตอร์อ้างอิงที่เหมาะสมที่สุด เพราะพบปัญหาเซลล์แตกจากเครื่องเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจากสมบัติการบิดงอและการให้ตัวของริบบอนริบบอนที่มีความหนามากกว่าจะทำให้สมบัติการบิดงอลดลง เนื่องจากมีความแข็งเพิ่มขึ้นจึงทำให้บิดงอได้ยาก ทำให้เกิดปัญหาเซลล์แตกจากการกดทับของริบบอนในกระบวนการเคลือบแผงเซลล์ของเครื่องเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Laminator) สังเกตได้จากตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 13 ถึง 24 จะตรวจพบแผ่นเซลล์แตกในกระบวนการเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ในขณะที่ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 1 ถึง 12 ไม่พบแผ่นเซลล์แตกในกระบวนการเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เลย

#### 4.6 สรุปท้ายบท

ผลการวิจัยการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน โดยหัวแรงไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อเซลล์ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์หลักคือ

1. อุณหภูมิที่ปลายหัวแรงไฟฟ้า
2. เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งบัสบาร์
3. ขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้าหรือขนาดของริบบอน

จากผลการวิจัยนี้ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อ้างอิงในกระบวนการเชื่อมต่อเซลล์แทบบิง (Tabbing) และสตริง (String) คือ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ 5 วินาทีต่อบัสบาร์ และขนาดของริบบอน (ความหนา×ความกว้าง) 0.20×2.00 มิลลิเมตร ซึ่งได้ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ผลการตรวจสอบการยึดติดของการเชื่อมต่อเซลล์มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่องดีมากทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นเซลล์ ทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมของแผ่นเซลล์เท่ากับ 4.82 มิลลิโอห์ม มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์อื่นๆ [19] และเป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 136.2 วัตต์ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับร้อยละ 14.17 [20] มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์อื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมพารามิเตอร์วิธีเดิม จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.33 และ 0.32 ตามลำดับ [21] นอกจากผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว การควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อเซลล์วิธีใหม่ยังไม่พบปัญหาแผ่นเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ และขนาดของริบบอนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแรงไฟฟ้าจะต้องมีความกว้างพอดีกับความกว้างของบัสบาร์ด้านหน้าแผ่นเซลล์ และการเพิ่มความหนาของริบบอนจะมีผลต่อสมบัติการบิดงอของริบบอน โลหะทองแดงมีค่าลดลง จะเกิดปัญหาในขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์โดยริบบอนจะกดทับแผ่นเซลล์จนแตกทำให้ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิต (Reject) แต่การลดความหนาของริบบอนลงจะมีผลต่อการไหลของกระแสมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง จากผลการวิจัยที่ได้จากตัวอย่างแผงเซลล์ทั้ง 24 ตัวอย่าง และข้อมูลทางด้านการผลิตของทางโรงงานขนาดของริบบอนที่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแรงไฟฟ้าโดยการควบคุมพารามิเตอร์วิธีใหม่คือ 0.20×2.00 มิลลิเมตร เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์โดยวิธีใหม่สามารถลดราคาต้นทุนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 4.93 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมพารามิเตอร์วิธีเดิม

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงสุดในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมพารามิเตอร์คือ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งบัสบาร์ และขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้า เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมตรวจสอบการยึดติดจากการเชื่อมต่อเซลล์และจำนวนเซลล์ที่แตกร้าวจากการเชื่อมต่อเซลล์และเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เปรียบเทียบกับการควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตวิธีเดิม

ตารางที่ 5.1 ผลการวิจัยทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์

ตัวอย่าง แผง เซลล์	การควบคุมค่าพารามิเตอร์			ผลการตรวจสอบ				ทดสอบ สมบัติทาง ไฟฟ้า	
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา เชื่อมต่อ (Sec)	ขนาด ริบบอน (mm)	การยึดติด		จำนวนเซลล์แตก		$P_{mp}$ (W)	$\eta$ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	เชื่อมต่อ	เคลือบ		
1	380	4	0.20×2.00	แย้	แย้	ไม่พบ	ไม่พบ	133.2	13.86
2	380	5	0.20×2.00	พอใช้	พอใช้	ไม่พบ	ไม่พบ	134.9	14.04
3	380	6	0.20×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	135.4	14.09
4	380	7	0.20×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	134.6	14.01
5	390	4	0.20×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	133.7	13.91
6	390	5	0.20×2.00	ดีมาก	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ	136.2	14.17
7	390	6	0.20×2.00	ดี	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ	135.9	14.14
8	390	7	0.20×2.00	แย้	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ	135.0	14.05
9	400	4	0.20×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	133.9	13.93
10	400	5	0.20×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	135.7	14.12
11	400	6	0.20×2.00	พอใช้	ดีมาก	1	ไม่พบ	135.2	14.07
12	400	7	0.20×2.00	แย้	ดีมาก	1	ไม่พบ	133.4	13.88
13	380	4	0.24×2.00	แย้	แย้	ไม่พบ	ไม่พบ	132.8	13.82

ตารางที่ 5.1 ผลการวิจัยทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ (ต่อ)

ตัวอย่าง แผง เซลล์	การควบคุมค่าพารามิเตอร์			ผลการตรวจสอบ				ทดสอบ สมบัติทาง ไฟฟ้า	
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา เชื่อมต่อ (Sec)	ขนาด ริบบอน (mm)	การยึดติด		จำนวนเซลล์แตก		$P_{mp}$ (W)	$\eta$ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	เชื่อมต่อ	เคลื่อน		
14	380	5	0.24×2.00	พอใช้	พอใช้	ไม่พบ	ไม่พบ	134.7	14.02
15	380	6	0.24×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	1	135.4	14.09
16	380	7	0.24×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	134.3	13.98
17	390	4	0.24×2.00	พอใช้	พอใช้	ไม่พบ	1	133.3	13.87
18	390	5	0.24×2.00	ดี	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	135.9	14.14
19	390	6	0.24×2.00	ดี	ดีมาก	ไม่พบ	ไม่พบ	135.5	14.10
20	390	7	0.24×2.00	พอใช้	ดีมาก	1	1	134.8	14.03
21	400	4	0.24×2.00	พอใช้	ดี	ไม่พบ	ไม่พบ	133.8	13.92
22	400	5	0.24×2.00	ดีมาก	ดีมาก	1	ไม่พบ	136.4	14.19
23	400	6	0.24×2.00	พอใช้	ดีมาก	1	1	135.7	14.12
24	400	7	0.24×2.00	แย้	ดีมาก	3	2	133.6	13.90

ผลการศึกษาจากปัญหาการควบคุมของกระบวนการผลิตวิธีเดิมเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการต่อเชื่อมเซลล์วิธีเดียวกัน และใช้แผ่นเซลล์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกัน

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้การเชื่อมต่อเซลล์วิธีเดิม

แผง เซลล์ รุ่น	การควบคุมค่าพารามิเตอร์			ผลการตรวจสอบ				ทดสอบ สมบัติทาง ไฟฟ้า	
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา เชื่อมต่อ (Sec)	ขนาด ริบบอน (mm)	การยึดติด		จำนวนเซลล์แตก		$P_{mp}$ (W)	$\eta$ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	เชื่อมต่อ	เคลื่อน		
135W	410-430	5-6	0.20×2.00	พอใช้	ดี	5.19 %	ไม่พบ	133.1	13.85

## 5.2 สรุปการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการวิจัยการศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอนขนาด  $156 \times 156$  มิลลิเมตร ในวิทยานิพนธ์นี้จากการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 โดยการควบคุมค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาเชื่อมต่อเซลล์ต่อหนึ่งบัสบาร์ 5 วินาที และริบบอนขนาด  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ปฏิบัติในกระบวนการผลิต โดยมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์ทั้ง 24 ตัวอย่าง ที่ได้ศึกษาทดลองในครั้งนี้ และการควบคุมค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเดิมที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{mp}$ ) เท่ากับ 136.2 วัตต์ ถือเป็นค่าที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการควบคุมพารามิเตอร์วิธีเดิมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.33

2. ได้ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) เท่ากับร้อยละ 14.17 ถือเป็นค่าที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการควบคุมพารามิเตอร์วิธีเดิมค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.32

3. การควบคุมอุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส กับเวลาเชื่อมต่อเซลล์ 5 วินาที เป็นความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและลงตัวที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อเซลล์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแผงเซลล์อื่นๆ ตรวจสอบพบว่า การเชื่อมต่อระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์อยู่ในเกณฑ์ดีมาก คือมีการยึดติดอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ตลอดระยะเวลาความยาวของบัสบาร์

4. ไม่พบแผ่นเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับแผ่นเซลล์และระยะเวลาเชื่อมต่อเซลล์ที่มีความเหมาะสม ทำให้อุณหภูมิของเซลล์ไม่แตกต่างกันมาก จึงไม่มีผลต่อการขยายตัวที่เป็นสาเหตุทำให้เซลล์แตกร้าว

5. ไม่พบแผ่นเซลล์แตกร้าวจากขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการใช้ขนาดของริบบอน  $0.20 \times 2.00$  มิลลิเมตร มีสมบัติการบิดงอและการให้ตัวได้ดีกว่าขนาดของริบบอน  $0.24 \times 2.00$  มิลลิเมตร ซึ่งแข็งและบิดงอได้ยากกว่า

6. เมื่อไม่พบแผ่นเซลล์แตกร้าวในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ โดยวิธีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ตามตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 จึงทำให้ต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงคิดเป็นร้อยละ 4.93 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการควบคุมพารามิเตอร์วิธีเดิม



### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. หัวแรงไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาทดลองเชื่อมต่อเซลล์จะต้องมีกำลังไฟฟ้าขาออกสูงไม่ต่ำกว่า 80 วัตต์ เพื่อให้ทำให้กำลังไฟฟ้ามีความเสถียร อุณหภูมิที่ปลายหัวแรงต้องไม่ตกขณะลากปลายหัวแรงไฟฟ้า เพื่อเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 10 วินาที

2. การควบคุมพารามิเตอร์เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์เมื่อนำมาใช้ปฏิบัติงานจริงในกระบวนการผลิตไม่สามารถกำหนดเวลาได้เหมือนกับการทดลอง จึงต้องจัดฝึกอบรมพนักงานเชื่อมต่อเซลล์แท็บปิ้งและสตรีง โดยการทวนสอบเชื่อมต่อเซลล์เทียบกับเวลาอย่างน้อยวันละ 2 ครั้ง

3. นอกเหนือจากการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และการตรวจสอบรอยเชื่อมต่อเซลล์ด้วยสายตาแล้ว อาจต้องศึกษาเพิ่ม โดยการตัดเซลล์ภาคตัดขวางเพื่อตรวจสอบการยึดติดระหว่างริบบอนทองแดงกับโลหะที่บัสบาร์ของเซลล์ ด้วยการถ่ายภาพจากกล้องถ่ายรูปที่ถ่ายขยายภาพได้

4. การทดสอบภาพถ่ายทางความร้อน (Infrared Thermography) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในสถานะที่มีแสงและขณะลัดวงจรไฟฟ้า หากพบจุดร้อน (Hot Spot) ที่รอยเชื่อมต่อระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสดงถึงปัญหาการยึดติดที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความต้านทานอนุกรมสูงที่รอยเชื่อมต่อเซลล์และเกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน ( $P=I^2R$ ) จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูง

5. การทดสอบตัวอย่างแผงเซลล์ที่ศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์ในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนต่อไปควรทดสอบจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยการนำไปตากแดด 1,000 ชั่วโมงแล้วนำกลับมาทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกครั้ง เพื่อศึกษาการยึดติดของการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยวิธีดังกล่าว โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบพารามิเตอร์ไฟฟ้าก่อนและหลังการนำไปตากแดด

## รายการอ้างอิง

- [1] สมชัย หิรัญวโรดม, เอกสารประกอบสอนรายวิชา ระบบโฟโตโวลตาอิกและการประยุกต์ใช้งาน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2548.
- [2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (Online), 2004. Available: [http://www.egat.co.th/re/solarcell/solarcell\\_technology.htm](http://www.egat.co.th/re/solarcell/solarcell_technology.htm) (12 กุมภาพันธ์ 2556)
- [3] บริษัท ลีโอนิกส์ จำกัด, ความรู้เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ (Online), 2002. Available: [http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar\\_knowledge.php](http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php) (12 กุมภาพันธ์ 2556)
- [4] ชาย ชิวเกตุ และชนานัญ บัวเขียว, การผลิตไฟฟ้าโดยแสงอาทิตย์ (Online), 2543. Available: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html> (12 กุมภาพันธ์ 2556)
- [5] A. Schneider, “A New Approach in Solar Cell Module Interconnection Technique Resulting in 5-10% Higher PV Module Power Out Put,” **IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Vol. 4, 7-12 May 2006, Waikoloa Hawaii U.S.A., 2006. pp. 2073.
- [6] R. Klengel, M. Petzold, D. Schade and B. Sykes, “Improved Testing of Soldered Busbar Interconnects on Silicon Solar Cells,” **European Microelectronic & Packaging Conference**, Vol. 18, 12–15 September 2011, Brighton UK, 2011.
- [7] S. Schindler and S. Wiese, “Investigation of Wettability and Interface Reactions of Sn-Pb, Sn-Cu, Sn-Ag and Sn-Ag-Cu Solders for Solar Cell Interconnections,” **Electronic System Integration Technology Conference (ESTC)**, Vol. 3, 13-16 September 2010, Berlin Germany, 2010. pp. 1–5.
- [8] Fu-Ming Lin, Cheng-Yu Peng, Ray-Chien Lai, Fang-Yao Yeh and Wen-Ching Sun, “Performance Determination of Cell String by Measuring the Series Resistance Associated with the Soldering Ribbon and Soldering Temperature,” **IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, Vol. 33, 1-16 May 2008, San Diego California U.S.A., 2008. pp. 1–4.

- [9] S. Schindler and S. Wiese, "Solidification Processes of SnCu, SnAg and SnAgCu Solder Alloys and InterFace Reactions to Characterize Solar Cell Interconnections Processes," **European Microelectronics & Packaging Conference**, Vol. 18, 12-15 September 2011, Brighton United Kingdom, 2011. pp. 1–4.
- [10] J. Wendt, M. Trager, R. Klengel, M. Petzold, D. Schade and R. Sykes, "Improved Quality Test Method for Solder Ribbon Interconnects on Silicon Solar Cells," **IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems**, Vol. 12, 2-5 June 2010, Las Vegas Nevada USA., 2010. pp. 1–4.
- [11] J. Jeong, N. Park, W. Hong and C. Han "Analysis for the Degradation Mechanism of Photovoltaic Ribbon Wire under Thermal Cycling," **IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, Vol. 37, 19-24 June 2011, Seattle Washington U.S.A., 2011. pp. 3159–3161.
- [12] S. Wiese, R. Meier and F. Kraemer, "Mechanical Behaviour and Fatigue of Copper Ribbons used as Solar Cell Interconnectors," **International Thermal Mechanical & Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems**, Vol. 11, 26-28 April 2010, Bordeaux France, 2010. pp. 1–5.
- [13] D.S. Kim, A.M. Gabor, V. Yelundur, A.D. Upadhyaya, V. Meemongkolkiat and A. Rohatgi, "String Ribbon Silicon Solar Cells with 17.8% Efficiency," **World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Vol. 3, 11-18 May 2003, Osaka Japan, 2003. pp. 1293–1296.
- [14] L.J. Caballero, P. Snchez-Friera, B. Lalaguna, J. Alonso, and M.A. Vzquez, "Series Resistance Modelling of Industrial Screen-Printed Monocrystalline Silicon Solar Cells and Modules Including the Effect of Spot Soldering," **IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Vol. 4, 7-12 May 2006, Waikoloa Hawaii U.S.A, 2006. pp. 1388–1391.
- [15] Fu-Ming Lin, Fang-Yao Yeh and Mei-Hsiu Lin, "The Effects of Temperature and Solders on the Wettability between Ribbon and Solar Cell," **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 93, Issues 6–7, June 2009. pp. 864–868.

- [16] Y. Zemen, S.C. Schulz, H.Trommler, S.T. Buschhorn, W. Bauhofer and K. Schulte, "Comparison of New Conductive Adhesives Based on Silver and Carbon Nanotubes for Solar Cells Interconnection," **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 109, February 2013. pp. 155–159.
- [17] M. Heimanna, P. Klaernerb, C. Luechingerb, A. Mettea, J. W. Muellera, M. Traegera, T. Barthela, O. Valentinb and P. Wawer, "Ultrasonic Bonding of Aluminum Ribbons to Interconnect High-Efficiency Crystalline-Silicon Solar Cells," **Energy Procedia**, Vol. 27, 2012. pp. 670-675.
- [18] B. Hoex and T.M. Walsh, "Broken Metal Fingers in Silicon Wafer Solar Cells and PV Modules," **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 108, January 2013. pp. 78–81.
- [19] Fu-Ming Lin and Shan-Pu Yu, "Performance of Low Series-Resistance Interconnections on the Polycrystalline Solar Cells," **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 95, Issue 1, January 2011. pp. 39–44.
- [20] สันติ มั่นคง และสมชัย หิรัญวโรดม, "การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการใช้หัวแร้งไฟฟ้าในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์," **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย**, ครั้งที่ 9, 8-10 พฤษภาคม 2556, ชลพฤกษ์ รีสอร์ท จังหวัดนครนายก, 2556. หน้า 916-921.
- [21] สันติ มั่นคง และสมชัย หิรัญวโรดม, "การปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกโดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อ," **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล**, ครั้งที่ 5, 27-29 มีนาคม 2556, โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์, 2556. หน้า 377-380.

ภาคผนวก

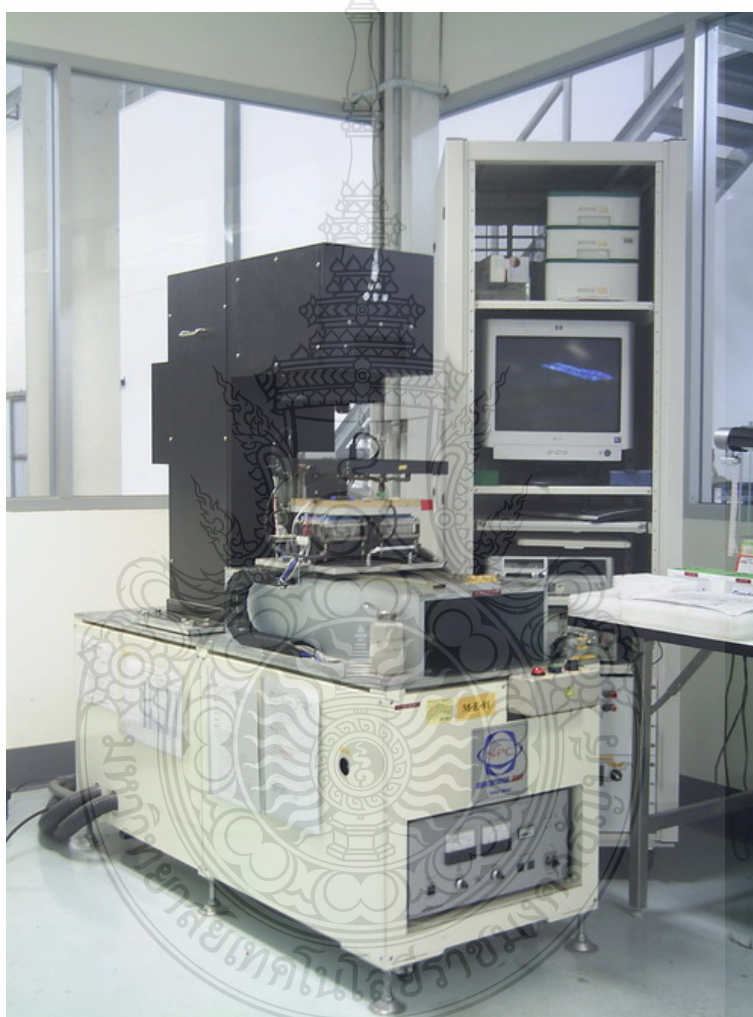


**ภาคผนวก ก**  
ภาพเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



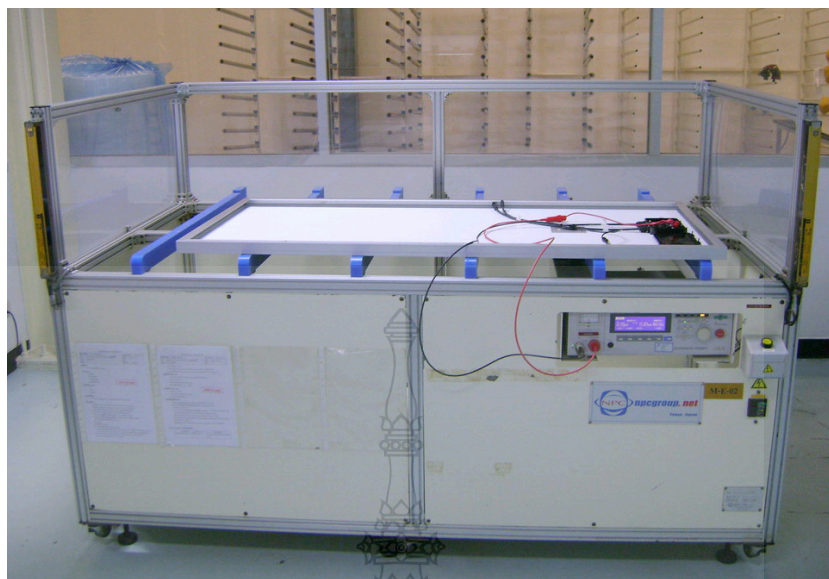
### ภาพเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เครื่องทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Cell Tester) เครื่องทดสอบจนวนไฟฟ้าแรงดันสูง (Hipot Tester) และเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester) แสดงภาพดังนี้



ภาพที่ ก.1 เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Cell Testing)

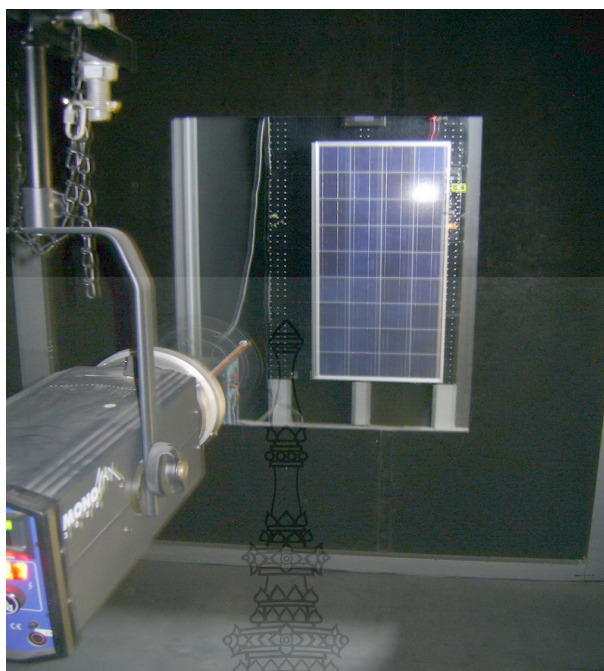




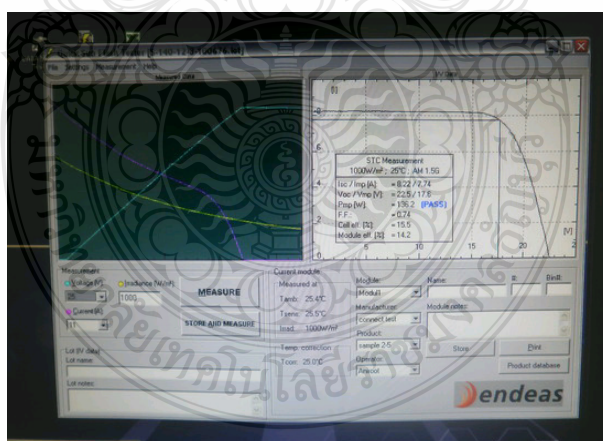
ภาพที่ ก.2 เครื่องทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูง (Hipot Tester)



ภาพที่ ก.3 เครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester)



ภาพที่ ก.4 ภายในห้องเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester)



ภาพที่ ก.5 คอมพิวเตอร์และหน้าจอแสดงผลเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Tester)

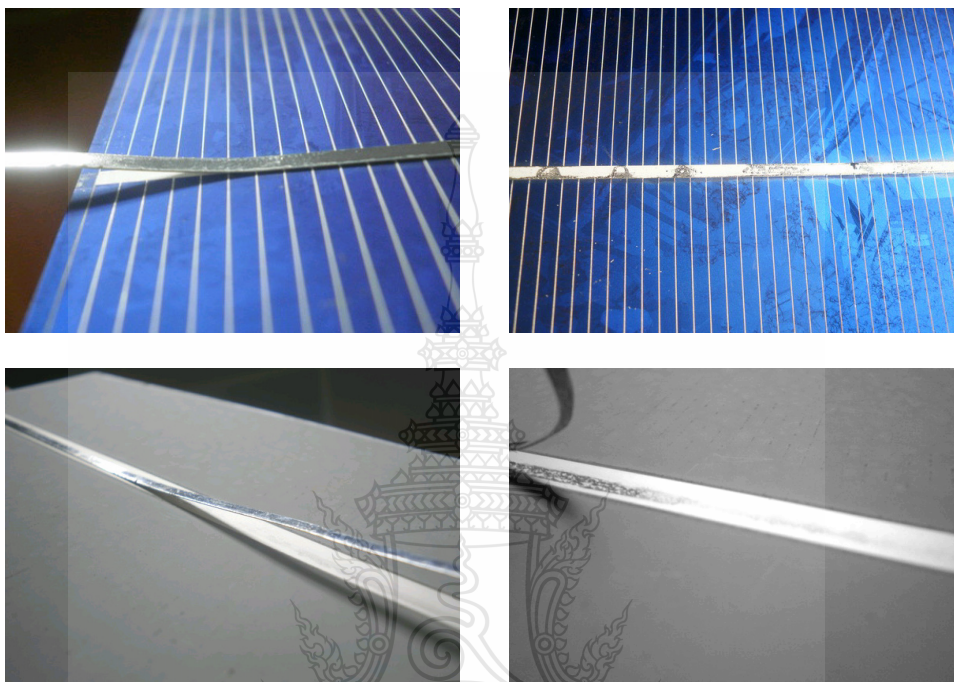


**ภาคผนวก ข**

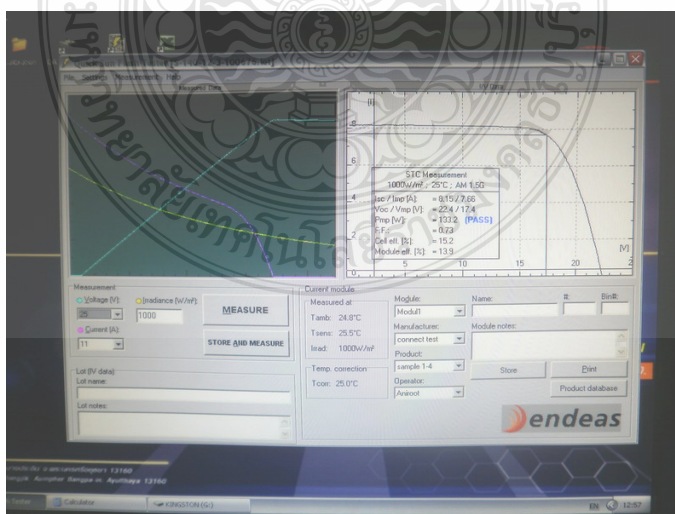
ภาพทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

### ภาพทดสอบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 1 ทดลองการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส เวลา 4 วินาที และริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร



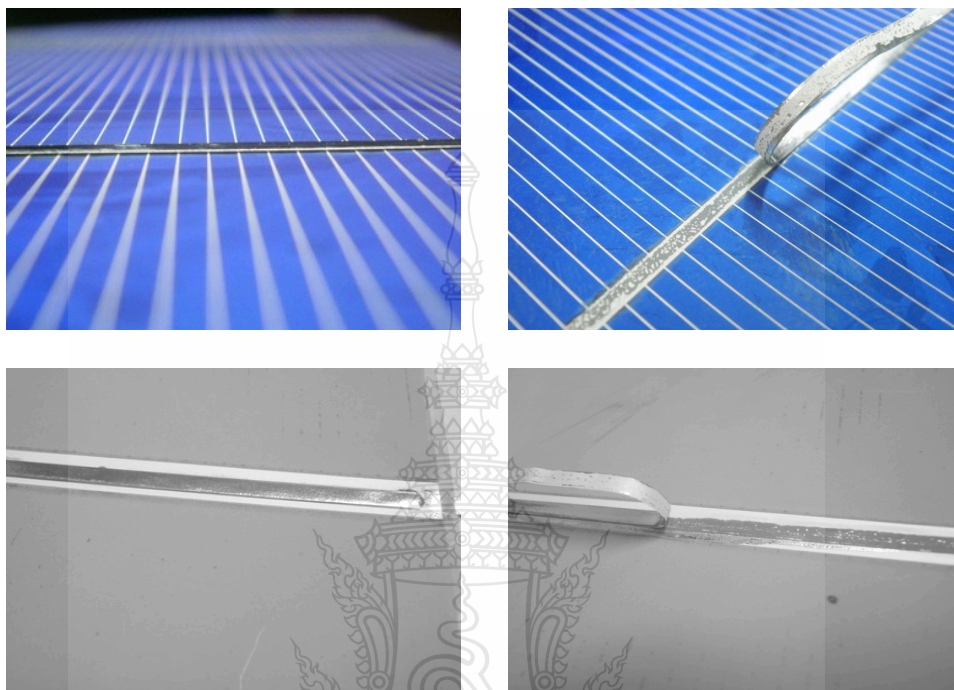
ภาพที่ ข.1 ทดสอบการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างที่ 1



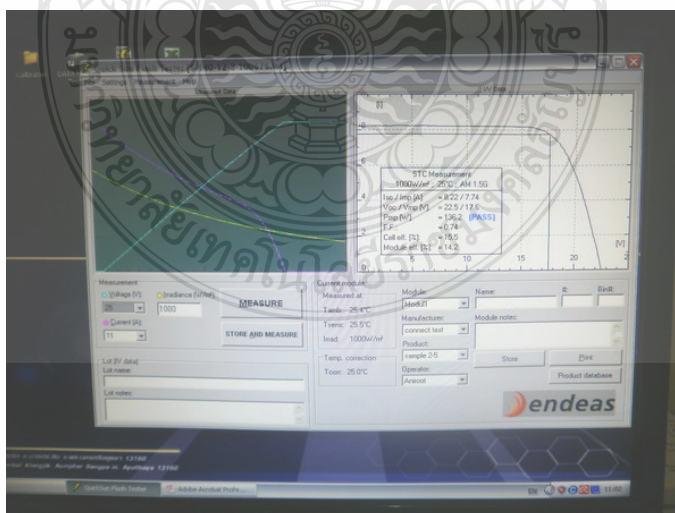
ภาพที่ ข.2 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างที่ 1



ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 6 ทดลองการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 7 วินาที และริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร

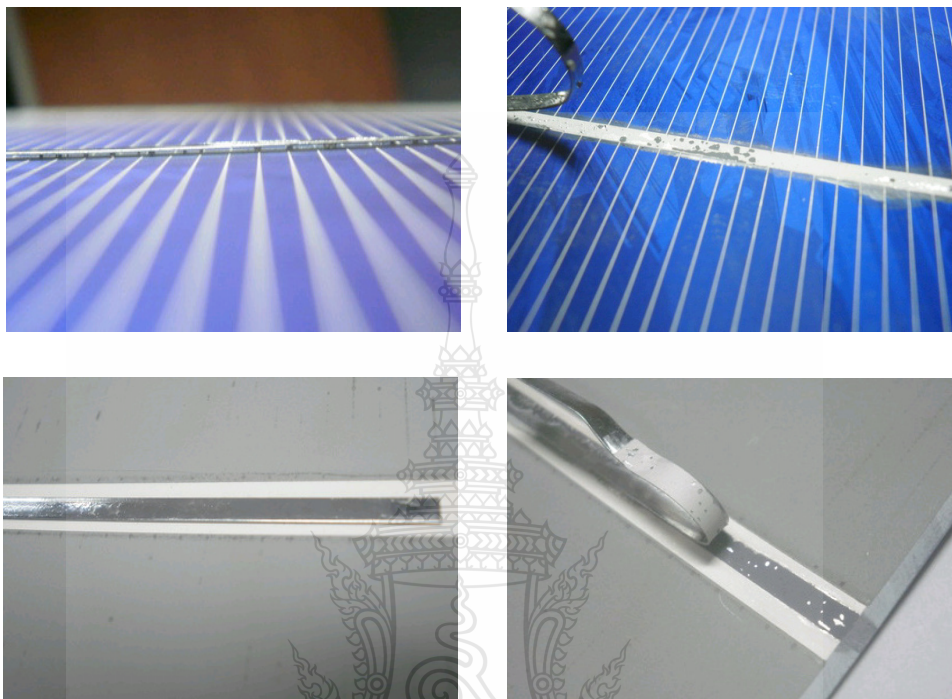


ภาพที่ ข.3 ทดสอบการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างที่ 6

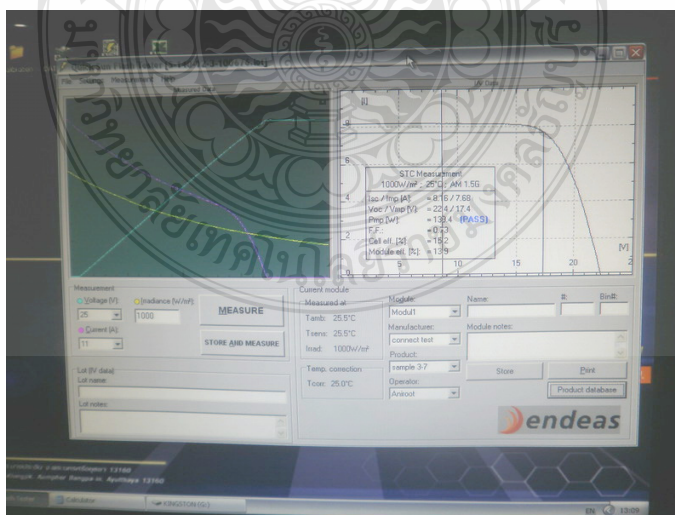


ภาพที่ ข.4 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างที่ 6

ตัวอย่างแผงเซลล์ที่ 12 ทดลองการเชื่อมต่อเซลล์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 7 วินาที และริบบอนขนาด 0.20×2.00 มิลลิเมตร



ภาพที่ ข.5 ทดสอบการยึดติดระหว่างริบบอนกับบัสบาร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างที่ 12



ภาพที่ ข.6 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างที่ 12





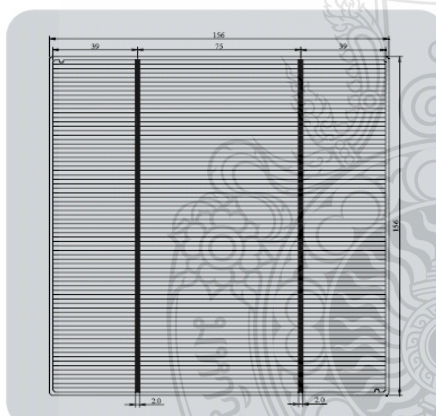
## เอกสารข้อมูลเซลล์แสงอาทิตย์



## IM156

### Poly-crystalline I-Cells

<b>Dimension</b>	156mm x 156mm ± 0.5mm
<b>Thickness(Si)</b>	240µm ± 40µm, 200µm ± 30µm, 180µm ± 30µm
<b>Front</b>	Blue silicon nitride anti-reflection coatings 2.0mm silver busbar
<b>Back</b>	Full-surface aluminum back-surface field 4.3mm (silver / aluminum) continuous soldering pads



#### Features

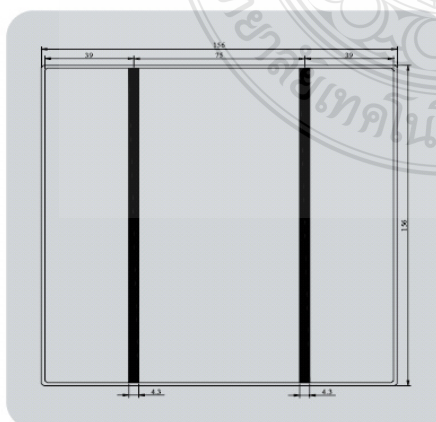
- High Cell-To-Module (CTM) ratio
- Optimized energy output even in low light or high temperature
- Long-term stability and reliability
- Low overall breakage rate
- Color uniformity among cells and within cells
- Environmental protection

#### Production and Quality Control

- Classified efficiency grades by both minimum power and power current
- Screened for reverse current and shunt resistance
- Constant reliability monitoring
- Sorted into four defined color classes
- Minimal button marks
- No beading
- Low warpage and bowing
- REACH-SVHC and RoHS compliant
- ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001 certified



See the reverse side for more detail.



## IM156 Poly-crystalline I-Cells



### Electrical Performance

Efficiency Code		174	172	170	168	166	164
<b>Efficiency</b>	Eff (%)	17.40-17.59	17.20-17.39	17.00-17.19	16.80-16.99	16.60-16.79	16.40-16.59
<b>Power</b>	P <sub>pm</sub> (W)	4.23-4.28	4.19-4.23	4.14-4.19	4.09-4.14	4.04-4.09	3.99-4.04
<b>Max. Power Current</b>	I <sub>pm</sub> (A)	8.05	8.08	7.95	7.89	7.84	7.90
<b>Min. Power Current</b>	I <sub>pm</sub> (A)	7.81	7.76	7.71	7.65	7.61	7.56
<b>Short Circuit Current</b>	I <sub>sc</sub> (A)	8.57	8.52	8.47	8.41	8.37	8.32
<b>Max. Power Voltage</b>	V <sub>pm</sub> (V)	0.529	0.526	0.523	0.521	0.518	0.514
<b>Open Circuit Voltage</b>	V <sub>oc</sub> (V)	0.630	0.628	0.625	0.623	0.621	0.619
Efficiency Code		162	160	158	156	154	152
<b>Efficiency</b>	Eff (%)	16.20-16.39	16.00-16.19	15.80-15.99	15.60-15.79	15.40-15.59	15.20-15.39
<b>Power</b>	P <sub>pm</sub> (W)	3.94-3.99	3.89-3.94	3.85-3.89	3.80-3.85	3.75-3.80	3.70-3.75
<b>Max. Power Current</b>	I <sub>pm</sub> (A)	7.75	7.69	7.64	7.59	7.52	7.48
<b>Min. Power Current</b>	I <sub>pm</sub> (A)	7.51	7.46	7.41	7.36	7.30	7.26
<b>Short Circuit Current</b>	I <sub>sc</sub> (A)	8.26	8.21	8.15	8.10	8.05	8.00
<b>Max. Power Voltage</b>	V <sub>pm</sub> (V)	0.512	0.509	0.507	0.504	0.502	0.499
<b>Open Circuit Voltage</b>	V <sub>oc</sub> (V)	0.616	0.614	0.611	0.609	0.607	0.604

Standard test conditions: AM1.5, 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C. Average accuracy of all tested figures is ±1.5% rel.

### Temperature Coefficients

<b>Current Temperature Coefficient</b>	$\alpha$ (I <sub>sc</sub> )	0.05%/°C
<b>Voltage Temperature Coefficient</b>	$\beta$ (V <sub>oc</sub> )	-0.31%/°C
<b>Power Temperature Coefficient</b>	$\gamma$ (P <sub>max</sub> )	-0.40%/°C

Standard test conditions: AM1.5, 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C.

### Solder Ability

<b>Peel Strength Minimum</b>	> 1.2N/mm
------------------------------	-----------

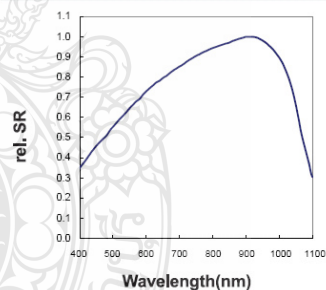
These results can be obtained by soldering at 300-400°C with Motech regular flux and ribbon. Results may vary when different flux, ribbons, soldering methods and parameters are used.

### Light Intensity Dependence

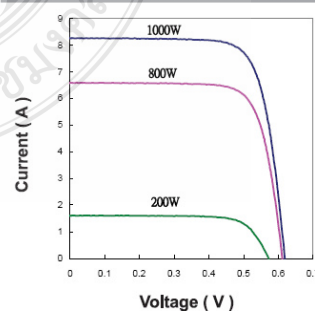
Intensity W/m <sup>2</sup>	V <sub>pm</sub>	I <sub>pm</sub>
1000	1.000	1.000
800	0.993	0.800
600	0.984	0.597
200	0.922	0.193

Specifications subject to change without prior notice.

### Spectral Response(SR)



### IV-Curve



MOTTECH INDUSTRIES, INC. SOLAR DMSION

July 2010

茂迪股份有限公司 | 光電事業部  
台南縣 台南科學園區 新市鄉大順九路二號

No. 2, Da-Shun 9th Road, Hsin-Shi, Tainan 74145, Taiwan  
Tel: +886-6-5050789 Fax: +886-6-5051789  
E-mail: sales\_marketing@motech.com.tw

www.motech.com.tw

## เอกสารข้อมูลแผ่นปิดด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Icosolar<sup>®</sup> 2442**Composition**

PVF – Film  
 PET – Film  
 PVF – Film  
 One side surface treatment

**Technical Data**

Properties	Standard	Unit	Value	Value
Thickness		mm	0.17 ± 0.02	0.35 ± 0.03
PVF – Film		µm	37	37
PET – Film		µm	75	250
PVF – Film		µm	37	37
Total Weight		g/m <sup>2</sup>	229 -10 / +38	474 -35 / +63
Peel Strength of Layers (PVF-PET)	IPV No. 70	N/5cm	≥ 20	≥ 20
EVA – Peel Strength (EVA Etimex Vista Solar 486)	IPV No. 70	N/cm	≥ 40	≥ 40
Permeability of Water Vapour	ISO 15106-3	g/m <sup>2</sup> d	approx. 1.8	approx. 0.7
Breakdown Voltage	IEC 60243-1	kV	approx. 18	approx. 28
Max. System Voltage	IEC 61730	VDC	≥ 750	≥ 1000

Climatic Stability according to IEC 61215 (2000 h at 85 °C, 85% r.h.) no Delamination

**Shelf Life**

12 Months at 40 °C

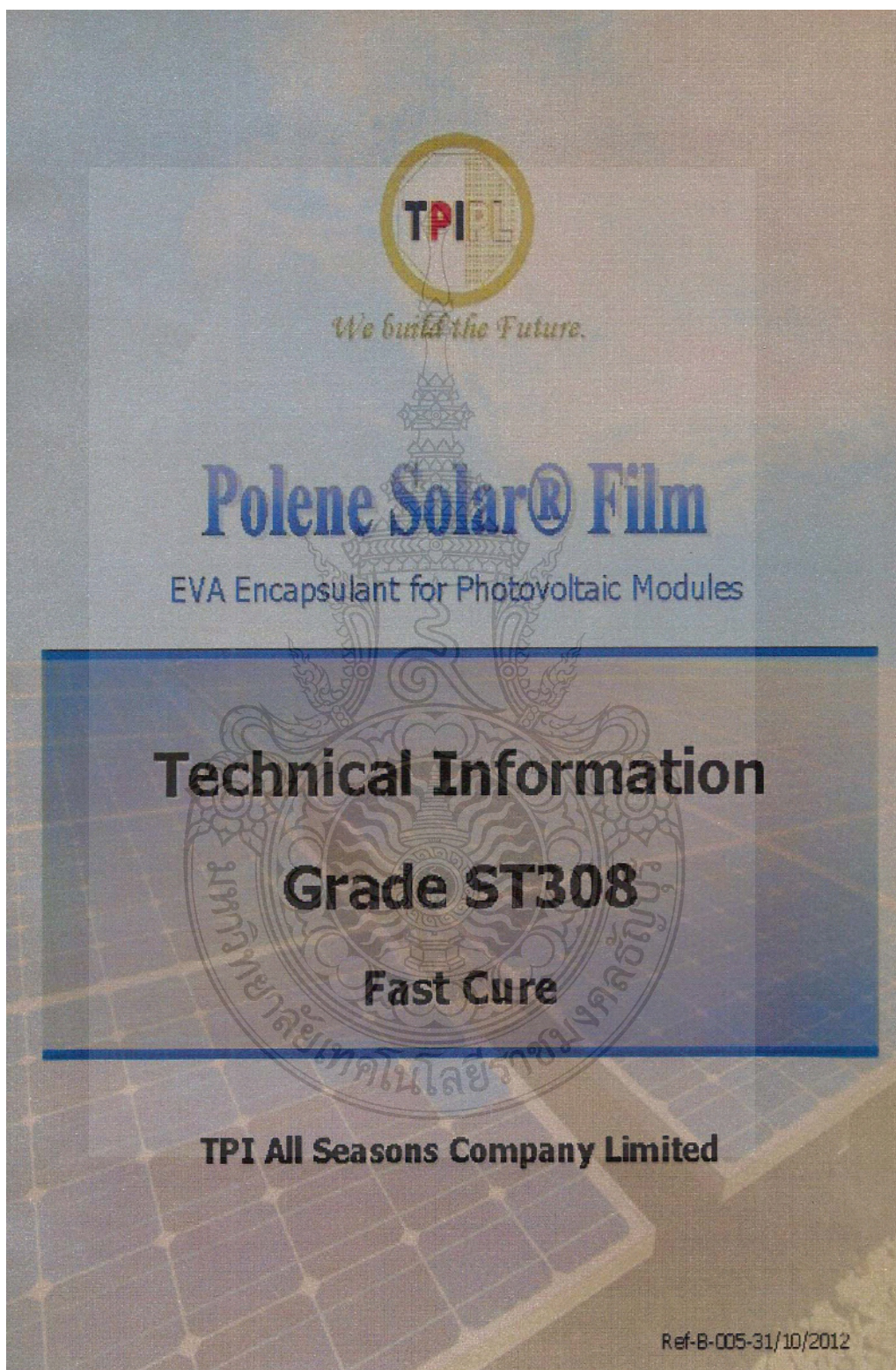
**Colours**

W/W            White/White  
 S/S            Black/Black  
 S/W            Black/White

The verification and assurance of the compatibility of Icosolar<sup>®</sup> with the EVA film and/or other materials used in the solar module shall be incumbent upon the user, and also the verification of the suitability of Icosolar<sup>®</sup> for the envisaged processing and application. Any warranty or liability of ISOVOLTA AG in this connection is excluded.



## เอกสารข้อมูลอีวีเอฟิล์ม





## Samples of ST308

**(600 microns)**  
One side embossment  
[pyramid]

**(450 microns)**  
Two side embossment  
[orange skinned (dotted) / m



## POLENE SOLAR<sup>®</sup> FILM

### - Specifications of Polene Solar<sup>®</sup> Film -



#### Physical Properties - Grade ST308

PROPERTIES	UNIT	TYPICAL VALUE (CURED at 150°C 20min)	TEST METHOD
		ST308	
DENSITY	g/cm <sup>3</sup>	0.96	ASTM D 1505
TENSILE STRENGTH	N/mm <sup>2</sup>	≤ 20	ASTM D 412
ELONGATION AT BREAK	%	500 - 700	ASTM D 412
SECANT MODULUS AT 10% STRAIN	MPa	≤14	ASTM D 412
HARDNESS SHORE A	-	≤ 65	ASTM D 2240
OPTICAL TRANSMISSION	%	≥ 92	TPI
UV - CUT - OFF	nm	360	TPI
GEL CONTENT	% GEL	≥ 80	TPI
ADHESIVE STRENGTH TO GLASS	N/cm	≥ 70	TPI
ADHESIVE STRENGTH TO BACK SHEET(TPT)	N/cm	≥ 50	TPI

#### Dimension and Appearances

DIMENSIONS & APPEARANCES	UNIT	ST308
WIDTH	mm	ADJUSTABLE (MAX. 1100)
THICKNESS	micron	450,600
LENGTH PER ROLL	m	100
CORE SIZE	inch	3
SURFACE FINISH		ONE SIDE EMBOSSMENT [pyramid] TWO SIDE EMBOSSMENT [orange skinned (dotted) / matt]
COLOR		CLEAR

#### Storage and Shelf Life

Shelf Life	ST308
	9 months

Polene Solar<sup>®</sup> Film should be stored indoor at Room Temperature (approximately 25°C), Dry place, Keep out of direct sun light, Arranged in vertical and Re-sealed after opening packaging. The unopened packaging products keep under room temperature control dry and not contact to sun light could be stored up to 12 months.



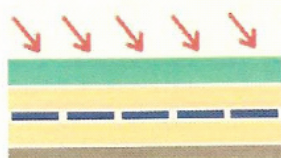
## POLENE SOLAR<sup>®</sup> FILM

### - Recommended lamination Conditions -



#### Lay Up

Crystalline Modules : Grade ST 308 - Pyramid Emboss side facing to PV wafer  
 - Orange skinned (dotted) Emboss side facing to PV wafer



- 1 Front Glass
- 2 EVA Encapsulant Film
- 3 PV Wafer & String
- 4 EVA Encapsulant Film
- 5 Back cover (back sheet, glass, etc.)

Thin-Film Modules : Grade ST 308 - Pyramid Emboss side facing to PV coated glass  
 - Orange skinned (dotted) Emboss side facing to PV coated glass



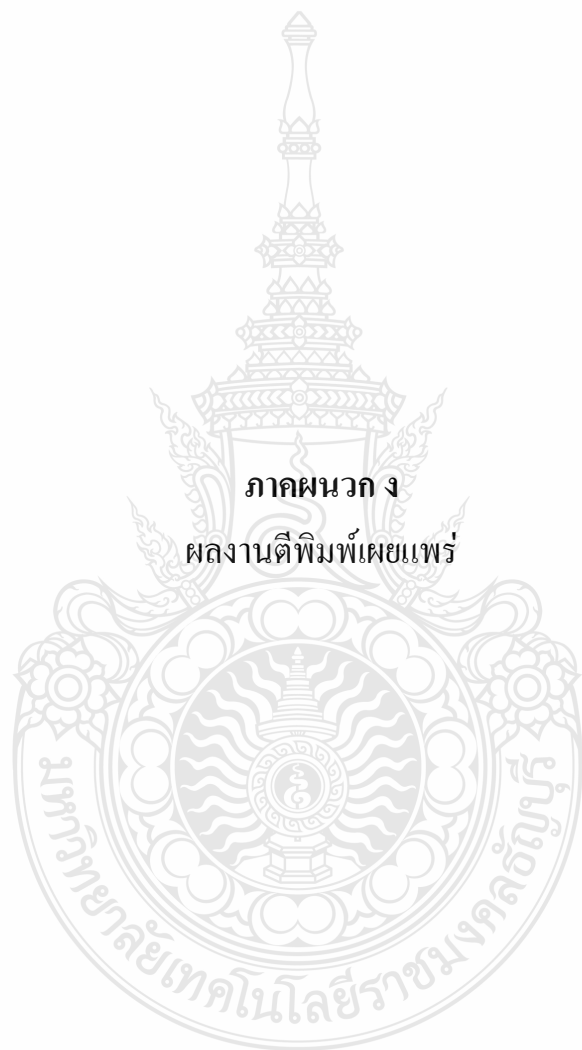
- 1 PV coated front Glass
- 2 EVA Encapsulant Film
- 3 Back cover (back sheet, glass, etc.)

#### Lamination Temperature and Cycle Time

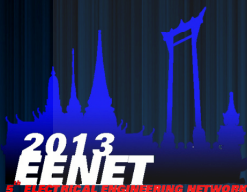
Grade	Hot Plate Temperature (°C)	Vacuum time (minutes)	Press time (minutes)	Total time (minutes)
ST308	140 - 145	4	11-16	15-20
		5	10-15	15-20
		6	9-14	15-20

Manufacturer should always test the recommended conditions on his specific equipments by gel content test. The recommended conditions are by no means the only effective processing conditions. It is recommended that each manufacturer uses the recommended conditions as a helpful guide and a starting point to develop the most suitable processing conditions for his specific equipments. Ultimately, the most suitable processing conditions for each manufacturer will depend on the module specification, the ultimate laminator's platen temperature, the rate and the uniformity of encapsulant heating, and the laminator's vacuum efficiency.





ภาคผนวก ง  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



# การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

## บทความวิจัย

- ไฟฟ้ากำลัง
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ไฟฟ้าสื่อสารและโทรคมนาคม
- ระบบควบคุมและการวัดคุม
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

## บทความวิชาการ

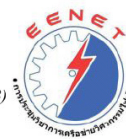
27-29 มีนาคม 2556 โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

**EENET2013**



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



**รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ**  
**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5**

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน	
ศาสตราจารย์ ดร. วัลลภ	สุระกำแพงธร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์	วัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย	อารีย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. พุศศักดิ์	ชีวิสูวิทย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์	ฉัตรรุ่งเรือง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. สมพร	สิริสำราญนุกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์	หวังสถิตย์วงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์	ชื่นแจก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. บัลลังก์	เนียมมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนดุษย์	กุลรวานิชพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร. เวทิน	ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ	หุนเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย	เดชสอนันต์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์	สุวรรณกวิน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์	คำฝอย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา	จำสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาวัลย์	นาคทรัพย์	มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์	บาลมงคล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร. นาตยา	คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
อาจารย์ ดร. ขงยุทธ	นาราชฎี	มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. นิमित	บุญภิรมย์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
อาจารย์ ดร. สมมาตร	แสงเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5  
 Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



**รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ**  
**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5**

ผู้ทรงคุณวุฒิ		หน่วยงาน
ดร.อภิรดา	นามแสง	สถาบันการบินพลเรือน
ดร.สุวิทย์	อัจริยะเมต	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.ชวงส์	วัฒนศักดิ์ภูบาล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ดร.อรรถ	พยอมหอม	การไฟฟ้านครหลวง
ดร.ป้าษาณ	กุลวานิช	กรมวิทยาศาสตร์บริการ







การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



### รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

#### การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
อาจารย์ ดร. วุฒิวัฒน์	กองรัตนประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร. สายชล	ชุดเจ้อจิ้น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ชัยณรงค์	วิเศษศักดิ์วิชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีโรจน์	เพชรพันธุ์ศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภณ	พลสิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพนธ์	ทางทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ประหยัด	กองสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ภัทรพงศ์	อัญชันภาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมพล	โคศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมยศ	สันติมาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ทศพันธ์	สุวรรณพิศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์	ภูมิศักดิ์พิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย	ทรัพย์สิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักริ	ศรีนนท์ฉัตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. กิตติวัฒน์	นันทเกิดผล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. บุญยัง	ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. สุรินทร์	แห่งมงาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย	หิรัญวโรดม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. อำนวย	เรืองวาริ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ณัฐภัทร	พันธ์คง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย	แดงเอม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ	โสเมเกษตรินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์พินิจ	จิตจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์สมชาย	เปียนสูงเนิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5  
 Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



**รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับการพิจารณาบทความ**  
**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5**

ผู้ทรงคุณวุฒิ		หน่วยงาน
อาจารย์พร้อมศักดิ์	อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์นิติพงศ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราชนันท์	คาบบัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ไพฑูรย์	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์วิโรจน์	พิจาณนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ณัฐพงษ์	พันธุณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. นัฐโชติ	รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์พูนศรี	วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ทรง	ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์จตุรงค์	จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์วทรินทร์	ธัญสิประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สาคร	วุฒิพัฒน์พันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สมเกียรติ	ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์อรุณ	ชลิ่งสุทธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์มนัส	บุญเกียรติทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์โกศล	นิธิโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรินทร์	จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์	วัฒน์กำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัจจา	ลักษณ์อำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ธนะกิจ	วัฒน์กำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์นิลमित	นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ชลกาญจน์	วงศ์ก่อเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณทพร	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5  
 Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



**รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับการพิจารณาบทความ**  
**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5**

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนศักดิ์	เอกบูรณะวัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ประสพโชค	โห้ทองคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.มนตรี	สมคูลยคนก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์อดิศักดิ์	แจ้่งสารกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์	ศรีสถิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์	เชยชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.พิชิต	กิตติสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์กาญญาบัญชา	พานิชเจริญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ดิศพล	จำเริญกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์โสภา	แซ่เฮ้ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์สิทธิชัย	บุญปัทม์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์สมพันธ์	อำพวัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์	พงศ์พฤษธาตุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช	เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.พินิจ	ศรีธร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.วรรณรีย์	วงศ์ไตรรัตน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธ์พงศ์	อภิชาติกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย	สง่างาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์รุ่งเพชร	ก่องนอก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธินันท์	คันโพธิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤตวิทย์	บัวใหญ่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ	เพื่อนหมื่นไวย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์กิตติวุฒิ	จินนະบุตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.มงคล	คูพิมาย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.ประจวบ	อินระวงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)





## สาขาทดสอบพลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
ES09 บทความชมเชย	การศึกษาสมรรถนะและวันตำของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ น้ำมันเสมือนดีเซล ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์ ณฑพร จินดาประเสริฐ รัชศักดิ์ สุเพ็งคำ และสมใจ เพียรประสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.	353
ES10	การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากระบบลิฟต์ที่ใช้มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร ด้วยวิธีการ รีเจนเนอเรทีฟ สิทธิชัย กันทะวงศ์ และบุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	357
ES11	การออกแบบคอมด้นแอลอีดีเพื่อการประหยัดพลังงาน รุ่งเพชร ก่องนอก วุฒิชัย สง่างาม มงคล พรหมจันทิก และอภิรักษ์ เปรมมาสวัสดิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	361
ES12	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลของการใช้โคมความถี่ที่ตราสินค้าต่างๆ ที่มีต่อค่าความสว่างเพื่อ การประหยัดพลังงานไฟฟ้า : กรณีศึกษาอาคารธรรมมาดา วัดปัญญาบันฑิตาราม ชุดินันท์ อู่ยาย โสม มหาวิทยาลัยอีสท์วอร์นเอเชีย	365
ES13	การประยุกต์ใช้วัสดุฉนวนการของเทคโนโลยีไดโอดเปล่งแสงเพื่อการส่องสว่าง ปฎิภาณ เกิดลาภ และสมศักดิ์ วัระโรง มหาวิทยาลัยอีสท์วอร์นเอเชีย	369
ES14	การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของหลอดแอลอีดีกำลังสูงกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 วัตต์ ปฎิภาณ เกิดลาภ และสมศักดิ์ วัระโรง มหาวิทยาลัยอีสท์วอร์นเอเชีย	373
ES15	การปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงไฟโวลตาอิกโดยใช้เทคนิค การเชื่อมต่อ สันติ มั่นคง และสมชัย หิรัญวโรดม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	377
ES16	การศึกษาเปรียบเทียบและปรับปรุงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ขณะ ต่อร่วมกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟตรง ที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง จุฑาทิพย์ แหมมา และอนุศักดิ์ บีสลาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	381

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

# การปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกโดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อ

## Improvement of The Maximum Power and Efficiency of PV Module using Soldering Techniques

สันติ มั่นคง และ สมชัย หิรัญวาโรดม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 0-2549-3420 E-mail: mankhong.st@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิก โดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ เพิ่มราคาจำหน่ายต่อแผงและลดค่าใช้จ่ายของต้นทุนสำหรับการประกอบแผงโฟโตโวลตาอิกในอุตสาหกรรม ซึ่งต้องควบคุมพารามิเตอร์บางตัว คือ อุณหภูมิ เวลาการต่อเชื่อม และขนาดของตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิก ผลจากการปฏิบัติแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.33 และ 0.32 ตามลำดับ และค่าใช้จ่ายของต้นทุนประกอบแผงโฟโตโวลตาอิกลดลงคิดเป็นร้อยละ 4.93 เมื่อเปรียบเทียบกับการประกอบแผงด้วยวิธีที่ใช้อยู่เดิม

คำสำคัญ: กำลังไฟฟ้าสูงสุด, ประสิทธิภาพ, การเชื่อมต่อ

### Abstract

This paper presents the improvement of the maximum power and efficiency of a Photovoltaic (PV) module using soldering techniques. The PV module price for selling is increased and the capital cost for PV module assembly in industry is also reduced by using this method. In fact, some parameters such as temperature, time for soldering and the wire size are controlled to evaluate the value of maximum power and efficiency of a PV module. The practical results show that the maximum power and efficiency of a PV module are increased to 2.33 percent and 0.32 percent respectively. Accordingly, the capital cost of a PV module is remarkably reduced to 4.93 percent compared to existing PV module assembly method.

Keywords: maximum power, efficiency, soldering techniques

### 1. บทนำ

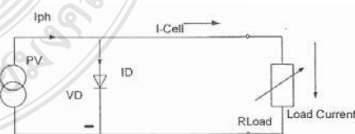
อุตสาหกรรมประกอบแผงโฟโตโวลตาอิกที่ใช้วิธีเชื่อมต่อเซลล์ด้วยหัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Station) เป็นพื้นฐานในการผลิต

จากการศึกษาต้นทุนของกระบวนการผลิตด้วยวิธีนี้ ส่วนหนึ่งเกิดจากความเสียหายในขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์ คือ ขั้นตอนเชื่อมต่อระหว่างลวดนำไฟฟ้ากับแถบสัมผัสด้านหน้าเซลล์หรือ ขั้นตอนแทบบิง (Tabbing) และขั้นตอนเชื่อมต่อวงจรอนุกรมกันเป็นแถวระหว่างลวดนำไฟฟ้ากับแถบสัมผัสด้านหลังเซลล์หรือ ขั้นตอนสตริง (String) เมื่อนำมาตรวจสอบด้วยสายตาในบางแผ่นเซลล์พบว่า การเชื่อมต่อระหว่างพื้นผิวแถบสัมผัสของเซลล์กับลวดนำไฟฟ้าพบว่าการยึดติดยังไม่แนบแน่นและสัมผัสไม่พอ เมื่อทดลองดึงลวดนำไฟฟ้าย้อนกลับจะหลุดลอกได้ง่ายจากการศึกษาผิวสัมผัสของลวดนำไฟฟ้า และแผ่นเซลล์ที่ยึดติดไม่ดีจากการเชื่อมต่อ จะทำให้ความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงขึ้นและค่ากระแสไฟฟ้าลดลง จึงเป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกลดลง และบางครั้งทำให้แผ่นเซลล์แตกร้าวขณะเชื่อมต่อจึงต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อแผ่นเซลล์จำนวนหนึ่งมาทดแทนและต้องจำหน่ายราคาต่อแผงตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ลดลง จากความสูญเสียของการเชื่อมต่อเซลล์ เพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มราคาจำหน่ายต่อแผงที่สูงขึ้นตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ฉะนั้นต้องใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์โดยการควบคุม อุณหภูมิ เวลาและขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์

### 2. การดำเนินงาน

#### 2.1 ทฤษฎีของโฟโตโวลตาอิก

จากวงจรสมมูลของแผงโฟโตโวลตาอิก [1] ดังรูปที่ 1 พิจารณากระแสไฟฟ้าได้จาก สมการที่ (1)



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของแผงโฟโตโวลตาอิก

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสของแผงโฟโตโวลตาอิก

$I_{sh}$  คือ กระแสจางจรชาน

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

$$I_D \text{ คือ กระแสไดโอด}$$

$$I_{Ph} \text{ คือ กระแสโฟตรอน}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ  
 $n$  คือ แฟกเตอร์ทางอุณหพล  
 $V_T = \frac{kT}{q}$  คือ Thermal potential  
 $R_{sh}$  คือ ความต้านทานขนานที่เกิดจากสภาพรอยต่อของการสร้างขึ้น  
 $R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรมที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างผิวสัมผัสตัวนำไฟฟ้ากับแผ่นเซลล์

กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงโฟโตโวลตาอิกสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3)

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (3)$$

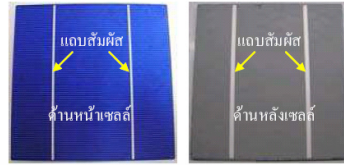
เมื่อ  $P_{mp}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงโฟโตโวลตาอิก  
 $V_{mp}$  คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแผงโฟโตโวลตาอิก  
 $I_{mp}$  คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดของแผงโฟโตโวลตาอิก  
 ประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกพิจารณาได้จากสมการที่ (4)

$$Eff = \frac{P_{mp}}{A_{irr} \times I_{irradiance}} \times 100\% \quad (4)$$

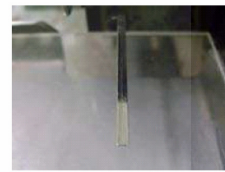
เมื่อ  $Eff$  คือ ประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิก  
 $A_{irr}$  คือ พื้นที่รับความเข้มแสงอาทิตย์  
 $I_{irradiance}$  คือ ความเข้มแสงอาทิตย์

**2.3 วิธีดำเนินการทดลอง**

การทดลองวิจัยในครั้งนี้ดำเนินการในสถานประกอบการอุตสาหกรรมผลิตแผงโฟโตโวลตาอิก เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนขั้นตอนทดลองปฏิบัติตามกระบวนการผลิตทุกขั้นตอน ยกเว้นในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ที่ต้องใช้เทคนิคการควบคุม อุณหภูมิ เวลาและขนาดลวดตัวนำไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อการยึดติดระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับแผ่นเซลล์ เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ หัวแร้งไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิ (Soldering Station) แผ่นเซลล์ชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon) ขนาด 200 ไมครอน ขนาด 156 x 156 มิลลิเมตร ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) 3.85 วัตต์ ประสิทธิภาพ ( $Eff$ ) คิดเป็นร้อยละ 15.8 ดังรูปที่ 2 และลวดตัวนำไฟฟ้าหรือเรียกว่าริบบอน ดังรูปที่ 3 ขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.20 X 2.0 และ 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร ทำจากทองแดงบริสุทธิ์เคลือบผิวด้วยโลหะผสมดีบุกและตะกั่วคิดเป็นร้อยละ 60 และ 40

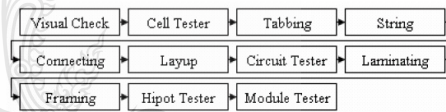


รูปที่ 2 แผ่นโซลาร์เซลล์ชนิดผลึกรวม



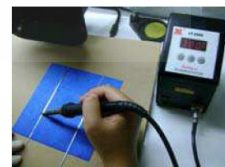
รูปที่ 3 ลวดตัวนำไฟฟ้า หรือ ริบบอน

ดำเนินการทดลองใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์โดยการควบคุมอุณหภูมิ 380 , 390 และ 400 °C เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์ต่อหนึ่งแถบสัมผัสของเซลล์ คือ 4, 5, 6 และ 7 วินาที วิธีการทดลองในครั้งนี้ให้ความสำคัญที่ใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ควบคุมค่าพารามิเตอร์เป็นหลัก ส่วนขั้นตอนอื่นๆ ปฏิบัติตามแผนผังกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังกระบวนการผลิตแผงโฟโตโวลตาอิก

วิธีการเชื่อมต่อเซลล์เริ่มด้วยขั้นตอนตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Check) คัดเลือกแผ่นเซลล์ที่มีสภาพสมบูรณ์ไม่แตกร้าว และนำไปวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องทดสอบเซลล์ (Cell Tester) เพื่อคัดเลือกราคาให้ตรงตามการทดลองครั้งนี้ จากนั้นดำเนินการทดลองใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ เพื่อเพิ่มคุณภาพการยึดติดให้ดีขึ้น เริ่มที่ขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์แบบบั้ง โดยการเชื่อมต่อลวดตัวนำไฟฟ้ากับแถบสัมผัสด้านหน้าเซลล์ซึ่งเป็นขั้วลบ จำนวน 36 เซลล์ต่อแผง ดังรูปที่ 5 และส่งต่อขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์สตรง โดยการเชื่อมต่อเซลล์อนุกรมกันเป็นแถว โดยนำปลายลวดตัวนำไฟฟ้าของเซลล์แผ่นแรกเชื่อมต่อกับแถบสัมผัสด้านหลังเซลล์แผ่นถัดไปซึ่งเป็นขั้วบวก แถวละ 9 เซลล์ 4 แถว ดังรูปที่ 6



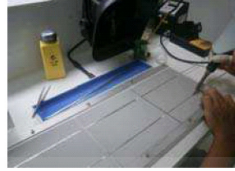
รูปที่ 5 ขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์แบบบั้ง (Tabbing)



**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

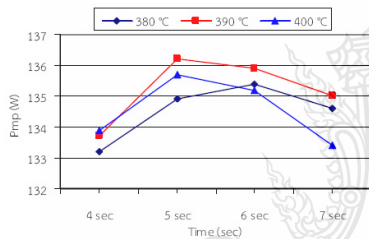
Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



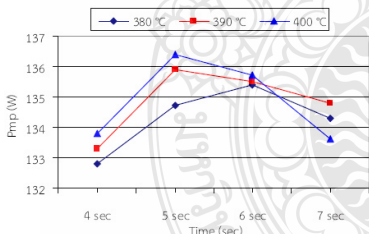
รูปที่ 6 ขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์สตริง (String)

ส่วนกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่อไปจนถึงขั้นตอนเครื่องวัดทดสอบแผงโฟโตโวลตาอิก ให้ดำเนินการตามกระบวนการผลิตทุกขั้นตอน จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองการใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์ที่เหมาะสม เพื่อประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกร่วมกับค่าใช้จ่ายต้นทุนที่มาจากจำนวนแผ่นเซลล์ แดกรั่วในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์ [2]

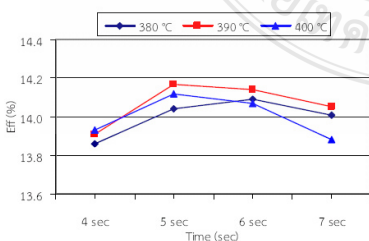
**3. ผลการทดลอง**



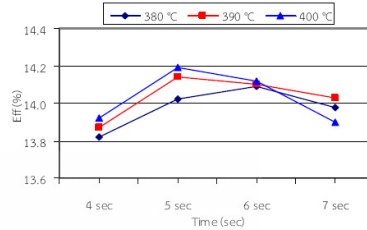
รูปที่ 7 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ขนาดลวดนำไฟฟ้า 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 8 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ขนาดลวดนำไฟฟ้า 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร

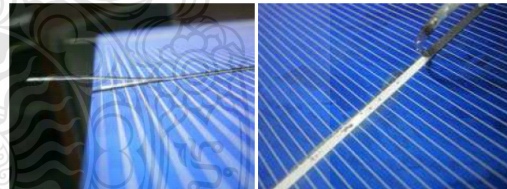


รูปที่ 9 ค่าประสิทธิภาพ ขนาดลวดนำไฟฟ้า 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 ค่าประสิทธิภาพ ขนาดลวดนำไฟฟ้า 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 24 ตัวอย่างที่ใช้เทคนิคการเชื่อมต่อแตกต่างกัน ดังรูปที่ 7 และ 9 เวลาเชื่อมต่อเซลล์ 5 วินาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 390 °C ใช้ลวดนำไฟฟ้า 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 136.2 วัตต์ และประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 14.17 แต่เมื่อเพิ่มขนาดลวดนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 8 และ 10 ใช้เวลา 5 วินาที ควบคุมอุณหภูมิ 400 °C จะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 136.4 วัตต์ และประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 14.19 ซึ่งมากกว่ากันเล็กน้อย การเพิ่มความหนาของลวดนำไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาแผ่นเซลล์บางแผ่นของแผงตัวอย่างในบางแผง แดกรั่วในขั้นตอนเคลือบแผง เมื่อทดลองควบคุมอุณหภูมิ 380 °C ที่เวลา 4 วินาที ขนาดลวดนำไฟฟ้าทั้งขนาด 0.20 X 2.0 และ 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร การเชื่อมต่อเซลล์จะยึดติดไม่ค่อยดี ดังรูปที่ 11 (ก) และเมื่อทดลองดึงลวดย้อนกลับจะสังเกตเห็นผิวของลวดนำไฟฟ้าและแผ่นเซลล์ไม่ค่อยยึดติดกัน ทำให้ลวดออกก่อนข้างง่าย ดังรูปที่ 11 (ข)



(ก) การยึดติดไม่ดี (ข) ทดลองลอกลวดนำไฟฟ้า

รูปที่ 11 การยึดติดของลวดนำไฟฟ้ากับแผ่นเซลล์ที่อุณหภูมิ 380 °C

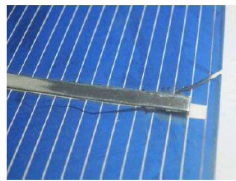
วิเคราะห์ที่แผ่นเซลล์แดกรั่วจากตัวอย่างทดลองเมื่อใช้ขนาดลวดนำไฟฟ้า 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 400 °C เวลา 6 และ 7 วินาที พบแผ่นเซลล์แตกในขั้นตอนเชื่อมต่อตัวอย่างละ 1 แผ่น ดังรูปที่ 12 แต่ไม่พบเซลล์แตกในขั้นตอนลามีเนต และเมื่อใช้ลวดนำไฟฟ้า 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 400 °C เวลา 5 และ 6 วินาที พบแผ่นเซลล์แตกในขั้นตอนเชื่อมต่อตัวอย่างละ 1 แผ่น แต่ตัวอย่างที่เพิ่มเวลา 7 วินาทีเชื่อมต่อเซลล์แตก 3 แผ่น การที่ใช้เวลานานเกินไปผลต่ออุณหภูมิสะสมและความหนาของลวดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้แผ่นเซลล์งอขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้แผ่นเซลล์เกิดความเครียดแดกรั่วได้ง่ายขึ้น และตัวอย่างที่ใช้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

*Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)*

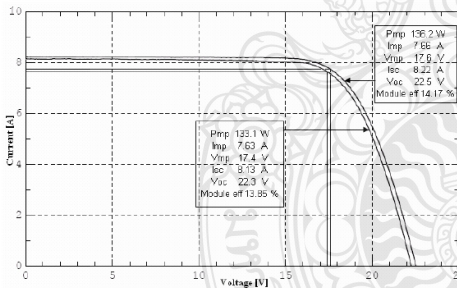
ลวดนำไฟฟ้าหนาเพิ่มขึ้น 5 ตัวอย่าง ที่ควบคุมอุณหภูมิและเวลาเชื่อมต่อเซลล์แตกต่างกัน พบแผ่นเซลล์แตกบางแผ่นในขั้นตอนลามิเนต ดังรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้า เพื่อต้องการปรับปรุงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกให้สูงขึ้นนั้น จะต้องพิจารณาเซลล์แตกเร็วจากความสูญเสียในขั้นตอนต่อเชื่อมเซลล์และลามิเนตด้วย



รูปที่ 12 ตัวอย่างเซลล์แตกในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์



รูปที่ 13 ตัวอย่างเซลล์แตกในขั้นตอนลามิเนต



รูปที่ 14 เียบยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อใช้เทคนิคเชื่อมต่อเซลล์กับวิธีเดิม

จากกระบวนการประกอบแผงโฟโตโวลตาอิกที่ผลิตขึ้นโดยวิธีที่ 1 ใช้อุณหภูมิได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 133.1 วัตต์ และประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 13.85 ตามลำดับ แผ่นเซลล์แตกเร็วจากขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์คิดเป็นร้อยละ 5.19 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการใช้เทคนิคเชื่อมต่อเซลล์ที่เหมาะสมจากการพิจารณาคัดเลือกได้ดังรูปที่ 14

**3. สรุปผลการทดลอง**

จากการทดลองเมื่อใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเซลล์โดยควบคุมอุณหภูมิ 390 °C เวลาเชื่อมต่อเซลล์ 5 วินาที และขนาดลวดนำไฟฟ้า

0.20 X 2.0 มิลลิเมตร มีข้อดีเมื่อเทียบกับวิธีเดิมของกระบวนการผลิตที่ควบคุมอุณหภูมิ 410 ถึง 430 °C เวลาเชื่อมต่อเซลล์ 5 ถึง 6 วินาที และขนาดลวดนำไฟฟ้า 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร ดังนี้

1. ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกเพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 2.33 และ 0.32 ตามลำดับ
  2. ไม่พบเซลล์แตกในขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์และเคลือบแผง
  3. ทำให้ต้นทุนการผลิตเฉพาะแผ่นเซลล์ลดลง คิดเป็นร้อยละ 4.93 ข้อดีเมื่อเทียบกับการเชื่อมต่อด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ ดังนี้
    1. แก้ไข เปลี่ยนรูปแบบและขนาดของแผงปฏิบัติได้ง่ายกว่า
    2. ต้นทุนการผลิตต่ำกว่า ขณะที่วัสดุประกอบแผงมีราคาลดลง
- จึงเกิดการขยายตัวทั้งทางด้านการผลิตและนำไปใช้งานเป็นจำนวนมาก ข้อเสียเมื่อเทียบกับการเชื่อมต่อด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ ดังนี้
1. การควบคุมเวลาเชื่อมต่อเซลล์ มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า
  2. การควบคุมคุณภาพของการเชื่อมต่อเซลล์ปฏิบัติได้ยากกว่า
  3. ต้องพึ่งพาทักษะและความสามารถของพนักงาน
  4. ให้กำลังการผลิตที่ต่ำกว่า

**5. กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณบริษัท โซล่าเพนเวอร์ เทคโนโลยี จำกัด เอื้อเฟื้อสถานที่ศึกษาทดลองสำหรับงานวิจัยในสถานประกอบการจริง

**เอกสารอ้างอิง**

[1] A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering" John Wiley & Sons Ltd, England, 2003

[2] A. Schneider, "A New Approach in Solar Cell Module Interconnection Technique Resulting in 5-10% Higher PV Module Power Out Put," 4<sup>th</sup> IEEE WCPEC Hawaii, p. 2073, 2006



สันติ มั่นคง  
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วช.ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า งานวิจัยที่สนใจคือ การปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตแผงโฟโตโวลตาอิก



สมชัย ทธิวุฒโรดม  
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Northumbria University, UK ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจคือ Photovoltaic Power System and Electrical Power System



บทความวิชาการ

ฉบับรวมเล่ม

# การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

9<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand



## พลังงานสีเขียวเพื่อโลกที่สดใส Green Energy Brightens Our World

ณ ชลพฤกษ์ รีสอร์ท อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก  
8-10 พฤษภาคม 2556

จัดการประชุมโดย  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



## ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ศ.ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์  
ผศ.ดร. กอดขวัญ นามสงวน  
ผศ.ดร. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศ.ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์  
รศ.ดร. สักกมน เทพหัตถิน ณ ออยุธยา

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร. เพ็ญญารัตน์ จินดา  
ดร. อำนาจ บุญลอย  
ดร. ฉัตรชัย นิยมล

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร. สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด  
รศ.ดร. จุฑาณัติ เมธิยานนท์  
ผศ.ดร. นุภาพ แยมไทรพัฒน์  
ผศ.ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์  
ผศ.ดร. วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์  
ผศ.ดร. สมชาย ศรีพัฒนพิพัฒน์  
ผศ.ดร. ศุภเกียรติ ศรีพนมธนาการ  
ผศ.ดร. ขวัญจิต วงษ์ขารี  
ผศ.ดร. สลิลทิพย์ สิ้นธุสนธิชาติ  
ผศ.ดร. ประสาน สถิตยเรือศักดิ์  
ดร. วาโย ช้างเจริญ  
ดร. สมศักดิ์ เพ็ชรกุล  
ดร. วิไลลักษณ์ สระมุล  
ดร. รุติพล หุยนันท์  
อ. กิตติศักดิ์ ยงศิริ  
อ. ขวัญชัย หนาแน่น  
อ. ปุณยภัทร ภูมิภาค  
อ. ไมตรี กระทบพิจิตร

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดิ์พิชญ์  
ดร. สมชัย หิรัญโรตม  
ดร. ขวัญชัย จ้อยเจริญ  
ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์  
ดร. บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว  
ดร. วารุณี อริยะวิริย  
ดร. ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์กุลนันท์  
ดร. บุญยั้ง ปลั่งกลาง  
ดร. อำนวย เรืองวารี

ดร. สถาพร ทองวิค  
ดร. สโรชา เจริญวัย  
ดร. สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผศ. วิศิษฐ์ สีสมาติกุล

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร. ชโลธร ธรรมแท้  
ดร. กীরติ สุกข์พันธ์  
ดร. ชีระชาติ พรพิบูลย์

### มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร. สมชาย มณีวรรณ  
ดร. ยงยุทธ ชนบดีเฉลิมรุ่ง  
ดร. สิริมาส เสงรัมย์  
ดร. สันต์ จันทร์สมศักดิ์  
ดร. สุพรรณนิภา วัฒนา  
ดร. ศรายุทธ วิทยุณี

### มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร. มั่นทนา รังสิโยภาส  
ดร. วุชรินทร์ ดงบัง

### มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เจริญพร เลิศสถิตธนกร  
ผศ.ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด  
ดร. ชีรพัฒน์ ชมภูคำ  
ดร. โสภา สิวแพทย์  
ดร. นิดา ชัยมูล  
ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี

### มหาวิทยาลัยมหิดล

ดร. รุ่ง กิตติพิชัย  
ดร. วรศิษฐ์ ทรูทัศน์วินท์  
รศ. ศุภชัย นาทะพันธ์

### มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

ดร. โยธิน อึ้งกุล  
ดร. ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล

### มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

รศ.ดร. วัชรระ เพิ่มชาติ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง  
ผศ.ดร. สมพร ธเนศวรณิษฐ์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ผศ.ดร. ชยุต นันทคุลิต

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ทีบุญมา

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

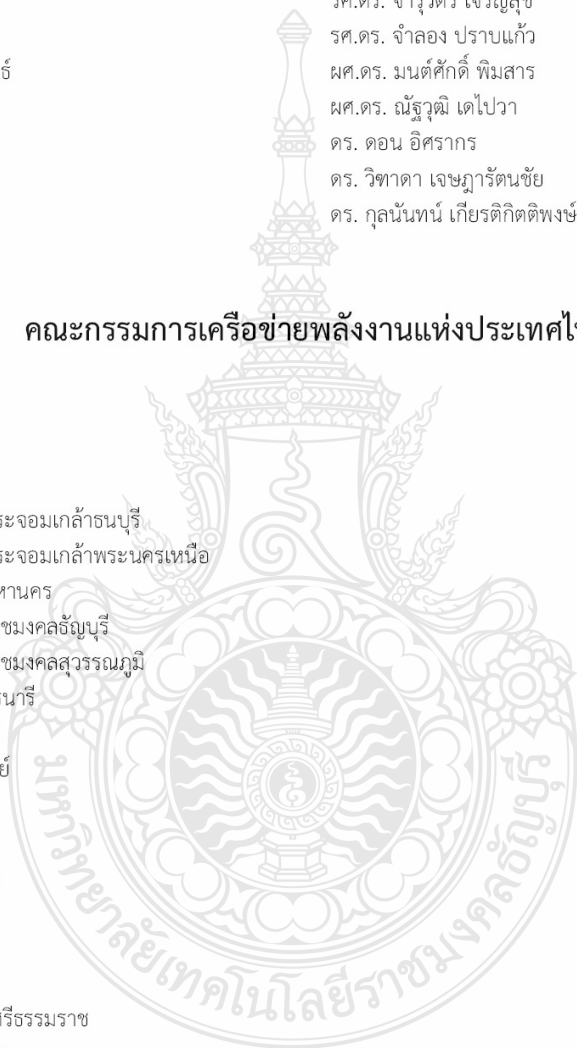
ดร. เทพฤทธิ์ ทองชุบ  
ดร. กীরติ ชยะกุลศิริ  
ดร. วิชชากร เองศรีธวัช  
ดร. ชลธิศ เอี่ยมวรภูมิกุล  
ดร. วริศรา เลิศไพฑูรย์พันธ์  
ดร. นิमित บุญภิรมย์  
อ. อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ  
อ. เผชิญ จันทร์สา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์  
รศ.ดร. ชินรัชย์ เรียรพงษ์  
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข  
รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว  
ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร  
ผศ.ดร. ณ์รัฐดี เดิโปวา  
ดร. ดอน อิศรากร  
ดร. วิฑาดา เจษฎารัตนชัย  
ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์

## คณะกรรมการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยทักษิณ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
มหาวิทยาลัยบูรพา  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
มหาวิทยาลัยมหิดล  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
มหาวิทยาลัยรังสิต  
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช  
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง  
มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
มหาวิทยาลัยศิลปากร



สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม: Environmental Managements (EVM)		
รหัสอ้างอิงบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
EVM001	การลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันไฟโรไลซิสที่ได้จากขยะยางรถยนต์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยา	854
EVM002	การวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ: กรณีศึกษาตัวอย่างสวนปาล์มน้ำมันและโรงสกัดน้ำมันปาล์มของประเทศไทย	860
EVM003	เครื่องวัดและวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และ 10 ในอากาศ	868
EVM004	การบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยกระบวนการโอโซน	876
EVM005	การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำมันเชื้อเพลิง จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก	883
สาขาลังงานทดแทน: Renewable Energy (RE)		
รหัสอ้างอิงบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
RE001	กระบวนการผลิตไฮโดรเจนโพรไซไดรด์จากไฮโดรเจนบอเรตเพื่อใช้ในการกักเก็บไฮโดรเจนด้วยการบดโดยบอลมิลล์ร่วมกับการให้ความร้อน	890
RE002	โปรตีนเซอร์แก๊สจากแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบตทูดนิ่งเปลวไฟไหลลงโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบและซีลีอ์ร่วมกับไอน้ำ	898
RE003	การศึกษาออกแบบอุโมงค์ลม 3 ทิศทาง สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมแนวแกนตั้ง	904
RE004	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเหมาะสมของระบบไฟส่องถนนพลังงานแสงอาทิตย์บนเกาะเต่า	910
RE005	การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการใช้หัวแร้งไฟฟ้าในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์	916
RE006	Experimental Analysis of a Charcoal Downdraft Gasifier and Gasoline with Motorcycle Engine	922
RE007	การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้กระถินสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลของกองทัพเรือไทย	929
RE008	การพิจารณาค่าต้นทุนและเพิ่มคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยติดตั้ง PV และตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายปฐมภูมิด้วย NSGA-II	936
RE009	ศึกษาอิทธิพลของแผนกระจายอากาศความเร็วอากาศและปริมาณอนุภาคที่มีผลต่อการหมุนวนของอนุภาคภายในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดชั้นโรงงานต้นแบบ	942
RE010	การวิเคราะห์กังหันลมแบบแกนตั้ง	949
RE012	การศึกษากระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลเพื่อพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลแบบ Inverted Updraft Gasifiers	956
RE013	การป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงสำหรับระบบไฟโตโวลตาอิกแบบบูรณาการร่วมกับอาคาร	964
RE014	การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากกลีเซอรอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา	969
RE015	เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียมสำหรับทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์	976
RE016	การศึกษาสมรรถนะและมลพิษไอเสียจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า	980
RE017	พินกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก	988
RE018	การวิเคราะห์การทำงานของเตาหุงต้มแบบเหนียวนำความร้อนด้วยวงจรถอนเวอร์เตอร์คลาสอี	994
RE019	การออกแบบใบหญ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม	1000
RE020	คุณลักษณะมลพิษอนุภาคไบโอดีเซลในเครื่องยนต์	1006
RE021	การศึกษาสเปรย์ของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลในระบบหัวฉีดความดันสูง	1012
RE022	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเคชันของปาล์มโอเลอินกับโพพานอลด้วยคลื่นอัลตราโซนิค	1020
RE023	การเปรียบเทียบระบบการให้ความร้อนในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเคชันจากน้ำมันปาล์ม	1025
RE024	การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์เข้าสู่ระบบสายส่ง	1032



รหัสบทความ:  
RE005

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการใช้หัวแร้งไฟฟ้าในอุตสาหกรรมประกอบ  
แผงเซลล์แสงอาทิตย์

The Study on Solar Cell Interconnection Using Soldering Iron in  
PV Module Assembly Industry

สันติ มั่นคง และ สมชัย หิรัญโรดม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110  
โทร 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: mankhong.st@gmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน โดยวิธีการใช้หัวแร้งไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานในการดำเนินการ ในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปฏิบัติการทดลองการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยการควบคุมตัวพารามิเตอร์ดังนี้ อุณหภูมิ เวลา ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งบัสบาร์ และขนาดของลวดตัวนำไฟฟ้า หรือ ริปบอน หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ความเสียหายจากการแตกร้าวของการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองจะถูกวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงใช้ในกระบวนการเชื่อมต่อเซลล์แทบบิง (Tabbing) และสตริง (String) จากผลการศึกษาดทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในกระบวนการผลิต คือ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อริบบอนกับบัสบาร์ประมาณ 5 วินาทีต่อหนึ่งบัสบาร์ และตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยวิธีนี้ควรอยู่ที่ขนาด 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร จากวิธีนี้ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้น 3.1 วัตต์ และแผ่นเซลล์ไม่แตกร้าวจากกระบวนการเชื่อมต่อเซลล์และเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

**คำหลัก:** การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์, หัวแร้งไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

**Abstract**

This paper presents the study on polycrystalline silicon solar cell interconnection using soldering iron that is an essential to assemble PV module in industries. The experimental practice for solar cell interconnection, some parameters must be controlled as follows: temperature, time that to be used for solar cell interconnection on a busbar and conductive wire size or ribbon to calculate maximum power of PV module. The solar cells are cracked and the suitable parameters from the experimental practice are analyzed for improvement the process of the tabbing and string. The experimental results show that the suitable parameters for interconnection process are at 390 °C, time for the process of ribbon and busbar connection is 5 second and the suitable conductive wire size is 0.20 X 2.0 mm. By this process, the maximum power of PV module can be increased to 3.1 watts and the solar cells are not cracking from the interconnection and laminate module processes.

**Keyword:** Solar cell Interconnection, Soldering Iron, Maximum Power of PV Module

**1. บทนำ**

ปัจจุบันอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีเชื่อมต่อลวดตัวนำไฟฟ้า หรือ แทบบิงริบบอน (Tabbing Ribbon) ด้วยหัวแร้งไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิ

(Soldering Station) อุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์ด้วยวิธีดังกล่าว ใช้ราคาต้นทุนในกระบวนการผลิตที่ต่ำกว่าวิธีการใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ และยังสามารปรับปรุงเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้ง่ายกว่า จึงทำให้อุตสาหกรรม





## รหัสบทความ: RE005

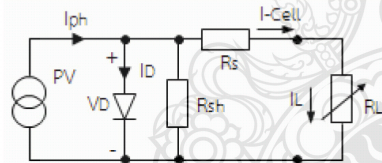
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

ประกอบแผงเซลล์ด้วยวิธีนี้มีผู้ประกอบการดำเนินการอยู่ ทั้งในและต่างประเทศ เช่น ประเทศจีนและอินเดีย เป็นต้น จากการศึกษากระบวนการเชื่อมต่อเซลล์ด้วย หัวแร้งไฟฟ้าโดยพนักงานปฏิบัติการ พบปัญหาที่ควรปรับปรุงเกี่ยวกับการเชื่อมต่อเซลล์คือ ผิววัสดุของลวดนำไฟฟ้ากับแผ่นเซลล์ยึดติดกันไม่ค่อยดีและบางครั้งทำให้แผ่นเซลล์แตกร้าว จากปัญหาดังกล่าวจึงต้องหาวิธีทดลองปรับตั้งค่าตัวพารามิเตอร์ที่มีผลในการเชื่อมต่อเซลล์คือ อุณหภูมิ เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่ง บัสบาร์ และขนาดของลวดนำไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริง การเชื่อมต่อที่ยึดติดดีจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) และประสิทธิภาพ ( $Eff$ ) ของแผงเซลล์เพิ่มขึ้น และสามารถลดจำนวนแผ่นเซลล์ที่แตกร้าวจากการเชื่อมต่อ จึงเป็นผลทำให้ราคาต้นทุนของวัตถุดิบลดลง

## 2. ดำเนินการศึกษา

### 2.1 ทฤษฎีของพลังงานแสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์[1] แสดงดังรูปที่ 1 พิจารณากระแสไฟฟ้าได้จาก สมการที่ (1)



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$I_{sh}$  คือ กระแสวงจรขนาด

$I_D$  คือ กระแสไดโอด

$I_{ph}$  คือ กระแสโฟตรอน

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสไบอัสอิมิตีวย้อนกลับ

$q$  คือ ประจุอิเล็กตรอน  $1.602 \times 10^{-19}$  คูโลมบ์

$V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด

$n$  คือ แฟกเตอร์ทางอุดมคติ

$k$  คือ ค่าคงที่ Boltzman  $1.3806504 \times 10^{-23}$

$T$  คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์

$R_{sh}$  คือ ความต้านทานขนานที่เกิดจากสภาพรอยต่อที่สร้างขึ้น

$R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรมที่เกิดจากความต้านทานของผิวสัมผัสด้านหน้า (Front Busbar) และด้านหลัง (Back Busbar)

กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3)

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (3)$$

ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์พิจารณาได้จากสมการที่ (4)

$$Eff = \frac{P_{mp}}{A_{irr} \times Irradiance} \times 100\% \quad (4)$$

เมื่อ  $Eff$  คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$P_{mp}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$A_{irr}$  คือ พื้นที่รับความเข้มแสงอาทิตย์

$Irradiance$  คือ ความเข้มแสงอาทิตย์

ฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) คือ อัตราส่วนของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mp}$ ) กับกระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mp}$ ) หารด้วย ผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) กับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) พิจารณาได้จากสมการที่ (5)

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (5)$$

### 2.2 การเตรียมการศึกษา

การเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับการศึกษาเชื่อมต่อเซลล์ในกระบวนการผลิตครั้งนี้มาจากการศึกษาวิธีปฏิบัติงานของพนักงานตำแหน่งแทปบิงและตำแหน่งสตริง เครื่องมือที่ใช้เชื่อมต่อเซลล์ คือ หัวแร้งไฟฟ้า (Soldering Station) กำลังไฟฟ้า 80 วัตต์ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 200 ถึง 480 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2 (ก) ลวดตัวนำไฟฟ้า (Conductive Wire) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผงเซลล์ ดังรูปที่ 2 (ข) และแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอน (Polycrystalline Silicon) ยี่ห้อ MOTECH ขนาด  $156 \times 156$  มิลลิเมตรหนา 200 ไมครอน ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผ่นเซลล์ ( $P_{mp}$ ) 3.85 วัตต์ ประสิทธิภาพของแผ่นเซลล์ ( $Eff$ ) คิดเป็นร้อยละ 15.8 ดังรูปที่ 2 (ค) และ (ง)



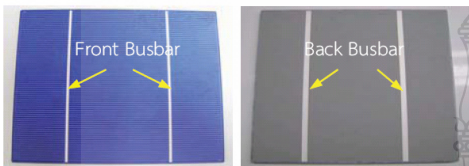


**รหัสบทความ:**  
**RE005**

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก



(ก) หัวแรงไฟฟ้า (ข) ลวดตัวนำไฟฟ้า

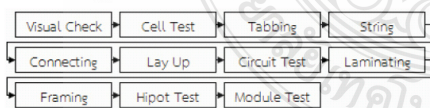


(ค) ด้านหน้าแผ่นเซลล์ (ขั้วลบ) (ง) ด้านหลังแผ่นเซลล์ (ขั้วบวก)  
รูปที่ 2 อุปกรณ์และวัสดุทดลองเชื่อมต่อเซลล์

จากการศึกษาเอกสารบันทึกคุณภาพการตรวจสอบกระบวนการผลิตได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับทดลองเชื่อมต่อเซลล์ดังนี้ ค่าอุณหภูมิ คือ 380 องศาเซลเซียส 390 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมต่อเซลล์ต่อระยะหนึ่งบัสบาร์ คือ 4 วินาที 5 วินาที 6 วินาที และ 7 วินาที ริปบอนหรือลวดตัวนำไฟฟ้าขนาดหน้าตัดคือ 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร และ 0.24 x 2.0 มิลลิเมตร ทำจากทองแดงความบริสุทธิ์คิดเป็นร้อยละ 99.99 เคลือบผิวหนา 20 ไมครอน ด้วยโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่วคิดเป็นร้อยละ 60 และ 40

**2.3 วิธีดำเนินการศึกษาทดลอง**

รายละเอียดวิธีดำเนินการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นที่ขั้นตอนเกี่ยวกับการเชื่อมต่อเซลล์เป็นหลัก[2] คือ ขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์แบบบั้งและสตริง ด้วยวิธีใช้หัวแรงไฟฟ้าและการควบคุมตัวพารามิเตอร์ ส่วนขั้นตอนอื่นๆของกระบวนการผลิตจะปฏิบัติและดำเนินการตามกระบวนการผลิตของทางโรงงาน เพื่อให้สอดคล้องกับขั้นตอนการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการผลิตประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน

จากรูปที่ 3 นำแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นตัวอย่างทดลองในครั้งนี้ เข้าสู่กระบวนการผลิตโดยเริ่มที่ขั้นตอนการตรวจสอบเซลล์ด้วยสายตา (Visual Check) เพื่อทำการตรวจสอบหารอยแตกร้าวที่ด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นเซลล์ จากนั้นนำแผ่นเซลล์ที่ผ่านการตรวจสอบไปยัง

ขั้นตอนทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องทดสอบเซลล์ (Cell Tester) ดังรูปที่ 4 เพื่อคัดเลือกค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามตัวอย่างที่ทดลอง และนำแผ่นเซลล์ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบส่งไปยังขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์แบบบั้งดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบเซลล์ (Cell Tester)



รูปที่ 5 ขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์แบบบั้ง (Tabbing)

ขั้นตอนนี้จะศึกษาการเชื่อมต่อลวดนำไฟฟ้า หรือ ริปบอนกับแถบสัมผัสด้านหน้าเซลล์ (Front Busbar) ซึ่งเป็นขั้วลบ จำนวน 36 เซลล์ต่อแผง และนำส่งไปยังขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์สตริง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์สตริง (String)

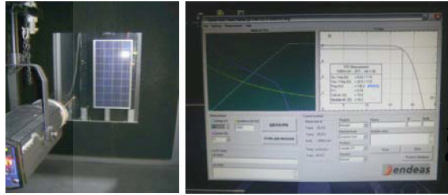
ขั้นตอนนี้จะศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์อนุกรมกันเป็นแถว (String) แถวละ 9 เซลล์ 4 แถว โดยการนำปลายริปบอนของเซลล์แผ่นแรกเชื่อมต่อกับแถบสัมผัสด้านหลังเซลล์ (Back Busbar) ถัดไปซึ่งเป็นขั้วบวก หลังจากนั้นนำแถวเซลล์ (String) แต่ละแถวที่ได้จากขั้นตอนสตริงส่งให้ขั้นตอนต่อวงจรไฟฟ้า (Connecting) ของแผงเซลล์ ขั้นตอนจัดวางวัสดุเคลือบแผงเซลล์ (Lay up) ขั้นตอนทดสอบวงจรไฟฟ้า (Circuit Test) ขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์ (Laminate) ขั้นตอนเข้ากรอบแผงเซลล์ (Framing) และติดตั้งกล่องรวมสาย (Junction Box) ขั้นตอนทดสอบฉนวนไฟฟ้า (Hipot Test) และขั้นตอนทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายด้วยเครื่องวัดจำลองแสงอาทิตย์ (Sun Simulator) หรือ



**รหัสบทความ:**  
**RE005**

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

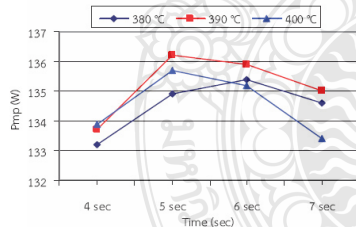
เครื่องวัดทดสอบแผงเซลล์ (Module Tester) ดังรูปที่ 7 และนำผลทดสอบค่าสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ทั้ง 24 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์การควบคุมค่าพารามิเตอร์ร่วมกับปัญหาความเสียหายของแผ่นเซลล์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อเซลล์แบบบั้งและสตริง



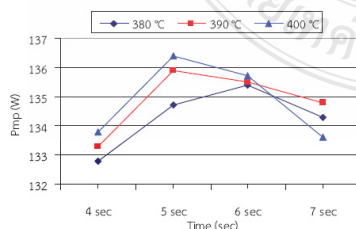
(ก) ภายในห้อง (ข) หน้าจอแสดงผลการทดสอบ  
รูปที่ 7 เครื่องวัดทดสอบแผงเซลล์ (Module Tester)

**3. ผลการทดลอง**

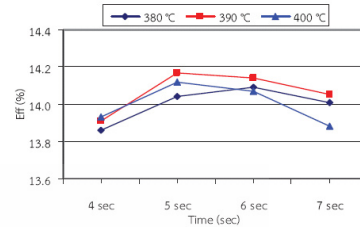
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที วัดได้ 136.2 วัตต์ ดังรูปที่ 8 และค่าประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 14.17 ดังรูปที่ 10 เมื่อเพิ่มขนาดริบบอนค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที วัดได้ 136.4 วัตต์ ดังรูปที่ 9 และค่าประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 14.19 ดังรูปที่ 11 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่พบปัญหาแผ่นเซลล์แตกร้าวในขั้นตอนเคลือบแผงเซลล์



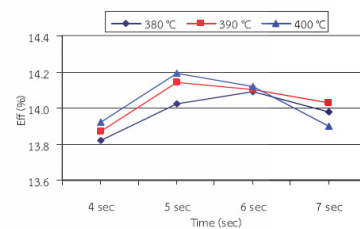
รูปที่ 8 ผลทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ )  
ใช้ขนาดริบบอน 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 ผลทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ )  
ใช้ริบบอนขนาด 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร

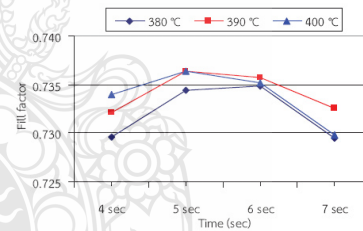


รูปที่ 10 ผลทดสอบค่าประสิทธิภาพ ( $Eff$ )  
ใช้ริบบอนขนาด 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร

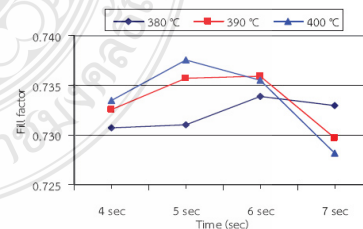


รูปที่ 11 ผลทดสอบค่าประสิทธิภาพ ( $Eff$ )  
ใช้ริบบอนขนาด 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร

ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ( $FF$ ) ดังรูปที่ 12 และ 13 จะมีคุณลักษณะแปรผันตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 12 ผลทดสอบค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ( $FF$ )  
ใช้ริบบอนขนาด 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 13 ผลทดสอบค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ( $FF$ )  
ใช้ริบบอนขนาด 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร

ค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) จะแปรผกผันกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังรูปที่ 14 และ 15 เมื่อพิจารณาพบว่าตัวอย่างที่ควบคุมเวลา 5 วินาที มีค่าความต้านทาน

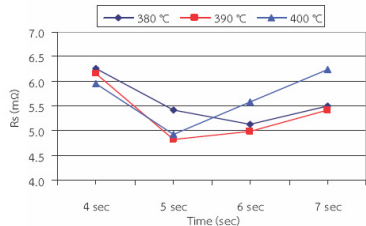




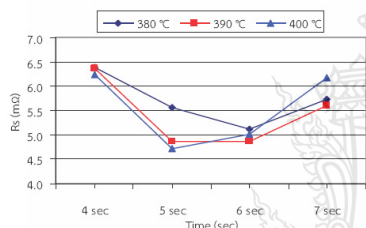
**รหัสบทความ:**  
**RE005**

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

อนุกรมต่ำที่สุด ซึ่งตัวอย่างอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส รับบอน 0.24 x 2.0 มิลลิเมตร จะมีค่าความต้านทานอนุกรมต่ำกว่าตัวอย่างอุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส รับบอน 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร เล็กน้อยเกิดจากการเชื่อมต่อที่ยึดติดดีเหมือนกัน แต่ขนาดรับบอนหนากว่ากัน

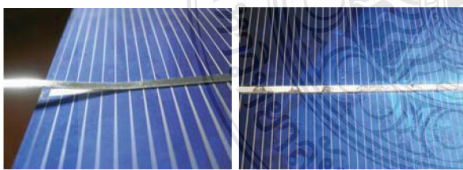


รูปที่ 14 ผลทดสอบค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.20 X 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 15 ผลทดสอบค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ใช้รับบอนขนาด 0.24 X 2.0 มิลลิเมตร

การควบคุมอุณหภูมิต่ำและใช้เวลาเชื่อมต่อเซลล์เร็วเกินไปดังรูปที่ 16 พบว่ามีริบบอนยึดติดบนบัสบาร์ ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์เป็นบางส่วนและหลุดลอกได้ง่าย เมื่อทดลองลอกริบบอน

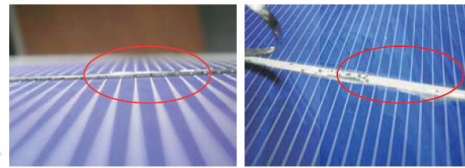


(ก) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า (ข) ลอกริบบอนด้านหน้าออก



(ค) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง (ง) ลอกริบบอนด้านหลังออก รูปที่ 16 ทดสอบที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส เวลา 4 วินาที และรับบอนขนาด 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร

การควบคุมอุณหภูมิสูงและใช้เวลาเชื่อมต่อเซลล์ช้าเกินไป พบว่าริบบอนยึดติดบนบัสบาร์ด้านหลังแนบแน่นดี ดังรูปที่ 17 (ค) ทดลองลอกริบบอนจะเห็นผิวริบบอนติดบนบัสบาร์อย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 17 (ง) แต่พบปัญหาที่ริบบอนหลุดออกจากบัสบาร์ด้านหน้าเซลล์ ดังรูปที่ 17 (ก) และ (ข) เนื่องจากความร้อนสะสมที่บัสบาร์ด้านหลังแผ่ลงมาทำลายการยึดติดของริบบอนด้านหน้าเซลล์ระหว่างเชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง



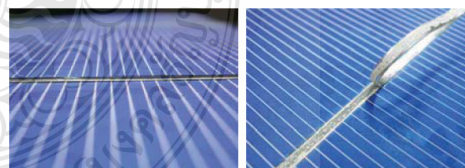
(ก) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า (ข) ลอกริบบอนด้านหน้าออก



(ค) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง (ง) ลอกริบบอนด้านหลังออก

รูปที่ 17 ทดสอบที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และรับบอนขนาด 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร

การควบคุมอุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และใช้รับบอนขนาด 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร พบว่าริบบอนยึดติดบนบัสบาร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังเซลล์แนบแน่นดีที่สุด ดังรูปที่ 18 (ก) และ (ค) ทดลองลอกริบบอนจะสังเกตเห็นผิวริบบอนติดบนบัสบาร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 18 (ข) และ (ง)



(ก) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหน้า (ข) ลอกริบบอนด้านหน้าออก



(ค) เชื่อมต่อเซลล์ด้านหลัง (ง) ลอกริบบอนด้านหลังออก รูปที่ 18 ทดสอบที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 5 วินาที และรับบอนขนาด 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร



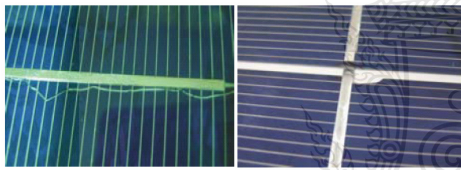
## รหัสบทความ: RE005

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

แผงตัวอย่างที่ควบคุมอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาเชื่อมต่อ 6 และ 7 วินาที ขนาดรีบบอน 0.20 x 2.0 และ 0.24 x 2.0 มิลลิเมตร ตรวจพบเซลล์แตกในชั้นตอนเชื่อมต่อ เนื่องจากอุณหภูมิสูงและใช้เวลาเชื่อมต่อเซลล์นานเกินไป แผงตัวอย่างขนาดรีบบอน 0.24 x 2.0 มิลลิเมตร พบเซลล์แตกในชั้นตอนลามีเนต เนื่องจากรีบบอนมีขนาดหนาเกินไป แข็งและบิดงอได้ยาก จึงทำให้รีบบอนกดทับเซลล์จนแตกได้ ในขณะที่เคลือบแผงเซลล์แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 19

ตารางที่ 1 เซลล์แตกจากร้าวจากการเชื่อมต่อเซลล์และลามีเนต

ขนาดรีบบอน	อุณหภูมิ (°C)	จำนวนแผ่นเซลล์แตกจากร้าวต่อหนึ่งแผงเซลล์ตัวอย่าง (แผ่น)							
		4 วินาที		5 วินาที		6 วินาที		7 วินาที	
		เชื่อมต่อ	ลามีเนต	เชื่อมต่อ	ลามีเนต	เชื่อมต่อ	ลามีเนต	เชื่อมต่อ	ลามีเนต
0.20 x 2.0 มิลลิเมตร	380	-	-	-	-	-	-	-	-
	390	-	-	-	-	-	-	-	-
	400	-	-	-	-	1	-	1	-
0.24 x 2.0 มิลลิเมตร	380	-	-	-	-	-	1	-	-
	390	-	1	-	-	-	-	1	1
	400	-	-	1	-	1	1	3	2



(ก) เซลล์ร้าวตามแนวรีบบอน (ข) ขอบเซลล์แตกใต้รีบบอน รูปที่ 19 เซลล์แตกจากร้าวจากรีบบอนหนาในชั้นตอนลามีเนต

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิกอนความหนา 200 ไมครอน ขนาด 156 x 156 มิลลิเมตร ด้วยวิธีใช้หัวแรงไฟฟ้า ควบคุมอุณหภูมิ โดยการควบคุมตัวพารามิเตอร์ คือ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่ง บัสบาร์ และขนาดของตัวนำไฟฟ้าหรือรีบบอน จากผลการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ปฏิบัติในกระบวนการผลิต คือ อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อรีบบอนกับบัสบาร์ ประมาณ 5 วินาทีต่อหนึ่งบัสบาร์ และตัวนำไฟฟ้าหรือรีบบอนที่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อเซลล์ด้วยวิธีนี้ควรอยู่ที่ขนาด 0.20 x 2.0 มิลลิเมตร ศึกษาวิเคราะห์และพิจารณาการคัดเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ดังนี้

1. ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์ ( $P_{mp}$ ) เท่ากับ 136.2 วัตต์ เพิ่มขึ้นจากกระบวนการผลิตของทางโรงงาน 3.1 วัตต์

2. ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์ ( $Eff$ ) คิดเป็นร้อยละ 14.2 ถือว่าเป็นค่าที่สูง

3. การเชื่อมต่อระหว่างรีบบอนกับบัสบาร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์ยึดติดกันดีมาก

4. ไม่พบแผ่นเซลล์แตกจากร้าวจากชั้นตอนเชื่อมต่อเซลล์และลามีเนตแผงเซลล์

ส่วนตัวอย่างทดลองค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ปฏิบัติในกระบวนการผลิตคือ

1. การควบคุมค่าอุณหภูมิต่ำและเวลาที่เร็วเกินไป การเชื่อมต่อระหว่างรีบบอนกับบัสบาร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังจะยึดติดไม่ดี และทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลง

2. การควบคุมค่าอุณหภูมิสูงและเวลาที่ช้าเกินไป ในขณะที่เชื่อมต่อเซลล์ด้านหลังหรือสตรึง ความร้อนสะสมจะถ่ายเทจากบัสบาร์ด้านหลังไปทำลายการยึดติดของการเชื่อมต่อด้านหน้า จนบางครั้งทำให้แผ่นเซลล์แตกจรร้าวได้ และทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลง

3. การเพิ่มความหนาของรีบบอนขนาดที่หนาเกินไป ไม่ได้ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์สูงแตกต่างกันมาก แต่จะมีปัญหาแผ่นเซลล์แตกจรร้าวในชั้นตอนเคลือบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท โซล่าเพาเวอร์ เทคโนโลยี จำกัด เอื้อเฟื้อสถานที่ศึกษาทดลองสำหรับงานวิจัยในสถานประกอบการจริง

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Castaner, and S. Silvertre, "Modeling Photovoltaic Systems using PSpice," John Wiley & Sons Ltd, England, 2002.
- [2] A. Schneider, "A New Approach in Solar Cell Module Interconnection Technique Resulting in 5-10% Higher PV Module Power Out Put," 4<sup>th</sup> IEEE WCPEC Hawaii, p. 2073, 2006.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล

นายสันติ มั่นคง

ที่อยู่

82 หมู่ 4 ต.ตลาดน้อย อ.บ้านหมอ

จ.สระบุรี 18130

การศึกษา

พ.ศ. 2545

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2545 – 2548

วิศวกรซ่อมบำรุง บริษัท อเล็กซอน จำกัด

พ.ศ. 2548 – 2556

ผู้จัดการแผนกผลิต บริษัท โซล่าเพาเวอร์ เทคโนโลยี จำกัด

