



การวิจัยสมบัติทางไดอิเล็กทริกโดยการประยุกต์สนามไฟฟ้า  
สำหรับการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายแผงเซลล์แสงอาทิตย์

นายชาญชัย เดชธรรมรงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน  
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2555

การวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็กตริกโดยการประยุกต์สนามไฟฟ้า  
สำหรับการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายแผงเซลล์แสงอาทิตย์

นายชาญชัย เศรษฐมรงค์ วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน  
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



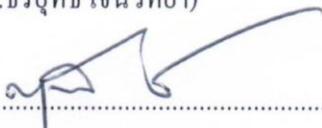
ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา)



กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร.ธีรยุทธ์ เจนวิทยา)



กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.กฤษณพงศ์ กীরติกร)



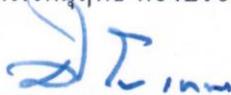
กรรมการ

(อาจารย์ชาย ชีวะเกต)



กรรมการ

(ดร.จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน)



กรรมการ

(รศ. ดร.ศิริชัย เทพา)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็กตริกโดยการประยุกต์สนามไฟฟ้าสำหรับการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายแผงเซลล์แสงอาทิตย์
หน่วยกิต	42
ผู้เขียน	นายชาญชัย เศรษฐธรรมรงค์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ธีรยุทธ เจนวิทยา ดร.กฤษณพงศ์ กีรติกร
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2555

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รวบรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย จำนวน 116 แผง เป็นแบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว 39 แผง ใช้งานมากกว่า 15 ปี และอีก 77 แผง ใช้งานมากกว่า 5 ปี มีทั้งแบบซิลิกอนหลายผลึก 40 แผง และแบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว 37 แผง พบการเสื่อมสภาพร่วมกันคือ อีวีเอเปลี่ยนสี เป็นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล เกิดการลอร่อนกลางเซลล์มากกว่าขอบ เกิดการกัดกร่อนเล็กน้อยบนบัสบาร์ แผ่นปิดหลังหูดและกาวผนึกขอบกรอบแตก ผลการวัดค่าสมรรถนะทางไฟฟ้าพบว่า แผงที่อีวีเอไม่มีการเปลี่ยนสีหรือลอร่อน ค่าทางไฟฟ้ายังใกล้เคียงกับที่ระบุแต่แผงที่อีวีเอลอร่อนตรงกลางเซลล์ 22 เซลล์ขึ้นไป มีกราฟกระแส-แรงดันคล้ายเส้นตรงแม้แรงดันใกล้เคียงกับที่ระบุแต่กระแสลัดวงจรน้อย เมื่อวัดค่าความต้านทานจนวนพบว่าแผงที่เสื่อมสภาพมากค่าความต้านทานมีแนวโน้มลดลง ผลการทดสอบจนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่ 4 kV เกิด Ringing Frequency และจากการจำลองด้วยการปล่อยประจุโนโพรจจนวนพบผลที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ได้วัดค่าไดอิเล็กตริกของแผ่นหุ้มผนึกแผงที่เสื่อมสภาพจากแผงตัวอย่าง 6 แผง พบว่ากระแสและแผ่นปิดหลังแต่ละแผ่นมีค่าไม่ต่างกัน แต่อีวีเอที่ลอร่อนต่างกันมีค่าความจุไฟฟ้าต่างกัน เมื่อวัดสภาพต้านทานของอีวีเอพบว่า ค่าความต้านทานจนวนของแผงแปรตามค่าความต้านทานของอีวีเอ เมื่อหาค่าทางไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 kHz ถึง 1 MHz พบว่าอีวีเอที่เสื่อมสภาพต่างกันมีค่าไดอิเล็กตริกไม่เท่ากัน สุดท้ายคือการวัดค่าไดอิเล็กตริกของอีวีเอตามฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิพบว่า ค่าจริงและค่าจินตภาพมีค่ายอดต่างกันที่ -40°C ถึง 10°C เมื่อเทียบลักษณะการหูดลอกของอีวีเอพบว่า ค่ายอดของส่วนจินตภาพสูงมีการหูดลอกที่บัสบาร์และกลางเซลล์ แต่หากค่ายอดสูงในย่านอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ การหูดลอกจะอยู่ที่รอบๆ ขอบเซลล์

คำสำคัญ: สมบัติทางไดอิเล็กตริก/การเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์/การจนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์/การตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลาย

Dissertation Title	Diagnosis of Dielectric Properties by Applying Electric Fields for Nondestructive Testing of PV Modules
Dissertation Credits	42
Candidate	Mr. Chanchai Dechthummarong
Dissertation Advisor	Dr. Dhirayut Chenvidhya Dr. Krissanapong Kirtikara
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2555

### **Abstract**

In this work, 116 field-operated PV modules in Thailand were collected. 39 X-Si modules are used longer than 15 years. The remaining 77 modules are used longer than 5 years, 40 are p-Si modules and 37 are X-Si modules. Common deterioration is EVA discoloring from yellowing to browning, EVA delamination at center or edge on cells, little corrosion on busbars, back-sheet detachment, and brittle of edge sealants. I-V curve results show that the modules without significant deteriorations have closely to specifications. However, deteriorated modules, I-V curves are become straight. Even though open circuit voltage remains high, short circuit current is greatly reduced. We then measure electrical insulation of all modules. It is founded that deterioration modules have low electrical insulation. When applying impulse voltage at 4 kV into modules, we observe ringing frequencies. We build the model with partial discharge in voids. Simulated results are the same as experimental results. We study dielectric properties of materials from deterioration modules. Results show all glass and back-sheet have similar capacitance, but EVA shows distinctive capacitance. EVA volume resistances imply that insulation resistance of modules varies with EVA resistance. The dielectric constants EVA are determined in frequency 1 kHz to 1 MHz and the temperature -60°C to 120°C. It is founded that both real and imaginary part peak at -40°C to 10°C. Comparing EVA dielectric constants with deteriorations, EVA exhibiting a large imaginary part comes from delaminated EVA over busbars and center of the cell. But in EVA having the peak of imaginary part in a higher temperature, the specimens come from delaminated EVA located on cell edges.

Keywords: Dielectric Properties/PV Deterioration/PV Insulation/Nondestructive Testing

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก ดร.กฤษณพงศ์ กีรติกร และ ดร.ธีรยุทธ เจนวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือด้วย สติ ปัญญา กอปรด้วยวิริยะและอุตสาหะ เพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำ วิทยานิพนธ์ อาทิเช่น ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูล การนำเสนอข้อมูล และการนำเสนอผลงานทั้งในงานประชุมวิชาการและวารสารระดับนานาชาติ ที่เกิดขึ้นมาโดยตลอด อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งผู้เขียนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ได้ สำเร็จ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ชาย ชีวะเกตุ รศ. ดร.ศิริชัย เทพา และ ดร.จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา ที่ได้ให้ความกรุณามาเป็นประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำและอ่านตรวจทานอย่างละเอียด ทำให้การแก้ไขจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เกิดความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้น ในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ ส่วนสำคัญ อันหนึ่งมาจากการให้ ความอนุเคราะห์ ความร่วมมือ ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากแหล่ง ต่างๆ ดังนั้นผู้เขียนจึงขอถือโอกาสนี้ ขอขอบคุณมายัง ศ. ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ผู้ประสานงาน ทูตโครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งด้านวิชาการ ระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอขอบคุณศูนย์ส่งเสริมงานวิจัยและทรัพย์สินทาง ปัญญา ในด้านการประสานงานทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์ พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณผู้อำนวยการและ พนักงานทุกท่าน ณ ศูนย์พัฒนามาตรฐานและทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ ด้านการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขอขอบคุณ ผศ. ดร.ขรรค์ชัย คุลละสกุล ได้ช่วยในส่วนของ เครื่องมือวัด ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ ที่ช่วยทดสอบชิ้นวัสดุจน ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอขอบคุณ ภรรยา ลูก พร้อมทั้งญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้เขียนในด้านการเรียน และดำเนินชีวิตตลอดมา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดใดๆ ก็ตาม ผู้เขียนขออภัย มา ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูงและขอน้อมรับพร้อมทั้งขอบคุณในคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์และ สามารถนำมาปรับปรุงพัฒนาต่อไป และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงมีส่วนที่เป็น ประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ด
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ท
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	10
1.3 ขอบเขตของโครงการ	10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
1.5 กรอบแนวความคิดการวิจัย	11
<b>2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>12</b>
2.1 บทนำ	12
2.2 การหุ้มฉนวนแผงชนิดแผ่นผลึกซิลิกอน	14
2.3 การเสื่อมสภาพในแผง	23
2.4 กลไกการเสื่อมสภาพของไดโอดีทรานซิสเตอร์หุ้มฉนวน	29
2.5 การเสื่อมสภาพที่มีผลต่อการฉนวนของแผง	34
2.6 แบบจำลองสายส่งสำหรับสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์	37
2.7 การตรวจสอบแผงที่เกิดการเสื่อมสภาพ	42

	หน้า
<b>3. ระเบียบวิธีวิจัย</b>	<b>61</b>
3.1 บทนำ	61
3.2 การตรวจสอบสภาพแผงภายนอกด้วยตา	62
3.3 การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผง	63
3.4 การทดสอบฉนวนของแผงด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรง	65
3.5 การทดสอบฉนวนของแผงและแบบจำลองแผงภายใต้แรงดันอิมพัลส์	68
3.6 การวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นหุ้มฉนวนแผงที่เสื่อมสภาพต่างกัน	73
<b>4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล</b>	<b>81</b>
4.1 บทนำ	81
4.2 การตรวจสอบการเสื่อมสภาพภายนอกแผงที่สังเกตเห็นด้วยตา	81
4.3 การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผง	89
4.4 การทดสอบฉนวนหุ้มฉนวนแผงด้วยการประยุกต์สนามไฟฟ้ากระแสตรง	96
4.5 การทดสอบและเลียนแบบแผงด้วยแบบจำลองฉนวนและสายส่งภายใต้แรงดันอิมพัลส์	107
4.6 สมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นหุ้มฉนวนแผงที่มีการเสื่อมสภาพต่างกัน	115
<b>5. สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>130</b>
5.1 สรุป	130
5.2 ข้อเสนอแนะ	132
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>134</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>140</b>
ก การเสื่อมอายุพอลิเมอร์จากการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศรังสียูวีและอุณหภูมิ	140
ข สภาพภายนอกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	144
ค ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผง	161
ง เส้นกราฟกระแส-แรงดันของแผงจาก โครงการ มจร. (จังหวัดบุรีรัมย์และอีสาน เหนือ) วัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย และ ต. บ้านโสก อ.คอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ	163

	หน้า
จ สภาพแผงภายนอกของแผง B2-1, B3-4, B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1	165
ฉ ผลการบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ของแผงซึ่งมีรูปคลื่นเหมือนกันที่ค่ายอด แรงดันสูงสุด 4 kV	168
ช ค่าความเก็บประจุและค่าตัวประกอบความสูญเสียของชั้นตัวอย่างอีวีเอใน ฟังก์ชันของความถี่	170
ซ ค่าความเก็บประจุของชั้นตัวอย่างอีวีเอในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ	172
ฌ ค่าตัวประกอบความสูญเสียของชั้นตัวอย่างอีวีเอในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ	175
ญ ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงและจินตภาพของไดอิเล็กตริกที่เป็นฟังก์ชันของ ความถี่และอุณหภูมิ	178
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>185</b>

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ชนิดของความเสียหายของแผงที่ถูกสังเกตรพบในภาคสนาม	6
2.1	สมบัติทางด้านไดอิเล็กตริกของกระจก	15
2.2	ตัวอย่างสมบัติทางไฟฟ้าของอีวีเอ	17
2.3	สมบัติที่สำคัญของแผ่นปิดผนึกด้านหลัง	18
2.4	เปรียบเทียบสมบัติของยางซิลิโคนแบบ HTV และ EPDM	19
2.5	ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดพารามิเตอร์ไฟฟ้าที่ STC และค่าที่โฆษณา ของแผงที่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหลังการใช้งานในทะเลทรายเนเจอร์ของประเทศอิสราเอล	28
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะและกลไกการเสื่อมสภาพของแผง	33
2.7	ผลการวัดปริมาณความจุเจลของอีวีเอก่อนและหลังนำอีวีเอไปไว้กลางแจ้ง	35
2.8	ตัวอย่างผลการทดสอบทางไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 25°C	36
2.9	ระดับแรงดันเสิร์จอิมพัลส์สำหรับทดสอบความคงทนต่อแรงดันเสิร์จอิมพัลส์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	46
3.1	ความบกพร่องสำคัญของแผงที่สังเกตได้ด้วยตา	63
4.1	ผู้ผลิตและรุ่นของแผงที่นำมาศึกษาเรื่อง ไดอิเล็กตริกหุ้มผนึก	83
4.2	รายละเอียดที่ระบุของแต่ละบริษัท	83
4.3	เปรียบเทียบภาพรวมลักษณะการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงและด้านหลังแผงของกลุ่ม B1 ถึง B7	86
4.4	ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าของแผง B1-1, B1-3, B2-2	91
4.5	ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าของแผง B3-4, B3-7, B3-8, B3-9, B3-10, B4-3, B4-4, B4-6, B4-7, B4-9, B4-10, B4-11, B4-12, B4-13, B5-1, B6-3 และ B7-2	93
4.6	การเสื่อมสภาพของกลุ่มแผงที่กราฟกระแส-แรงดันไม่ปกติ	94
4.7	ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าของแผง B3-1, B3-2, B3-5, B3-6, B4-2, B4-8, B6-1, B6-2, B6-4, B6-6, B7-3 และ B7-4	95
4.8	ค่าความต้านทานฉนวนกลุ่มแผง โครงการ มจธ. และ โครงการอีสานเขียว	97
4.9	ค่าของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงที่มาจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร	99
4.10	ค่าของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงที่มาจากจังหวัดชัยภูมิ	100

ตาราง (ต่อ)	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางไดอิเล็กตริกกับการเสื่อมสภาพ ด้านหน้าแผง	102
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางไดอิเล็กตริกกับการเสื่อมสภาพ ด้านหลังแผง	102
4.13 ความหนาของไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนแผงกลุ่ม B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1	118
4.14 ความหนาของชั้นงานอีวีเอตัวอย่างและค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตร	122
ข.1 สภาพภายนอกแผงจากโครงการ มจร. 39 แผง	145
ข.2 สภาพภายนอกแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย จำนวน 37 แผง	148
ข.3 จากตำบล บ้าน โสภ อำเภอดอนสวรรค์ จังหวัด ชัยภูมิ จำนวน 40 แผง	152
ข.4 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV012 ซึ่งมีค่า ความต้านทานน้อยที่สุด	157
ข.5 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV013 ซึ่งมีค่า ความต้านทานรองจากค่าที่น้อยที่สุด	157
ข.6 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV018 ซึ่งมีค่า ความต้านทานมากที่สุด	157
ข.7 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV021 ซึ่งมีค่า ความต้านทานรองจากแผงที่มีค่ามากที่สุด	158
ข.8 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV09 ซึ่งมีค่า ความต้านทานใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย	158
ข.9 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV001 ซึ่งมีค่า ความต้านทานใกล้เคียงกับค่ามัธยฐาน	158
ข.10 สภาพภายนอกของแผงจากประเทศจีน รุ่น Model JDG.M รหัส 5144PV026 ซึ่งมีค่าความต้านทานมากที่สุด	159
ข.11 สภาพภายนอกของแผงจากประเทศจีน รุ่น Model JDG.M รหัส 5144PV033 ซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยที่สุด	159
ข.12 สภาพภายนอกของแผงรุ่น Model M75 รหัส 5144PV030 ซึ่งมีค่าความ ต้านทานมากที่สุด	159
ข.13 สภาพภายนอกของแผงรุ่น Model M75 รหัส 5144PV033 มีค่าความต้านทานน้อยสุด	160
ข.14 สภาพภายนอกของแผง SHARP รุ่น Model NE 1175E1	160

ตาราง (ต่อ)	หน้า
ค.1 ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใน กลุ่ม B1-B7	162
ค.2 ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติ สิรินธร จังหวัดเลย	162
ค.3 ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผงจากจังหวัดชัยภูมิ	162
จ.1 สภาพแผงภายนอกของแผง B2-1	166
จ.2 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B3-4	166
จ.3 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B4-12	166
จ.4 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B5-2	167
จ.5 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B6-3	167
จ.6 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B7-1	167
ญ.1 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B2-1	179
ญ.2 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B3-4	179
ญ.3 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B4-12	180
ญ.4 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B5-2	180
ญ.5 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B6-3	181
ญ.6 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B7-1	181
ญ.7 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B2-1	182
ญ.8 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B3-4	182
ญ.9 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B4-12	183
ญ.10 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B5-2	183
ญ.11 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B6-3	184
ญ.12 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B7-1	184

## รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	ตลาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศที่พัฒนาแล้ว	2
1.2	การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มประเทศ IEA ถึงปลายปี พ.ศ. 2553	3
1.3	การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามรายงาน IEA PVPS	4
1.4	รายงานการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามลักษณะการติดตั้งใช้งานในประเทศไทย	5
1.5	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังการเสื่อมสภาพจากรายงานของ ESTI	7
1.6	ตัวอย่างการใช้วัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อหุ้มฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์	8
1.7	ตัวอย่างลักษณะการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในต่างประเทศ	8
1.8	จำนวนความถี่ที่พบลักษณะการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.1	ส่วนประกอบโดยทั่วไปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	12
2.2	การเรียงซ้อนกันของวัสดุต่างๆ สำหรับการฉนวนแผงให้เป็นแผ่นเดียวกัน	14
2.3	การส่งผ่านแสงและการสะท้อนของกระจกสำหรับการฉนวนแผง	15
2.4	ภาพตัดขวางของแผงที่มีอีวีเอห่อหุ้มเซลล์ไว้	16
2.5	โครงสร้างทางเคมีของอีวีเอ	16
2.6	ภาพตัดขวางการฉนวนด้วยซิลิโคนระหว่างขอบแผงกับขอบโครงแผง	19
2.7	แผนภาพของเครื่องบ่มซ้อนเป็นชั้นๆ	20
2.8	แผ่นภูมิสาขงานของกระบวนการประกอบแผง	22
2.9	วัฏจักรยาวของการทำแผ่นฉนวนด้วยการปรับสภาพทางความร้อน	23
2.10	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความผิดปกติทางความร้อนและสาเหตุที่เป็นไปได้	24
2.11	ตัวอย่างจุดร้อนที่เกิดขึ้นบนแผง	24
2.12	เซลล์แตกร้าวซึ่งสังเกตเห็นได้ภายในแผง	25
2.13	คุณลักษณะ I-V ของแผงที่เกิดเซลล์แตกร้าว (ดูรูปที่ 2.12) เทียบกับข้อมูลที่ระบุไว้	26
2.14	แผงสีขาวและเหลืองในภาคสนามเดียวกัน	26
2.15	คุณลักษณะทาง I-V ของแผงสีขาวและแผงสีเหลือง	27
2.16	แผงบริเวณกลางเซลล์เปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเหลือง-น้ำตาล	27
2.17	การเสื่อมสภาพจากการหลุดร่อนเนื่องจากการแทรกตัวเข้ามาของชื้น	29
2.18	เปรียบเทียบคุณลักษณะทาง I-V ของแผงในช่วงก่อนและหลังเกิดการหลุดร่อน	29

รูป (ต่อ)	หน้า
2.19 โครงสร้างของวัสดุหุ้มฉนวนเซลลูล์สแอสที่สัมผัสกับการเสื่อมสภาพของแผง	30
2.20 อัตราการส่งผ่านไอน้ำชั่วคราว WVTR ผ่านอีวีเอหนา 2.84 มม. ที่อุณหภูมิ 85°C	31
2.21 แบบจำลองของแผงซึ่งมีแผ่นปิดด้านหลังแบบ Breathable	31
2.22 แบบจำลองของแผงซึ่งมีการแทรกเข้าของความชื้นทางด้านข้าง	31
2.23 การแทรกเข้าทางความชื้นจากทางด้านขอบสู่กึ่งกลางแผงที่อุณหภูมิต่างๆ	32
2.24 แผนภาพขอบแผงซึ่งมีกาวฉนวนที่ขอบแผงซึ่งกาวนี้ต้องยอมให้น้ำซึมเข้าไปได้น้อยมาก	32
2.25 WVTR ชั่วโมงกับเวลาที่ใช้ในเจาะทะลุแนวหุ้มฉนวนขอบสำหรับวัสดุ BRP-C	32
2.26 กระแสรั่วไหลผ่านค่าความต้านทานของเนื้อฉนวนในส่วนต่างๆ	34
2.27 ค่าความต้านทานของวัสดุหุ้มแผงสองชนิด	35
2.28 การเปลี่ยนแปลงของสภาพยอมสัมพัทธ์ของอีวีเอที่ผ่านการบ่มแล้ว	36
2.29 การเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของอีวีเอที่ผ่านการบ่มแล้ว	37
2.30 แบบจำลองสมมูลสำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกับโครงแผง	38
2.31 แผนภาพวงจรสายส่งที่กระจายตามองค์ประกอบระยะทางของสายส่งความยาว dz สำหรับแบบจำลองสมมูลสำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกับโครงแผง	40
2.32 แบบจำลองสมมูลด้วยองค์ประกอบต่างๆ ทางไฟฟ้าสำหรับบริเวณเซลล์กับเซลล์	40
2.33 แผนภาพวงจรสายส่งที่กระจายตามองค์ประกอบระยะทางของสายส่งความยาว dz สำหรับแบบจำลองสมมูลสำหรับบริเวณเซลล์กับเซลล์	41
2.34 ตัวอย่างแบบจำลองโพรงในฉนวนของแข็งและการปล่อยประจุบางส่วนในฉนวน	42
2.35 ตัวอย่างแบบฟอร์มในการจัดบันทึกผลการตรวจสอบด้วยการสังเกตภายนอกด้วยตา	43
2.36 ตัวอย่างห้องมีดของยี่ห้อ Pasan สำหรับการวัดเส้นโค้งกระแส-แรงดันของแผง	44
2.37 วงจรเทียบเท่าของวัสดุหุ้มแผง	44
2.38 การวัดแรงดันเหนี่ยวนำชั่วคราวจากแผงอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าห่างจากที่ติดตั้งแผงประมาณ 7 กิโลเมตร	46
2.39 เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์แบบแกนร่วม	47
2.40 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และแรงดันเหนี่ยวนำในแผงยี่ห้อ Kyocera รุ่น KC 60	48
2.41 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าและการเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้ากับแผง	48
2.42 รูปคลื่นทั่วไปและคำจำกัดความของอิมพัลส์ฟ้าผ่า	49
2.43 วงจรพื้นฐานของชุดกำเนิดอิมพัลส์	50

รูป (ต่อ)	หน้า
2.44 อิเล็กโทรลิตความต้านทานจำเพาะของฉนวนแข็ง	52
2.45 เครื่องวัดเปอร์มิตติวิตีและคาปาซิแตนซ์ฉนวนแข็ง	52
2.46 วัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะแผ่นระนาบภายใต้สนามไฟฟ้าสลับ	54
2.47 แบบจำลองของไดอิเล็กตริกของเดบาย	56
2.48 กราฟของ $\epsilon$ และ $\epsilon'$ ตามโมเดลของเดบาย	58
2.49 สำหรับความถี่เดียวกัน $T_{\max}$ สำหรับ $\epsilon'_{r(\max)}$ มีค่าสูงกว่า $T'_{\max}$ สำหรับ $\tan \delta_{(\max)}$	59
3.1 แผนภาพระเบียบวิธีในการดำเนินการวิจัย	61
3.2 ขั้นตอนการสังเกตภายนอกด้วยตา	62
3.3 ห้องมืดสำหรับการวัดกราฟกระแส-แรงดันของแผง	64
3.4 ขั้นตอนการวัดกราฟกระแส-แรงดันและการหาความสัมพันธ์กับลักษณะการเสื่อมสภาพ	65
3.5 แผนภาพวงจรการต่อระหว่างแผงกับเครื่องทดสอบฉนวน	66
3.6 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของแผง	67
3.7 แผนภาพการต่อเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับทดสอบแผงด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้า	68
3.8 ขั้นตอนการทดสอบฉนวนของแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์	69
3.9 ขั้นตอนการเขียนแบบด้วยแบบจำลองของแผงภายใต้แรงดันทดสอบแบบอิมพัลส์	70
3.10 ตัวอย่างขนาด ระยะห่าง และความหนาของวัสดุฉนวนต่างๆ ของแผง	71
3.11 ระยะต่างๆ ของแผงสำหรับหาค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนระหว่างเซลล์กับขอบแผง	72
3.12 แผนภาพชุดอิเล็กโทรดพร้อมเครื่องวัดสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า	73
3.13 ขั้นตอนการวัดหาค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวัสดุหุ้มฉนวนแผง	74
3.14 ตัวอย่างการทาครีมตัวนำเงินบนผิวหน้าของอิเล็กโทรดและอีวีเอที่เสื่อมสภาพ	74
3.15 ตัวอย่างลักษณะผิวหน้าของอีวีเอที่เสื่อมสภาพและช่องว่างอากาศบนผิวอีวีเอ	74
3.16 การจัดเรียงอิเล็กโทรดเพื่อหาสภาพต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของชิ้นตัวอย่าง EVA	75
3.17 ขั้นตอนการวัดหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของชิ้นตัวอย่าง EVA	76
3.18 เครื่องวัดหาค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบความสูญเสียของอีวีเอ	77
3.19 ขั้นตอนการทดสอบแผ่นอีวีเอที่เกิดการเสื่อมสภาพเพื่อหาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน	77
3.20 แผนภาพแสดงการต่อเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับวัดค่าความจุและตัวประกอบความสูญเสียตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	79
3.21 ขั้นตอนทดสอบแผ่นอีวีเอเพื่อหาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ	80

รูป (ต่อ)	หน้า
4.1 โครงสร้างของชั้นไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวน	81
4.2 การฉนวนระหว่างแผงกับโครงอะลูมิเนียม	82
4.3 การแบ่งแผงตามลักษณะของการเสื่อมสภาพ     เรียงตามลักษณะการเสื่อมสภาพที่สังเกตเห็นได้จากทางด้านหน้า	84
4.4 การเสื่อมสภาพที่สังเกตเห็นได้จากทางด้านหลังแผง	85
4.5 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B1	86
4.6 สภาพแผงภายนอกของแผง B2	87
4.7 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B3	87
4.8 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B4	88
4.9 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B5	88
4.10 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B6	88
4.11 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B7	89
4.12 ลักษณะการเสื่อมสภาพของแผงในกลุ่มที่มีเซลล์ต่ออนุกรมกัน 36 เซลล์	90
4.13 กราฟกระแส-แรงดันและรูปของแผง B1-1, B1-3, B2-2	91
4.14 กราฟกระแส-แรงดันและรูปของกลุ่มแผงที่มีลักษณะไม่ปกติ	92
4.15 ตัวอย่างการล่อกร่อนที่ตรงกลางเซลล์มากกว่าขอบ	93
4.16 ตัวอย่างการล่อกร่อนตรงกลางเซลล์มากกว่าขอบ และมีการล่อกร่อนแบบอื่นร่วม	94
4.17 กราฟกระแส-แรงดันและรูปของกลุ่มแผงที่รูปร่างกราฟและความชันกราฟปกติ	94
4.18 ตัวอย่างการล่อกร่อนตรงกลางเซลล์ ขอบเซลล์และมุมเซลล์ร่วมด้วย	95
4.19 ค่าสถิติความต้านทานฉนวนหุ้มฉนวนเซลล์แสงอาทิตย์ของแผง 116 แผง	96
4.20 ค่าสถิติของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงโครงการ มจร. และ โครงการอีสานเขียว	97
4.21 ค่าสถิติของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร	99
4.22 ค่าสถิติของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงจากจังหวัดชัยภูมิ	101
4.23 รูปร่างลักษณะและมิติ (มม.) ของแผง Solartron กำลังไม่เกิน 60 W	103
4.24 ความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผงและภาพขยาย	104
4.25 โครงสร้างแบบจำลองระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง	105
4.26 กระแสรั่วไหลผ่านค่าความต้านทานของเนื้อฉนวนในส่วนต่างๆ	106
4.27 ลักษณะด้านหน้าแผงที่นำมาทดสอบอิมพัลส์	108
4.28 ลักษณะด้านหลังและขอบแผงที่นำมาทดสอบอิมพัลส์	108
4.29 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 8 kV	109

รูป (ต่อ)	หน้า
4.30 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 $\mu$ s หลังจ่ายเข้าแผงที่ระดับแรงดัน 4 kV	109
4.31 แบบจำลองของฉนวนขอบแผงในกรณีไม่มีโพรงฉนวน	110
4.32 แบบจำลองของฉนวนขอบแผงในกรณีมีโพรงฉนวน	110
4.33 ลำดับการกรอกข้อมูลให้กับโปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.26	111
4.34 การเขียนแบบแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม EMTP สำหรับ วงจรดังรูปที่ 4.32	111
4.35 ลำดับการกรอกข้อมูลให้กับโปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.32	112
4.36 การเขียนแบบแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม EMTP สำหรับ วงจรดังรูปที่ 4.35	112
4.37 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับขอบโครงแผงที่ แรงดัน 27 kV	113
4.38 แบบจำลองแผงสำหรับเขียนแบบการเกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนของแข็ง	113
4.39 ลำดับการกรอกข้อมูลให้กับโปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.30	114
4.40 การเขียนแบบแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม EMTP สำหรับ วงจรดังรูปที่ 4.38	115
4.41 โครงสร้างของแผงกลุ่ม B2-1	116
4.42 ชั้นตัวอย่างแผ่นอีวีเอ แผ่นพีอีที และแผ่นเทคลาร์ของแผง B2-1	116
4.43 โครงสร้างของแผง B3-4	117
4.44 ชั้นตัวอย่างแผ่นอีวีเอ แผ่นพีอีที และแผ่นเทคลาร์ ของแผง B3-4	117
4.45 อีวีเอหุ้มฉนวนด้านหน้าแผงกลุ่ม B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1	118
4.46 แผ่นปิดหลังพีวีเอฟที่ติดกับอีวีเอ	118
4.47 แผ่นปิดหลังพีอีที	119
4.48 แผ่นปิดหลังพีวีเอฟด้านนอกสุดของแผง	119
4.49 ค่าความจุไฟฟ้าของอีวีเอและกระจุจจากแผงเซลล์ที่เชื่อมสภาพที่เป็น ฟังก์ชันความถี่	120
4.50 ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นปิดหลังพีวีเอฟและพีอีทีของแผงที่เชื่อมสภาพที่ เป็นฟังก์ชันความถี่	120
4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผง กับค่าความต้านทาน ของแผ่นอีวีเอ	123
4.52 ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพของอีวีเอที่เชื่อมสภาพ	124

รูป (ต่อ)	หน้า
4.53 ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของชั้นตัวอย่างอีวีเอ B3-4 หรือ B5-2 ที่ -60°C ถึง 120°C	125
4.54 ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของชั้นตัวอย่างอีวีเอ B4-12 ที่ -60°C ถึง 120°C	126
4.55 ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของชั้นตัวอย่างอีวีเอ B6-3 หรือ B7-1 ที่ -60°C ถึง 120°C	126
4.56 ภาพตัวอย่างของสายโมเลกุลยาวที่เกิดการเคลื่อนที่ของส่วนหลักหรือสายโซ่ข้างๆ	127
4.57 การหลุดลอกของอีวีเอตรงกลางเซลล์แสงอาทิตย์รอบบัสบาร์มากกว่าขอบของเซลล์	127
4.58 การหลุดลอกของอีวีเอรอบๆ ขอบเซลล์แสงอาทิตย์	128
4.59 การหลุดลอกของอีวีเอตรงกลางเซลล์แสงอาทิตย์	128
ก.1 ขั้นตอนปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจนของพอลิเมอร์	141
ก.2 กลไกการเสื่อมสภาพที่สำคัญของอีวีเอจากรังสียูวีและอุณหภูมิ	143
ง.1 กราฟกระแส-แรงดันของแผงจากโครงการ มจร.	164
ง.2 กราฟกระแส-แรงดันของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย	164
ง.3 กราฟกระแส-แรงดันของแผงจากตำบลบ้านโสก อำเภอคอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ	164
ฉ.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 4 kV ของแผง B1-3	169
ฉ.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 4 kV ของแผง B4-8	169
ฉ.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 4 kV ของแผง B5-1	169
ช.1 ค่าความจุไฟฟ้าของอีวีเอที่เสื่อมสภาพในฟังก์ชันความถี่	171
ช.2 ตัวประกอบความสูญเสียของอีวีเอที่เสื่อมสภาพในฟังก์ชันความถี่	171
ช.1 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอีวีเอสำหรับ B2-1 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	173
ช.2 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอีวีเอสำหรับ B3-4 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	173
ช.3 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอีวีเอสำหรับ B4-12 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	173
ช.4 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอีวีเอสำหรับ B5-2 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	174
ช.5 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอีวีเอสำหรับ B6-3 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	174
ช.6 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอีวีเอสำหรับ B7-1 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	174
ฉ.1 ค่าตัวประกอบความสูญเสียขึ้นตัวอย่างอีวีเอ B2-1 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	176
ฉ.2 ค่าตัวประกอบความสูญเสียขึ้นตัวอย่างอีวีเอ B3-4 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	176
ฉ.3 ค่าตัวประกอบความสูญเสียขึ้นตัวอย่างอีวีเอ B4-12 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	176
ฉ.4 ค่าตัวประกอบความสูญเสียขึ้นตัวอย่างอีวีเอ B5-2 ภายใต้ที่ -60°C ถึง 120°C	177
ฉ.5 ค่าตัวประกอบความสูญเสียขึ้นตัวอย่างอีวีเอ B6-3 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C	177
ฉ.6 ค่าตัวประกอบความสูญเสียขึ้นตัวอย่างอีวีเอ B7-1 ที่ -60°C ถึง 120°C	177

## รายการสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่อิเล็กทรอนิกส์
$\text{\AA}$	=	อังสตรอม
$A_c$	=	พื้นที่ต่อเซลล์แสงอาทิตย์
$A_m$	=	พื้นที่แผง
a-Si	=	อะมอร์ฟัสซิลิกอน
C	=	ค่าความประจุไฟฟ้า
$C_0$	=	ค่าความประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ
Ce	=	ซีเรียม
$\text{CH}_2$	=	เมธิลีนคลอไรด์
$\text{CF}_2$	=	ทีทราฟลูโอโรอีธีลีน
D	=	ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า
E	=	ความเครียดทางสนามไฟฟ้า
F	=	สนามไฟฟ้าที่ถูกบ่อน
$F_m$	=	ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่ถูกบ่อน
g	=	ช่องว่าง
H	=	พลังงานการกระตุ้น
$\text{H}_2\text{SiF}_6$	=	กรดฟลูโอโรซิลิกอิก
$I_{pp}$	=	กระแสจุดยอด
$I_{sc}$	=	กระแสลัดวงจร
$J_T$	=	กระแสการนำทั้งหมด
k	=	ค่าคงที่ของโบลตซ์มานน์ = $1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
$L_D$	=	เปอร์เซ็นต์ของชนิดจำกัดการเสื่อมสภาพ
$N_c$	=	จำนวนของเซลล์ในแนวนอนกับแนวตั้ง
$P_m$	=	กำลังไฟฟ้าสูงสุด
q	=	ประจุไฟฟ้า
r	=	รัศมีประสิทธิภาพ
$R_D$	=	อัตราการเสื่อมสภาพต่อปี
$\text{SiO}_2$	=	ซิลิกา, ซิลิกอน ไดออกไซด์
$\text{SnO}_2:F$	=	ฟิล์มบางของฟลูออไรด์-ถูกเจือในไดออกไซด์ดีบุก

$t$	=	ความหนาของฉนวน
$T$	=	อุณหภูมิ
$\tan \delta$	=	แทนเจนต์ความสูญเสีย
$T_g$	=	อุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว
$\text{tg } \delta$	=	ตัวประกอบความสูญเสีย
$t_L$	=	ชั่วอายุการใช้งาน
$t_p$	=	อุณหภูมิการแยกชั้น
$V$	=	แรงดันที่ถูกป้อน
$V_{oc}$	=	แรงดันขณะเปิดวงจร
$V_{DC}$	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$V_{pp}$	=	แรงดันจุดยอด
$V_S$	=	อัตราแรงดันระบบสูงสุดของแผง
$V_{sys}$	=	แรงดันสูงสุดของระบบการทำงาน
$w$	=	ความกว้างของอิเล็กโตรด
$W$	=	ค่าเฉลี่ยของการดูดซับพลังงานต่อปริมาตรของวัสดุ
x-Si	=	ซิลิกอนผลึกเดี่ยว
$\delta$	=	มุมความสูญเสีย
$\varepsilon$	=	ส่วนจริงของค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก
$\varepsilon'$	=	ส่วนจินตภาพของค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก
$\varepsilon^*$	=	ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน
$\varepsilon_r$	=	ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกหรือสภาพยอมสัมพัทธ์
$\varepsilon_r'$	=	ส่วนจินตภาพของสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก
$\varepsilon_0$	=	สภาพยอมหรือไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ
$\varepsilon_{rs}$	=	ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกสถิต
$\varepsilon_{r\infty}$	=	ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง ( $\omega \rightarrow \infty$ )
$\varepsilon_{rs}^T$	=	ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกสถิตที่อุณหภูมิ T
$\varepsilon_{r\infty}^T$	=	ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกสถิตที่ความถี่สูง ณ อุณหภูมิ T
$\xi$	=	ความเข้มสนามไฟฟ้า
$\rho$	=	สภาพความต้านทานไฟตรง
$\sigma$	=	สภาพความนำไฟตรง
$\sigma_d$	=	ความหนาแน่นของประจุ
$\tau$	=	เวลาผ่อนคลาย

$\tau_h$	=	ตัวประกอบก่อนเอ็กโปเนนเชียล
$\tau_0$	=	เวลาการผ่อนคลายในระดับมหภาค
$\Omega$	=	โอห์ม
$\omega$	=	ความถี่เชิงมุม

## ประมวลศัพท์และคำย่อ

B1	=	Bad Module in Group 1
B2	=	Bad Module in Group 2
B3	=	Bad Module in Group 3
B4	=	Bad Module in Group 4
B5	=	Bad Module in Group 5
B6	=	Bad Module in Group 6
B7	=	Bad Module in Group 7
DH	=	Damp Heat
ESTI	=	European Solar Test Installation
EPDM	=	Ethylene Propylene Dien Monomer
EVA	=	Ethylene-vinyl-acetate
FF	=	Fill Factor
FSA	=	Flat Plate Solar Array Project
HF	=	Humidity Freeze
HS	=	Hot Spot
HTV	=	High Temperature Vulcanized
IEC	=	International Electrotechnical Standard
IEEE	=	Institute of Electronics and Electrical Engineers
IQT	=	Interim Qualification Tests
JRC	=	Joint Research Center
MTBFs	=	Mean Time Between Failures
MUT	=	Material Under Test
NREL	=	National Renewable Energy Laboratory
OE	=	Outdoor Exposure
PET	=	Polyethylene Terephthalate Film
PVB	=	Poly-vinyl-butylal Encapsulant
PVF	=	Polyvinyl Fluoride
PVUSA	=	PV for Utility-scale Application
SERI	=	Solar Energy Research Institute
TTF	=	Test-to-failure

TC	=	Thermal Cycling
UL	=	Underwriters Laboratories
W	=	Watt
WVTR	=	Transient Water Vapor Transmission Rate

# บทที่ 1 บทนำ

บทนำประกอบด้วยหัวข้อหลักได้แก่ ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และกรอบแนวความคิด

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในทางเทคนิค ปรากฏการณ์การเกิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เรียกว่าโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaics, PV) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ ถ้าแสงอาทิตย์มีโฟตอนที่มีความถี่เหมาะสม กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ผลิตได้ วัดในหน่วยวัตต์ (W) ในแง่ของการติดตั้งแผงเซลล์ มักระบุค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าและแสดงเป็นหน่วย วัตต์-สูงสุด (Watt-peak, Wp) ซึ่งเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition-STC) กล่าวคือ เมื่อมีแสงอาทิตย์ความเข้ม  $1000 \text{ W/m}^2$  ตกกระทบเซลล์และเซลล์อยู่ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$

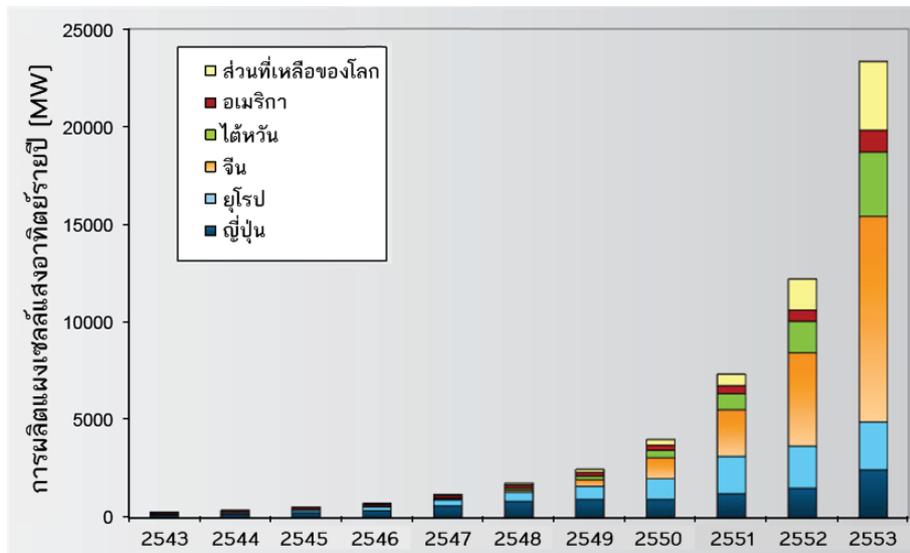
เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้นานนับสิบปี ไม่ใช่เชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ ที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก หรือไม่อาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งประชาชนมีความกังวลเรื่องความปลอดภัย ความสำคัญของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีสูงขึ้นต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตาม การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์บนโลกมีอุปสรรคสำคัญคือ การเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาจสังเกตได้ด้วยตาเปล่า และสามารถวัดจากคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งนอกจากทำให้ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงและอาจไม่คุ้มทุนแล้ว หากวัสดุคุณภาพต่ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกเกิดการเสื่อมสภาพ อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในชีวิต และเป็นอันตรายต่อระบบการผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นการตรวจสอบการเสื่อมสภาพและการวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็กตริกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจศึกษาทั้งในและต่างประเทศ

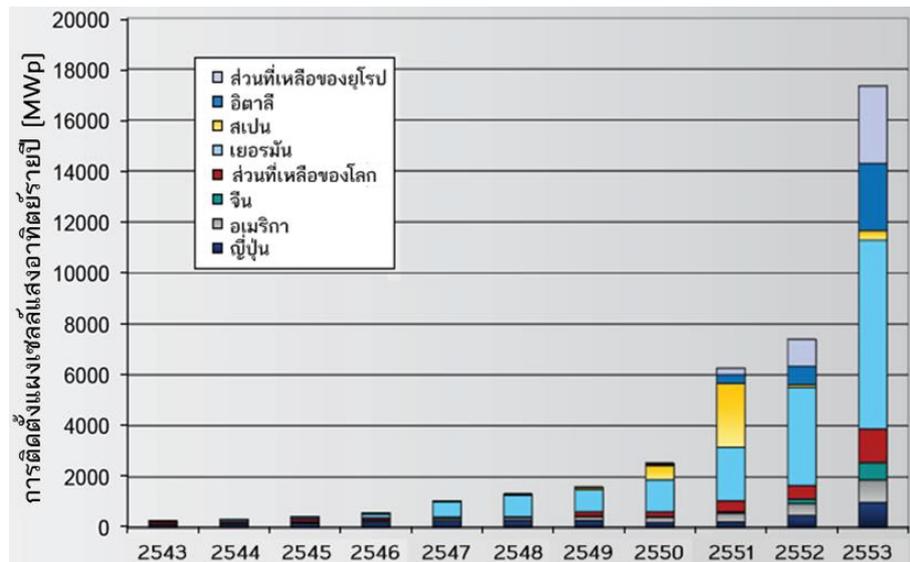
### 1.1.1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลก

เกือบ 40 ปีหลังจากวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันครั้งแรก และ 25 ปีหลังจากอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบิล ทั่วโลกเร่งพัฒนาพลังงานทางเลือกที่ปลอดภัย ยั่งยืน ราคาถูก และลดปัญหาการ

ปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นทางเลือกสำคัญที่ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะหลังทศวรรษ 2550 อุตสาหกรรมการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกในปี พ.ศ. 2553 มีสูงถึง 23,500 MW ซึ่งมากกว่าปี พ.ศ. 2552 ถึงสองเท่า ในทางกลับกัน เมื่อมีการแข่งขันเพิ่มมากขึ้น กอปรกับการขยายตัวทางการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น นำไปสู่การลดราคาซิลิกอนซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์จาก 500 ดอลลาร์/กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2551 เหลือเพียง 50-55 ดอลลาร์/กิโลกรัม [1] ในปลายปี พ.ศ. 2552 ทั้งนี้การผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นมาก เกิดจากความต้องการในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1



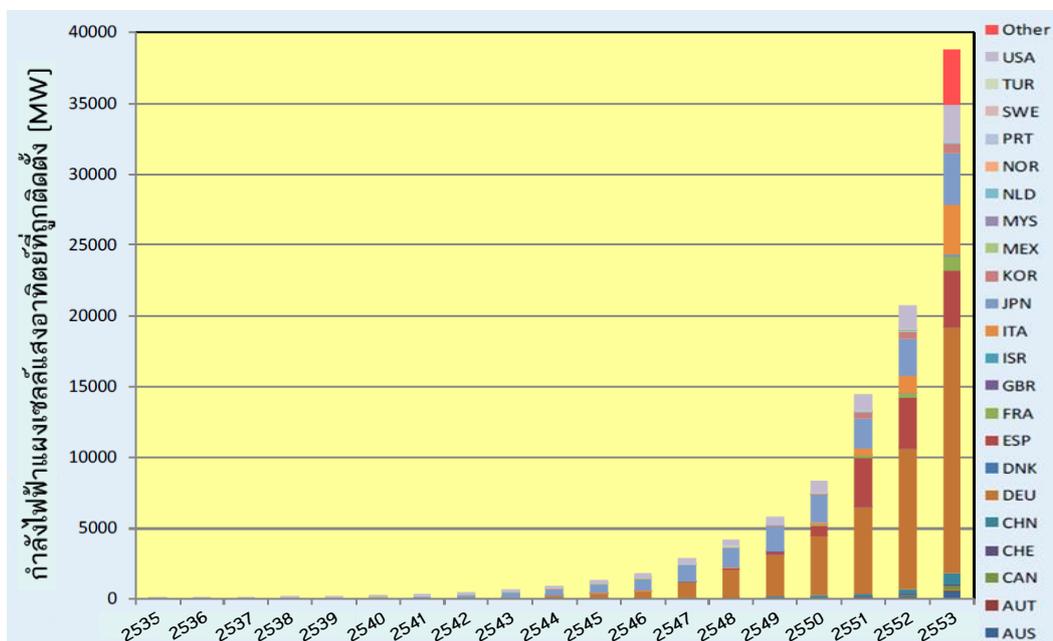
(ก) การผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์รายปี [1]



(ข) การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์รายปี [1]

รูปที่ 1.1 ตลาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศที่พัฒนาแล้ว

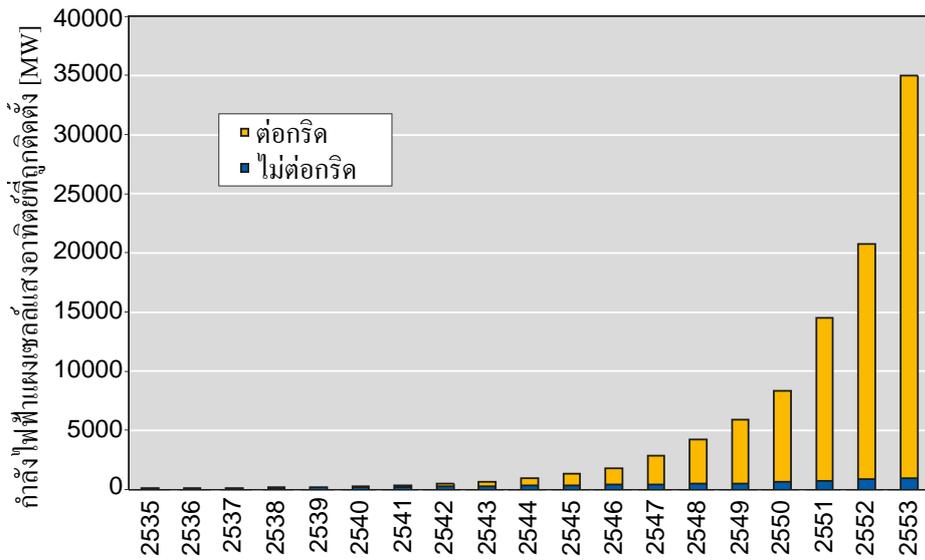
จากรูปที่ 1.1 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศที่พัฒนาแล้ว ส่วนใหญ่มีจุดประสงค์เพื่อการเชื่อมโยงต่อเข้ากับกริดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Grid-connected) ช่วงครึ่งแรกของคริสต์ทศวรรษที่ 21 มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเกือบ 10 เท่า คือจาก 170 MWp ไปเป็น 1700 MWp แต่ก็เป็นอัตราที่เพิ่มขึ้นช้าหากเทียบกับปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2553 ที่มีอัตราการเติบโตอย่างมาก เนื่องจากกลุ่มประเทศยุโรปมีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากยิ่งขึ้น และมีการสนับสนุนการใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดหมุนเวียนเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงอีก 20% ในปี พ.ศ. 2563 นอกจากนี้ การเกิดอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ฟูกูจิม่าในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 ทำให้ประเทศยุโรป 3 ประเทศคือ อิตาลี เยอรมัน และสวิตเซอร์แลนด์ ตัดสินใจไม่สร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ภายใน 10 ถึง 20 ปี นับจากนี้ไป



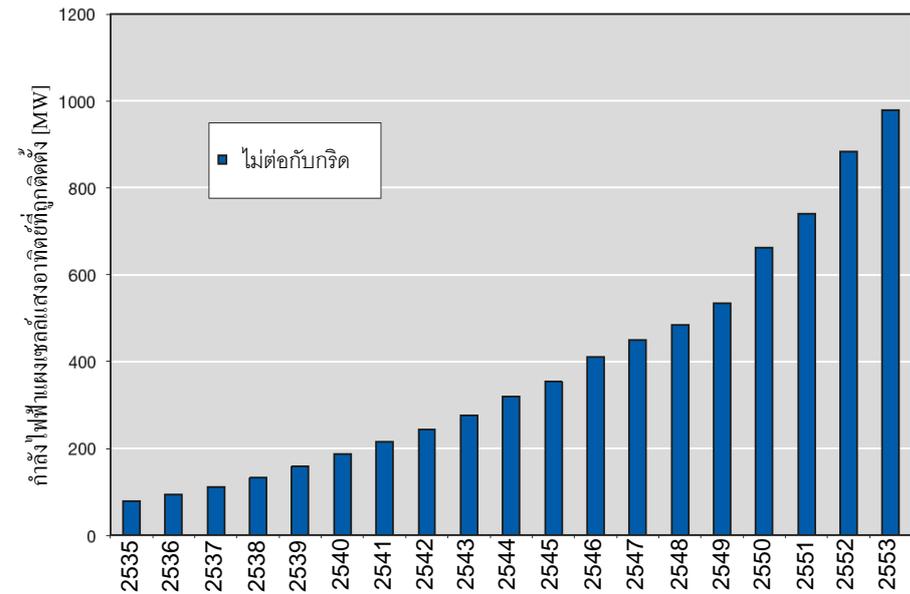
รูปที่ 1.2 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มประเทศ IEA ถึงปลายปี พ.ศ. 2553 [2]

ในแง่แนวโน้มการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ รายงานของ International Energy Agency (IEA) เผยแพร่เมื่อสิงหาคม พ.ศ. 2554 [3] ระบุแผนโครงการระบบกำลังไฟฟ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มประเทศ IEA (IEA Photovoltaic Power System Programme, IEA PVPS) แสดงดังรูปที่ 1.2 ได้มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งสิ้น 12.4 GW ในช่วงปี พ.ศ. 2553 ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจากปี พ.ศ. 2551 ที่มีการติดตั้งเพียง 6.2 GW ทำให้ปัจจุบันกลุ่มประเทศ IEA มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไปแล้วรวมทั้งสิ้น 35 GW โดยเยอรมันและอิตาลีมีการติดตั้งรวมกันมากที่สุดถึง 69% และหากรวมอเมริกา ญี่ปุ่น และฝรั่งเศส เข้าไปอีกเป็นห้าประเทศ มีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงปี พ.ศ. 2553 คิดเป็นสัดส่วนมากกว่า 87% จากกลุ่มประเทศ IEA

การติดตั้งส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมกับกริดของระบบไฟฟ้ากำลัง มีอัตราการติดตั้งสะสมเพิ่มมากที่สุด ดังรูปที่ 1.3 (ก) เนื่องจากภาครัฐมีนโยบายสนับสนุนการลงทุน การดำเนินการติดตั้ง การรับซื้อไฟฟ้า และการลดต้นทุนราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างชัดเจน ส่วนการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกเดี่ยว (Stand-alone) หรือไม่ต่อเข้ากับกริดของระบบไฟฟ้ากำลัง มีการเติบโตเพิ่มขึ้น 3% ในกลุ่มประเทศเหล่านี้ ดังแสดงในรูป 1.3 (ข) และคาดว่าแนวโน้มการติดตั้งสะสมในระบบนี้ ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 1,000 MW ในระยะเวลาอันใกล้



(ก) การติดตั้งแผงแบบไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อกับกริด [3]

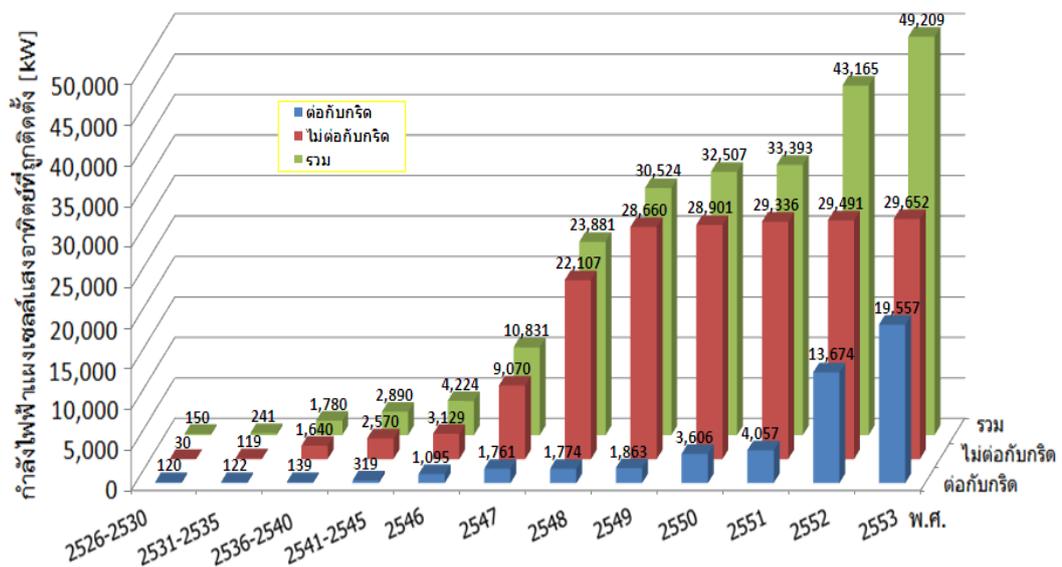


(ข) การติดตั้งแผงแบบไม่เชื่อมต่อกับกริด [3]

รูปที่ 1.3 การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามรายงาน IEA PVPS

### 1.1.2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 ถึง พ.ศ. 2553 [4] แสดงดังรูปที่ 1.4 มีกำลังการติดตั้งสะสมรวมราว 50 MW ทั้งนี้การติดตั้งแบบไม่เชื่อมต่อเข้ากับกริดของระบบไฟฟ้าสูงถึง 30 MW เนื่องจากในอดีตส่วนใหญ่การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้ากับระบบเป็นเพียงโครงการสาธิตเพื่อการศึกษาจากจ่ายไฟเข้าระบบเท่านั้น ต่อมาได้มีการติดตั้งใช้งานในพื้นที่ซึ่งไม่มีไฟฟ้าเข้าถึงเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมุ่งเน้นการประยุกต์ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกิจกรรมเพื่อการพัฒนาชนบท ยกตัวอย่างเช่น การประจุแบตเตอรี่ การสื่อสาร และการสูบน้ำเพื่อการเกษตร เป็นต้น



รูปที่ 1.4 รายงานการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามลักษณะการติดตั้งใช้งานในประเทศไทย [4]

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 มีการกำหนดมาตรฐานการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายไฟเข้าระบบโดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง และจากการสนับสนุนเชิงนโยบายของภาครัฐ เพื่อส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ทำให้หน่วยงานการไฟฟ้าต่างๆ รวมถึงเอกชน มีโครงการติดตั้งโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (ระบบมีกำลังไฟฟ้ามากกว่า 1 MWp) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลังมีแนวโน้มเติบโตอย่างรวดเร็ว

โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ใช้งานแล้วมีจำนวน 82 แห่ง กำลังผลิตรวม 155 MW (ตัวเลขเดือนกรกฎาคม 2555) ระบบที่อยู่ระหว่างการก่อสร้างจำนวน 396 แห่ง รวมกำลังผลิต 1,913 MW นอกจากนี้โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 73 MW ที่ใหญ่ที่สุดในอาเซียนก็อยู่ในประเทศไทย และได้รับการสนับสนุนด้านการลงทุนจากธนาคารเพื่อการพัฒนาเอเชีย แม้เป้าหมายของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2563 จะมีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์สะสมรวมราว 500 MW แต่จากข้อมูลของกระทรวงพลังงาน มีผู้ยื่นความจำนงขอติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้า

เข้าระบบมากเกือบ 3,000 MW แล้ว ถึงจะมีการปรับลดลงการรับซื้อไฟฟ้าในอัตราพิเศษจากระบบ Adders (ซึ่งประกอบด้วยค่าไฟฟ้าฐาน ค่า Ft และค่าเพิ่ม Adders) ไปเป็นระบบ Feed-in Tariff หรือ FiT (ซึ่งไม่มีค่า Ft) ในอนาคตต้นทุนราคาเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีแนวโน้มลดราคาลง มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตใหม่สามารถลดปัญหาการเสื่อมสภาพจากความร้อน รังสียูวี และความชื้น รวมทั้งมีมาตรฐานในการผลิตและการทดสอบเพื่อยืนยันคุณภาพทั้งทางด้านสมรรถนะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และด้านความเป็นฉนวนของวัสดุไดอิเล็กตริกที่หุ้มฉนวน (Encapsulate) แผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 1.1.3 ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของแผงที่มีผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้า

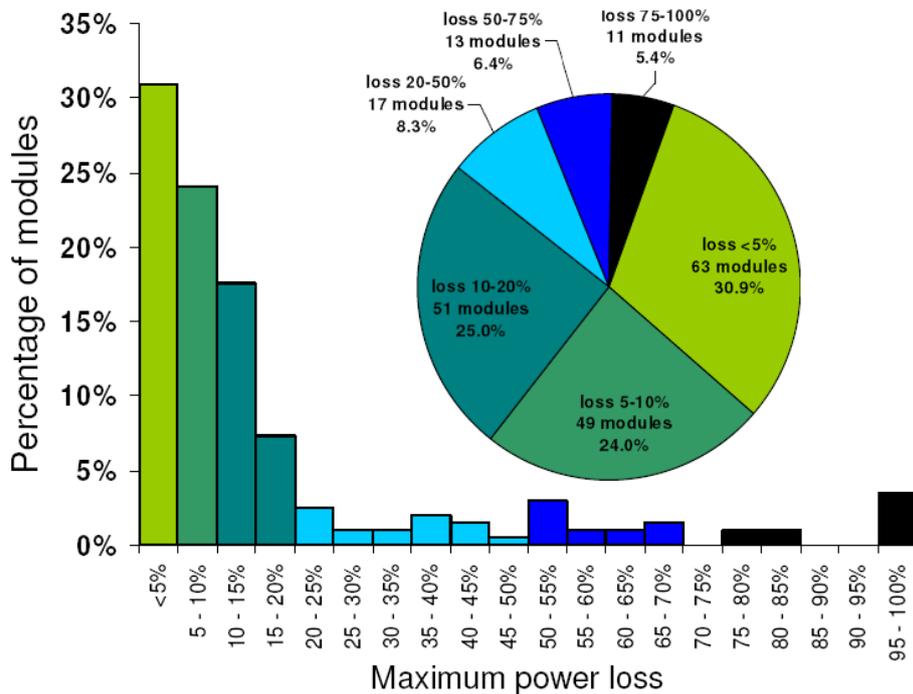
ข้อมูลการศึกษาในต่างประเทศเรื่องความเสียหายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยบริษัท BP Solar International [5] แสดงในตารางที่ 1.1 ให้ค่าความเสียหายในงานภาคสนามเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนแผงทั้งหมดที่สังเกตพบ และแผงถูกส่งกลับมายังบริษัท การศึกษาระบุว่าความเสียหายส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อน และความเสียหายที่เซลล์หรือจุดเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ มีเปอร์เซ็นต์สูงสุด

ตารางที่ 1.1 ชนิดของความเสียหายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่พบในภาคสนาม [5]

ชนิดของความเสียหาย	% ของความเสียหายทั้งหมด
การกัดกร่อน	45.3
ความเสียหายที่เซลล์หรือจุดเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์	40.7
ปัญหาจากสายต่อเอาต์พุต	3.9
ปัญหาที่กล่องต่อสาย	3.6
การหลุดร่อน	3.4
สายไฟ ไคโอค หรือ แถบต่อสายร้อนเกิน	1.5
ความเสียหายทางกล	1.4
ไดโอดเบี่ยงบกพร่อง	0.2

นอกจากความเสียหายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อาจเกิดจากคุณภาพของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการหุ้มฉนวนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ดีพอ เมื่อนำมาใช้งานกลางแจ้งในระยะเวลานาน วัสดุหุ้มฉนวน (Sealant หรือ Encapsulant) จึงเสื่อมสภาพจากความร้อน รังสียูวี และความชื้นซึมผ่าน เป็นต้น

ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีรายงานวิจัยจากสถานีการติดตั้งทดสอบทางแสงอาทิตย์ภาคพื้นยุโรป (European Solar Test Installation, ESTI) [6] ซึ่งติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนเข้ากับระบบประจุแบตเตอรี่ จำนวน 204 แผง จากผู้ผลิต 20 บริษัท ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 ESTI อยู่ที่เมือง Ispra ทางตอนเหนือของประเทศอิตาลี ซึ่งอยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 220 เมตร อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $-10^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+35^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 90% เมื่อนำแผงเหล่านี้มาทดสอบหา กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังการเสื่อมสภาพจากรายงานของ ESTI [6]

จากรูปที่ 1.5 จะเห็นว่า มีเพียง 55% ของแผงทั้งหมด ที่ยังมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่า 90% ของกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น หลังจากใช้งานภาคสนามมากกว่า 20 ปี คิดเป็นอัตราการเสื่อมสภาพเฉลี่ย 0.7% ต่อปี สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพร่วมด้วย

### 1.1.4 การเสื่อมสภาพของวัสดุหุ้มฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในต่างประเทศ

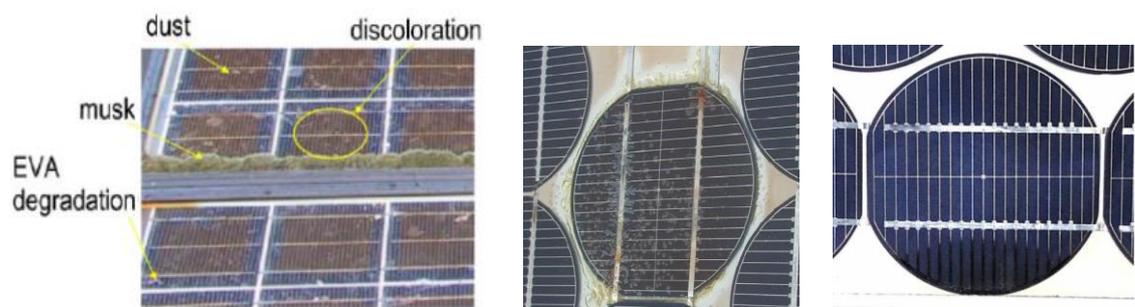
วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Materials) ใช้หุ้มฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 1.6 ทำหน้าที่หลายประการกล่าวคือ ในทางกลต้องรองรับเซลล์เมื่อมีการกดหรือการกระแทก ป้องกันการกัดกร่อน [7] ส่งผ่านทางแสงได้ดี ยึดติดกันอย่างดีกับวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดต่างๆ กัน [8] มีความยืดหยุ่นทางกลที่เพียงพอต่อความดึงเครียด ซึ่งเกิดจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่างกันระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ กระจก และแผ่นปิดด้านหลังของแผง ทั้งนี้วัสดุไดอิเล็กตริกต้องเป็นฉนวน

ของวงจรไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยทางไฟฟ้าอีกด้วย [9] ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุจนวนที่มีสมบัติไดอิเล็กตริกที่ดีที่สุดจึงสำคัญ [10] อย่างไรก็ตาม การแข่งขันกันของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ ราคา และอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งสามตัวประกอบนี้ไม่เป็นอิสระต่อกัน โดยเฉพาะราคา เป็นที่เข้าใจตรงกันดีว่า ราคาอาจจะไม่ได้บ่งบอกอายุการใช้งานของไดอิเล็กตริกสำหรับการหุ้มฉนวน [11]



รูปที่ 1.6 ตัวอย่างการใช้วัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อหุ้มฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [12]

นอกจากการศึกษาความเสียหายที่กล่าวมาข้างต้น ในต่างประเทศยังมีการศึกษารวบรวมข้อมูลเรื่องการเสื่อมสภาพจากการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลางแจ้งเป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ทำให้ไดอิเล็กตริกของแผงเกิดการเสื่อมสภาพอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 1.7 การเสื่อมสภาพเหล่านี้สามารถเห็นด้วยตาเปล่าได้ ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนสี (Discoloring) หรือบางที่เรียกว่าการออกสีเหลือง (Yellowing) หรือการออกสีน้ำตาล (Browning) [13] การหลุดร่อนหรือแยกชั้นของวัสดุหุ้มฉนวน (Delamination) [14] การหลุดแยกจากกัน (Detachment) ของแผ่นไดอิเล็กตริกติดปิดด้านหลังแผง (Backsheet) [15] การแตกกรอบของกาวฉนวนขอบระหว่างโครงกับขอบแผง (Brittle Fracture) การแทรกซึมเข้าของความชื้น (Moisture Penetration or Water Ingression) [16] และการกัดกร่อนบัสบาร์ (Busbar Corrosion) ของเซลล์แสงอาทิตย์ [17] เป็นต้น



(ก) การเปลี่ยนสี [13] (ข) การหลุดร่อนของวัสดุหุ้มฉนวน [14] (ค) ความชื้นซึมเข้าและการกัดกร่อน

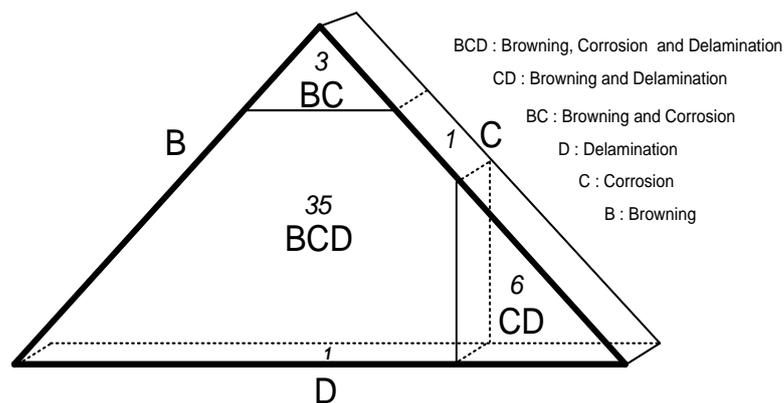
รูปที่ 1.7 ตัวอย่างลักษณะการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในต่างประเทศ

### 1.1.5 การเสื่อมสภาพของวัสดุหุ้มฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

วิทยานิพนธ์ของ เยาวณี แสงพงสานนท์ [19] ให้ข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยวหลายโมเดลจำนวน 46 แผง แผงเหล่านี้ผ่านการใช้งานภาคสนามในทศวรรษ 2530-2550 พบรูปแบบการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงที่สังเกตได้ด้วยตาใน 3 ลักษณะที่สำคัญคือ

- (ก) การกัดกร่อนตามแถบตัวนำไฟฟ้าด้านหน้าแผงเซลล์
- (ข) การลอกร่อนของวัสดุหุ้มแผงเซลล์ และ
- (ค) การเปลี่ยนสีของไดอิเล็กตริกหุ้มเซลล์ด้านหน้าแผง

ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ความถี่ของการเสื่อมสภาพชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 1.8 การเสื่อมสภาพลักษณะเดียวในแผงมีน้อยมาก เพราะการเสื่อมสภาพลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งย่อมส่งผลต่อการเสื่อมสภาพอื่นๆ ตามมา



รูปที่ 1.8 จำนวนความถี่ที่พบลักษณะการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แม้ไดอิเล็กตริกเสื่อมสภาพ แต่หากผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับประกันอายุการใช้งานของแผงได้ 10-30 ปี ความเชื่อมั่นต่อการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็อาจไม่ลดลง เมื่อเทียบกับเงินลงทุนของบริษัท ดังนั้นการกำหนดให้มีการทดสอบแผงก่อนใช้งานก็เป็นกลไกหนึ่งที่สร้างความเชื่อมั่น ในปัจจุบันมีการทดสอบอายุการใช้งานด้วยการเร่งให้เสื่อมอายุในห้องปฏิบัติการ แต่มีข้อมูลจำกัดของการเสื่อมสภาพของแผงจากการใช้งานกลางแจ้งจริงเป็นระยะเวลานาน [14] และการพิจารณาตามเกณฑ์การทดสอบแผงตามมาตรฐานมีเพียงแค่ผ่านการทดสอบ แผงที่ถูกทดสอบอาจจะบอบช้ำในสภาพเกือบฉีกทำลาย จนนำกลับไปใช้งานไม่ได้ หรือไม่ผ่านการทดสอบเท่านั้น

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายนอก สมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงที่เสื่อมสภาพ สมบัติทางจนวนและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของแผงที่เสื่อมสภาพ รวมทั้งศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุที่นำมาหุ้มฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อจำแนกและรวบรวมรูปแบบการเสื่อมสภาพภายนอกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้งานภาคสนามในประเทศ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาทั้งด้านหน้าและหลังแผง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพ โดยใช้สนามไฟฟ้ากระแสตรงศึกษาสมบัติทางจนวน และใช้สนามไฟฟ้าอิมพัลส์ศึกษาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าผ่าของแผง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุ ที่ใช้ทำและประกอบเป็นแผงเซลล์ โดยการประยุกต์สนามไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับในการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลาย

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 รวบรวมรูปแบบการเสื่อมสภาพภายนอกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้การถ่ายภาพและจำแนกรูปแบบการเสื่อมสภาพเชิงสถิติ
- 1.3.2 ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน โดยการวัดหาสมรรถนะทางไฟฟ้าและวัดหาค่ากราฟกระแส-แรงดัน (I-V Characteristics) ของแผงเซลล์ที่เกิดการเสื่อมสภาพ
- 1.3.3 วัดค่าความต้านทานจนวนของแผงที่เสื่อมสภาพ โดยการใช้สนามไฟฟ้ากระแสตรง
- 1.3.4 วัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ตกคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการเสื่อมสภาพแบบต่างๆ กัน
- 1.3.5 ออกแบบและสร้างชุดทดลองต้นแบบการใช้สนามไฟฟ้า สำหรับการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.3.6 วัดแผ่นวัสดุไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดที่ถูกนำมาใช้ในการฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงการวัดแผ่นขึ้นงานตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยไดอิเล็กตริกหลายชนิด
- 1.3.7 วัดสมบัติไดอิเล็กตริกของแผงเซลล์ที่มีสภาพดี เปรียบเทียบกับไดอิเล็กตริกเซลล์ที่มีการเสื่อมสภาพภายนอก
- 1.3.8 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับไดอิเล็กตริกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสภาพดี และที่มีการเสื่อมสภาพ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
- 1.4.2 ความรู้เกี่ยวกับสมรรถนะทางไฟฟ้าและลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผง ที่แตกต่างกัน

- 1.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าความต้านทาน  
จนวนของแผงที่เสื่อมสภาพ
- 1.4.4 การตอบสนองต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เกิดการเสื่อมสภาพแบบ  
ต่างๆ
- 1.4.5 ข้อมูลและความรู้จากการวัดแผ่นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการฉนวนแผง รวมถึงเทคนิคการวัด  
ตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยไดอิเล็กตริกหลายชนิด
- 1.4.6 ข้อเปรียบเทียบระหว่างสมบัติไดอิเล็กตริกของแผงที่มีสภาพดี กับแผงที่มีการเสื่อมสภาพ  
ภายนอกเช่น การเปลี่ยนสีของวัสดุไดอิเล็กตริก การหลุดลอกหรือการร่อนของวัสดุหุ้มฉนวน และการ  
เสื่อมสภาพของกาวฉนวนขอบแผง
- 1.4.7 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับไดอิเล็กตริกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสภาพดี และที่  
มีการเสื่อมสภาพ

## 1.5 กรอบแนวความคิดการวิจัย

การวิจัยเบื้องต้นที่เกี่ยวกับแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานในประเทศไทย พบความสัมพันธ์  
ระหว่างการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกับพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์ (คือ  
ความต้านทานอนุกรม ความต้านทานขนาน ประสิทธิภาพ ฟิลแฟคเตอร์) ส่วนไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวน  
แผง พบการเสื่อมสภาพหลายรูปแบบ มีการวิเคราะห์หาสาเหตุไม่ว่าจะเป็นทางด้าน โครงสร้างเคมี  
และคุณสมบัติทางไฟฟ้า แต่ยังไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับคุณสมบัติ  
อื่นๆ ของแผงที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานภาคสนามจริง และยังไม่มีการวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็ก  
ตริกเพื่อตรวจสอบคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จึงมีประเด็นที่จะ

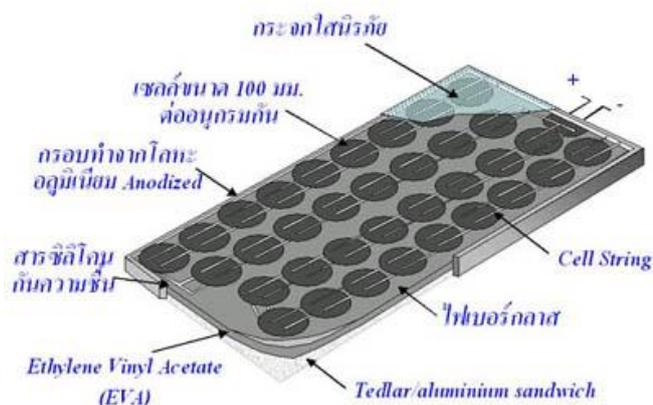
- (ก) รวบรวมรูปแบบการเสื่อมสภาพภายนอกของแผง ที่ใช้งานภาคสนามในประเทศไทย  
มากกว่าสิบปี ซึ่งสามารถสังเกตการเสื่อมสภาพเห็น ทั้งด้านหน้าและหลัง
- (ข) วัดพารามิเตอร์ของสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ ที่อยู่ภายในแผงเซลล์ด้วยการทดสอบภายใต้  
แสงอาทิตย์เทียม เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์กับรูปแบบการเสื่อม  
สภาพทางกายภาพภายนอกของฉนวนหุ้มฉนวน
- (ค) วัดพารามิเตอร์และสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก ด้วยการทดสอบทั้งแรงดันไฟฟ้าสูง  
และแรงดันต่ำ
- (ง) วิเคราะห์ลักษณะกายภาพภายนอกของไดอิเล็กตริก และสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาระสำคัญในบทนี้ประกอบด้วย การหุ้มฉนวนแผงเซลล์ชนิดซิลิกอนด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดต่างๆ และกรรมวิธีในการบ่มแผ่นหุ้มฉนวน สาเหตุของการเสื่อมสภาพของแผง ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุหุ้มฉนวน การศึกษาพัฒนาทางด้านคุณสมบัติของวัสดุและกระบวนการ การผลิตแผงเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานบนโลก การเสื่อมสภาพวัสดุหุ้มฉนวนที่มีผลต่อสมรรถนะของแผง การเสื่อมสภาพของวัสดุหุ้มฉนวนที่มีผลต่อการฉนวนของแผง การทดสอบแผงที่เสื่อมสภาพตามมาตรฐานการทดสอบ และแบบจำลองสายส่งสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.1 บทนำ

Chapin, Fuller และ Pearson แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ครั้งแรกใน พ.ศ. 2497 (ค.ศ. 1954) [20] นักวิทยาศาสตร์ทั้งสามใช้เทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเจือ (Impurity Diffusion) เข้าไปในผลึกของซิลิกอน สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แรกของโลก ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่เป็นแหล่งกำเนิดพลังไฟฟ้าในโครงการอวกาศ ทั้งดาวเทียมหรือยานอวกาศ ต่อมาจึงมีการใช้แผงมาใช้งานบนพื้นโลก ส่วนประกอบโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [21]

จากรูปที่ 2.1 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากให้เป็นแผงเพื่อเพิ่มแรงดันและกระแส ต้องแก้ปัญหาแผ่นซิลิกอนที่บาง รับน้ำหนักไม่ได้ แดกร้าวได้ง่าย และไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมบนพื้นโลก เช่น ความชื้นหรือฝน ไอสารเคมี ในการนำไปใช้งานจึงต้องมีการห่อหุ้มที่เสถียร โดยทั่วไปด้านหน้า

ของแผงเซลล์เป็นแผ่นกระจกที่มีส่วนผสมของเหล็กต่ำ ขอมให้แสงผ่านได้ดี และยังเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์ นอกจากนี้เพื่อป้องกันแผ่นกระจกด้านบนของแผงเซลล์ จึงมีวัสดุที่แข็งแรง เป็นกรอบ แต่ถ้ามันกระจกมีความแข็งแรงเพียงพอ ก็ไม่จำเป็น

ดังนั้นแผงเซลล์จึงมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ สะดวกในการติดตั้ง นอกจากนี้แผงเซลล์ต้องมีการป้องกันความชื้นที่ดีเพราะใช้งานกลางแจ้ง การประกอบจะต้องใช้วัสดุห่อหุ้มเซลล์ (Encapsulating Material) และเป็นตัวยึดติดโปร่งใสในตัว (Transparent Adhesives) ซึ่งมีความคงทนและป้องกันความชื้นที่ดี เช่น ซิลิโคนและอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) เป็นต้น

ระบบห่อหุ้มสำหรับอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต้องผลิตครั้งละจำนวนมาก ใช้เวลาน้อย ซึ่งไม่เพียงแต่เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแผ่นบางเท่านั้น แต่วัสดุห่อหุ้มก็ต้องเป็นไดอิเล็กตริกแผ่นบางด้วย เช่นเดียวกัน เพื่อให้ทำหน้าที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในราคาประหยัด วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Materials) ที่ใช้หุ้มแผง ต้องยึดติดแน่นและรองรับเซลล์ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและยังต้องส่งผ่านทางแสงได้ดี นอกจากนี้หน้าที่สำคัญของวัสดุไดอิเล็กตริกก็คือ เป็นฉนวนทางไฟฟ้าของวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และไม่เสื่อมสภาพจนเป็นอันตรายทางไฟฟ้า หรือทำให้ประสิทธิภาพของแผงลดลงเกิดกว่าที่ขอมรับได้

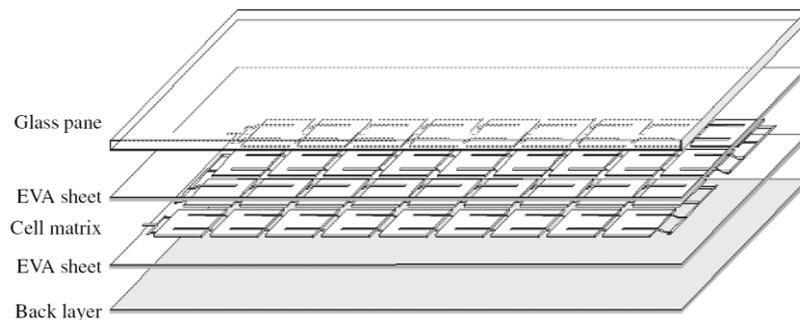
เพื่อให้เกิดความเชื่อถือได้ในระบบการฉนวนแผง ในสภาพการทำงานกลางแจ้งได้นานกว่า 20 ปี จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็กตริก การเลือกวัสดุไดอิเล็กตริก การจัดชั้นฉนวน กระบวนการห่อหุ้มแผง การตรวจสอบวินิจฉัยแผงหลังสิ้นสุดกระบวนการผลิต รวมทั้งการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายแผง ก่อนการติดตั้งใช้งานในภาคสนาม

เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกที่ดี มีราคาแพง ทำให้ไม่คุ้มทุนต่อการนำไปใช้งาน หรือทำให้แผงมีราคาสูง แต่หากใช้วัสดุไดอิเล็กตริกที่มีคุณภาพไม่ดีนัก แม้จะได้แผงราคาถูก แต่การใช้งานแผงกลางแจ้งเป็นระยะเวลานานภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง ขอมมีโอกาสทำให้ไดอิเล็กตริกของแผงเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นได้

นอกจากการเสื่อมสภาพของวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีคุณภาพไม่ดี มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจากกรณีต่างๆ เช่น ความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ สภาวะแวดล้อมการใช้งานจากการเกิดการบังเงา การใช้งานในที่ที่มีความชื้นหรือกัดกร่อนสูง สภาพภูมิอากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมิกลางวันและกลางคืน เป็นต้น

## 2.2 การหุ้มฉนวนแผงชนิดแผ่นผลึกซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยวถูกนำมาต่อกันหลายเซลล์ในแผงเดียวกัน (Module) เพื่อเพิ่มกระแสและแรงดันของแผงให้สูงกว่าจากหนึ่งเซลล์ เซลล์ถูกต่อแบบอนุกรมด้วยการร้อยเป็นสาย (Strings) เพื่อเพิ่มแรงดัน และขนานกันหลายสายเพื่อเพิ่มกระแส และถูกหุ้มฉนวน (Encapsulated) โครงสร้างทั่วไปของแผงถูกจัดเป็นชั้นๆ ด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน (Composite Plastic Sheet) วางเรียงซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 การเรียงซ้อนกันของวัสดุต่างๆ สำหรับการหุ้มฉนวนให้แผงเป็นแผ่นเดียวกัน [22]

จากรูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์ถูกหุ้มด้วยแผ่นอีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) ซึ่งเป็นวัสดุใสทั้งด้านบนและด้านล่าง ด้านหน้าของแผงถูกปิดด้วยแผ่นกระจก ด้านหลังแผงถูกปิดด้วยแผ่นพลาสติกปิดหลัง (Back Sheet) เพื่อกันน้ำชั้นเดียวหรือหลายชั้น ขึ้นอยู่กับการเลือกวัสดุหุ้มฉนวนแผง การออกแบบและกระบวนการการผลิตแต่ละโรงงาน

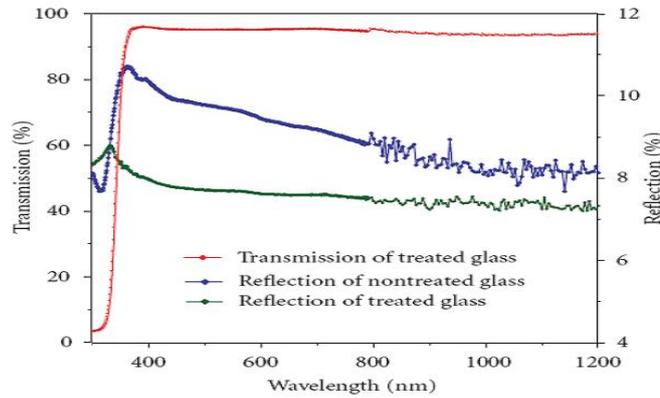
หัวข้อนี้มุ่งเน้นในรายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุหุ้มฉนวนต่างๆ ที่ใช้ในการหุ้มฉนวนแผง โดยเฉพาะสมบัติด้านไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานเป็นวัสดุหุ้ม และกระบวนการหุ้มฉนวนแผง

### 2.2.1 วัสดุสำหรับการหุ้มฉนวนแผง

#### กระจก

นิยมใช้กระจกนิรภัยหุ้มแผง ทำมาจากซิลิกา (Silica-SiO<sub>2</sub>) ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนหรือทางเคมี เพื่อสร้างแรงเค้นที่ผิวและแรงดึงที่ศูนย์กลางของแผ่นกระจกในปริมาณที่ถ่วงดุลกันพอดี เมื่อกระจกแตกจึงเป็นเม็ดกลมมน นอกจากนี้กระจกนิรภัยมีความแข็งแรงกว่ากระจกธรรมดา 3-5 เท่า ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่ากระจกธรรมดา ทนทานต่อการรับแรงปะทะหรือแรงลม และอาจมีเพิ่มสารซึ่งมีซีเรียม (Cerium, Ce) เข้าไปในสูตรการทำกระจกสำหรับแผง เพื่อกันแสงยูวีที่มีความยาวคลื่น <400 nm เนื้อกระจกมีผิวหยาบละเอียด (Tempered and Textured Glass) หนา 4 มม. ซึ่ง

ประกอบด้วยโลหะต่ำ (Low Iron) เพื่อให้รังสีคลื่นสั้นในรังสีแสงอาทิตย์ส่องผ่าน [16] ผิวด้านนอกกระจกถูกปรับสภาพด้วยกรดฟลูออซิลิซิก (Fluorosilicic Acid,  $H_2SiF_6$ ) เพื่อสร้างชั้นที่พรุนเป็นรู (Porous Layer) ลึกประมาณ 1100 Å รูเล็กเหล่านี้ช่วยลดการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบบมีค่าต่ำกว่า 8% ในช่วง 380 nm-1200 nm ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การส่งผ่านแสงและการสะท้อนของกระจกสำหรับการฉีกแผง [23]

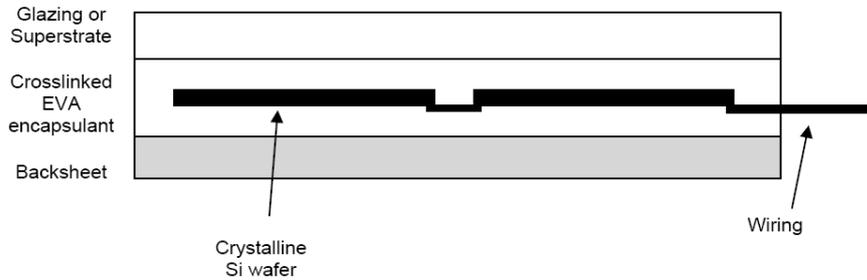
คุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สำคัญของกระจกสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปกระจกทนอุณหภูมิสูงสุดได้ราว 110-460°C มีสภาพต้านทานสูง (High Resistivity) และความคงทนไดอิเล็กตริกสูง (High Dielectric Strength) จึงทำให้มีความทนต่อแรงดันเสียหายยับยั้งได้มาก ในช่วงย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 60 Hz ถึง 1 MHz กระจกมีค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ค่อนข้างคงที่และตัวประกอบการสูญเสีย (Loss Factor) เป็นความร้อนน้อย

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางด้านไดอิเล็กตริกของกระจก [24]

ลักษณะสมบัติ	ค่า
สภาพต้านทานเชิงปริมาตร	$10^8$ ถึง $20^{18} \Omega \cdot \text{cm}$
ค่าความคงทนทางไดอิเล็กตริกไฟฟ้ากระแสสลับ ณ อุณหภูมิ 20 °C	4.5 MV/cm
ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกที่ 60 Hz	6.25
ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกที่ 1 kHz	6.16
ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกที่ 1 MHz	6.00
ตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนที่ 60 Hz	$5.0 \times 10^{-3}$
ตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนที่ 1 kHz	$4.2 \times 10^{-3}$
ตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนที่ความถี่ 1 MHz	$2.7 \times 10^{-3}$

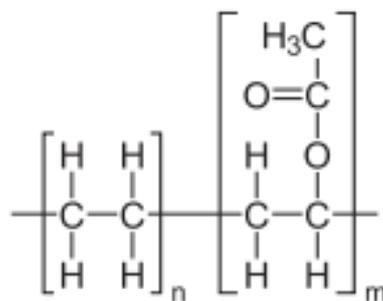
**เอซีอีทีเอ็นไวนิลอะซิเตต**

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสอดใส่ตรงกลางระหว่างชั้นสองชั้นของตัวหุ้มผนังหรือวัสดุเหนียวนุ่ม (Pottant Material) ดังรูปที่ 2.4 วัสดุที่นิยมนำมาใช้ห่อหุ้มหรือรองรับและป้องกันในปัจจุบันใช้โคโพลิเมอร์เอซีอีทีเอ็น-ไวนิลอะซิเตตหรืออีวีเอ (Copolymer Ethylene Vinyl Acetate, EVA)



**รูปที่ 2.4** ภาพตัดขวางของแผงที่มีอีวีเอห่อหุ้มเซลล์ไว้ [25]

อีวีเอเป็นพลาสติกโปร่งแสงไวต่อความร้อน (Thermo-sensitive Transparent Resin) ค่าการส่งผ่านแสงย่าน 400 nm-1100 nm ใกล้เคียงกับกระจกและส่งผ่านแสงดีกว่า 90% มีอัตราการดูดซึมน้ำน้อยราว 0.05%-0.13% มีความยืดดึง 900-1100% และความยืดหยุ่น 4.8 MPa โครงสร้างทางเคมีของอีวีเอแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลยาวโดยมีโครงหลัก (Backbone) ของอะตอมคาร์บอน เชื่อมผูกด้วยข้อต่อที่ยึดติดกันโดยคู่ของอิเล็กตรอนที่อยู่ระหว่างอนุภาคของอะตอมเดี่ยว (Single Covalent Bonding) อีวีเอสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อถูกความร้อน (Thermoplastic) ซึ่งโดยทั่วไปอีวีเอจะมีส่วนผสมไวนิลอะซิเตตอยู่ 32-34% ของน้ำหนัก ผสมกับสารปรงแต่งต่างๆ คือ สารการบ่ม (Curing Agent) สารดูดซับยูวี (UV Absorber) สารยับยั้งการรวมตัวของออกซิเจนทางแสง (Photo-antioxidant) และสารที่ยับยั้งการรวมตัวของออกซิเจนทางความร้อน (Thermo-antioxidant)



**รูปที่ 2.5** โครงสร้างทางเคมีของอีวีเอ [26]

จากรูปที่ 2.5 เมื่ออีวีเอถูกผลิตจากการรวมโมโนเมอร์ต่างชนิดกัน 2 ชนิดคือ โมโนเมอร์ของเอซีอีทีเอ็น (H<sub>2</sub>C-CH<sub>2</sub>) และโมโนเมอร์ของไวนิลอะซิเตต (CH<sub>3</sub>COOCH-CH<sub>2</sub>) ในกรณีนี้ที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของไวนิลอะซิเตต (Weight % Vinyl Acetate) มากขึ้น ย่อมส่งผลต่อข้อดีตามธรรมชาติของสายโซ่ด้าน

Acetoxy หรือส่วนโครงสร้างทางเคมีของ  $\text{CH}_3\text{-C(=O)-O-}$  ในโมโนเมอร์ของไวนิลอะซิเตต ดังนั้นเมื่อปริมาณไวนิลอะซิเตตสุทธิเพิ่มขึ้น สภาพขั้ว (Polarity) ของกลุ่มไวนิลอะซิเตตเปลี่ยนแปลงไป [27] ทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของอีวีเอเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสมบัติทางไฟฟ้าของอีวีเอ [27]

ลักษณะสมบัติ	เปอร์เซ็นต์ไวนิลอะซิเตตในโคโพลีเมอร์อีวีเอ		
	7.5%	18%	28%
ตัวประกอบกำลังที่ 50 Hz	0.0016	0.0012	0.0008
ตัวประกอบกำลังที่ 10 MHz	0.014	0.035	0.043
สภาพยอม (Permittivity) ที่ 10 MHz	2.46	2.7	2.95
ค่าความต้านทานเชิงปริมาตรปรากฏ 1 มม. (Apparent Volume Resistivity 1 mm) ( $\Omega\cdot\text{mm}$ )	$2 \times 10^{17}$	$2.5 \times 10^{16}$	$3 \times 10^{14}$
ความคงทนของไดอิเล็กตริก (kV/mm)	20	20	20

ตัวอย่างสมบัติด้านฉนวนทางไฟฟ้าของอีวีเอแสดงตามตารางที่ 2.2 มีส่วนผสมของไวนิลอะซิเตตในโคโพลีเมอร์อีวีเอที่แตกต่างกันคือ 7.5%, 18% และ 28% ตามลำดับ พบว่าอีวีเอยังคงมีสมบัติด้านฉนวนทางไฟฟ้าที่ดีเช่น มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าและค่าความคงทนต่อแรงดันของไดอิเล็กตริกสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อส่วนผสมของไวนิลอะซิเตตมากขึ้น ทำให้ตัวประกอบกำลังความสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น และมีสภาพยอม (Permittivity) สูงขึ้น

### แผ่นปิดผนึกด้านหลัง

แผ่นปิดผนึกด้านหลัง (Back-sheet Laminates) เป็นแผ่นฟิล์มบาง หรือกระดาษ ที่มีแข็งแรงและมีความคงตัวทุกมิติ จึงทำให้มีการดูดซึมน้ำน้อยมาก และยังมีสมบัติการกันก๊าซ การต้านทานทางเคมีได้ดี และมีความคงทนทางไดอิเล็กตริกต่อแรงดันสูง ความหนาประมาณ 25-100  $\mu\text{m}$  ในปัจจุบันนิยมใช้ฟลูออโรโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ซึ่งฟิล์มที่มีใช้งานทั่วไปมีหลายแบบเช่น โพลีเอธีลีน เทเรพทาเลต ฟิล์ม พีโอที (Polyethylene Terephthalate Film, PET) หรือเรียกเชิงการค้าเรียกว่าไมลาร์ (Mylar) โพลีไวนิลฟลูออไรด์ หรือ พีวีเอฟ (Polyvinyl Fluoride, PVF) ในเชิงการค้าเป็นฟิล์มจาก DuPont ที่ขายภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อว่า เทดลาร์ (Tedlar®) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่สำคัญของแผ่นปิดฉนวนด้านหลัง [24, 28]

สมบัติ	ไมลาร์	เทคลาร์
ค่าการดูดซับน้ำ	0.10%	0.05%
ดัชนีออกซิเจน	20%	35%
ความคงทนทางไดอิเล็กตริก	40 kV/mm	20 kV/mm
สภาพความต้านทานเชิงปริมาตร	$10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$	$10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$
ตัวประกอบความสูญเสีย ที่ 1 kHz	0.01	0.016
ความคงตัวทางไดอิเล็กตริกที่ 1 kHz	3.5	8.5

แม้ผู้ผลิตแผงบางรายใช้พีวีเอฟอย่างเดียวยังเป็นแผ่นปิดด้านหลัง แต่มีโครงสร้างแบบอื่นเช่น

(ก) โครงสร้างส่วนมาก ใช้วัสดุปิดหุ้มฉนวนพีวีเอฟด้วยโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ดังนั้นแผ่นปิดฉนวนส่วนใหญ่จึงมีสามชั้นคือ PVF/PET/PVF โดยใช้โครงสร้างแบบฟลูออโรโพลีเมอร์ป้องกันทั้งสองด้านของโพลีเอสเตอร์ฟิล์มจากการเสื่อมสภาพทางแสง (Photodegradation) แผ่นปิดฉนวนแบบนี้รวมสมบัติที่ดีของวัสดุทั้งสองเข้ากันอย่างได้คูล การแยกออกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างชั้นฉนวนด้านหลังแผง (Electrical Isolation) มีค่าเพิ่มขึ้น การแทรกซึมจากความชื้น (Moisture Permeation) มีลดลง และต้นทุนถูกลง [27]

(ข) ในการประยุกต์กับสถานะที่มีความชื้นสูง ใช้แผ่นปิดหุ้มฉนวน PVF/Aluminum Foil/PVF เนื่องจากโครงสร้างแบบนี้ไม่ยอมให้ความชื้นแทรกซึม แต่ข้อเสียคือประสิทธิภาพการฉนวนลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของแผ่นปิดฉนวนแบบ PET

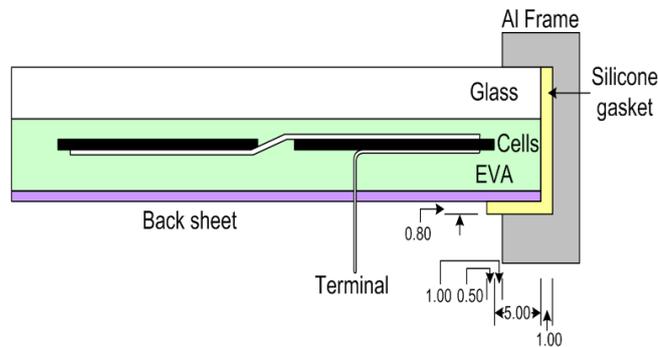
(ค) ถ้าต้องการแทรกซึมจากความชื้นน้อยที่สุดพร้อมกับต้องการฉนวนทางไฟฟ้าสูงสุด ต้องใช้แบบสี่ชั้นคือ PVF/Al/PET/PVF เป็นต้น

(ง) ผู้ผลิตแผงบางรายเพิ่มแผ่นอลูมิเนียมด้านหลังของแผง ในโครงสร้างเทคลาร์-อลูมิเนียม-เทคลาร์ แผ่นอลูมิเนียมป้องกันแผงจากความชื้นและการกระแทกทางกล [29] โดยอลูมิเนียมถูกวางซ้อนระหว่างแผ่นเทคลาร์ความหนา 180  $\mu\text{m}$  และใช้เทคลาร์เป็นสีขาวสะท้อนแสงสูงสุดไปยังเซลล์

### กาวฉนวน

หลังการหุ้มฉนวน (Post Lamination Steps) ด้วย กระดาษ อีวีเอ และแผ่นปิดด้านหลัง ให้เป็นแผ่นเดียวกัน ขั้นตอนต่อมาคือ การตัดแต่งขอบเพื่อตัดส่วนหุ้มฉนวนที่ยื่นเกินออกไป แล้วปิดฉนวนด้วยยางซิลิโคน (Silicone Rubber) เพื่อปิดทางของการแทรกซึมของความชื้น และติดตั้งโครงอลูมิเนียมค้ำรูปที่ 2.6 ซึ่งเห็นได้ว่ามีความแตกต่างของแรงดันสูงระหว่างโครงกับขั้วต่อสายต่างๆ ดังนั้น โครงจึงต้อง

ถูกฉนวนทางไฟฟ้าจากวงจรของเซลล์ที่กำลังทำงาน เพื่อไม่ให้เกิดกระแสรั่วไหลมากเกินไปจนทำให้เกิดความร้อนสูงและเกิดเพลิงไหม้ขึ้นได้



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางการฉนวนด้วยซิลิโคนระหว่างขอบแผงกับขอบโครงแผง [30]

ยางซิลิโคนเป็นฉนวนใช้งานในย่านอุณหภูมิ -55°C ถึง 200°C ได้อย่างปลอดภัย ด้านทานกรด ต่าง น้ำมัน แอลกอฮอล์ โอโซน โครโรนา (Corona) และทนต่อสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงได้ อย่างไรก็ตาม ยางซิลิโคนถูกกัดกร่อนได้โดย Halogenated Hydrocarbons สารละลาย Aromatics กรดเข้มข้น และไอน้ำ ยางซิลิโคนที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายประเภทเช่น แบบ High Temperature Vulcanized (HTV) และ Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) ซึ่งเหมาะสำหรับงานภายนอกอาคาร [31] การเปรียบเทียบสมบัติของยางซิลิโคนแบบ HTV กับ EPDM แสดงตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติของยางซิลิโคนแบบ HTV และ EPDM [31]

สมบัติของวัสดุ	ยางซิลิโคน HTV	ยางซิลิโคน EPDM
ความคงทนทางไดอิเล็กตริก (kV/mm)	20.01	19.7-31.5
ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก (1 MHz)	3.0-3.6	2.5-3.5
ตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อน (1 MHz)	0.005	0.007
สภาพต้านทานเชิงปริมาตร ( $\Omega \cdot m$ )	$10^{13}$	$10^{14}$
ความถ่วงจำเพาะ	1.15-1.55	0.85
ความยืดดึง % (ASTM-D412)	200	200
ความต้านทานต่อการฉีก	พอใช้	ดี
ความต้านทานต่อน้ำ	ดี	ดีมาก
อุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน	200°C	177°C
ความต้านทานต่อการลามไฟ	ไม่ดี	ไม่ดี
ความต้านทานต่อโอโซน	-	ดีมาก

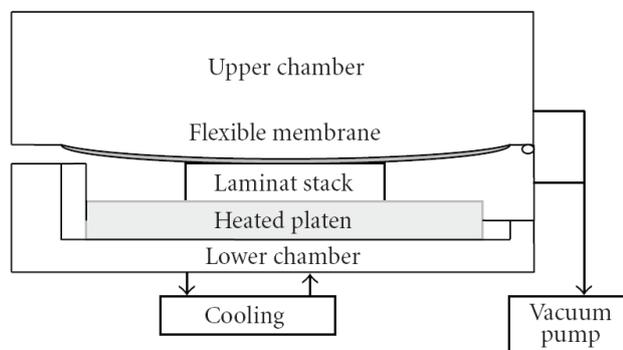
### 2.2.2 กระบวนการหุ้มฉนวนและการบ่ม

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือ การหุ้มฉนวนเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้เซลล์ในงานกลางแจ้งได้ และปกป้องเซลล์แสงอาทิตย์จากความเสียหายจากสิ่งแวดล้อม สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว จะมีการปรับสภาพวัสดุฉนวนด้วยความร้อน (Thermal Treatment) เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากที่สุดในกระบวนการ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดคุณภาพและความเชื่อถือได้ของชิ้นส่วนต่างๆ

การปรับสภาพด้วยความร้อนแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ การทำเป็นแผ่นฉนวน (Lamination) และปฏิกิริยาทางโพลิเมอร์ที่ใช้ตัวเร่งความร้อน (Polymerization) มีการทดสอบอิวีเอที่จำเป็นเพื่อนำไปตั้งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับทางกระบวนการเช่น ระดับของสุญญากาศ ความดัน อุณหภูมิ เวลา เป็นต้น ด้านการควบคุมคุณภาพการหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ปรับปรุงองค์ประกอบเกี่ยวกับการปรับสภาพของความใส ทำให้การสะท้อนกลับของแสงลดต่ำลงมาอยู่ที่ระดับ 8% [13]

#### เครื่องทำแผ่นฉนวน (Laminator)

ส่วนประกอบของเครื่องทำแผ่นฉนวนดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีหลักการที่สำคัญคือ การปรับสภาพโพลิเมอร์ด้วยความร้อน ด้วยการเชื่อมฟิล์มโพลิเมอร์หลายชั้นที่ไวต่อความร้อนเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ การวางวัสดุหุ้มฉนวนซ้อนเป็นชั้นๆ (Lamination) และการบ่ม (Curing) กระบวนการในตู้มีตัวแปรที่สามารถควบคุมได้อย่างอิสระคือ อุณหภูมิ สุญญากาศ และความดันอากาศ เพื่อจัดเงื่อนไขของกระบวนการให้ดีที่สุด เซลล์ที่ถูกเชื่อมต่อทางไฟฟ้าวางไว้ระหว่างอิวีเอสองแผ่นและมีแผ่นกระจกวางทับ กระจกเป็นผิวด้านหน้าของแผง ในกรณีฉนวนด้วยกระจกสองด้าน (Biglass Process) ผิวด้านหลังจะเป็นกระจก แต่กรณีการฉนวนด้วยกระจกเดี่ยว (Monoglass Process) ผิวด้านหลังเป็นแผ่นปิดเทดลาร์-อลูมิเนียม-เทดลาร์ (Tedlar-aluminium-tedlar) กระบวนการหลังนี้มักถูกเลือกใช้และถูกพัฒนา เนื่องจากลงทุนไม่สูงและมีสมรรถนะที่ดี



รูปที่ 2.7 แผนภาพของเครื่องบ่มซ้อนเป็นชั้นๆ [23]

### กระบวนการในเครื่องทำแผ่นผืน

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องทำแผ่นผืนเครื่องคือ การครอบปิดขอบให้แน่น ครอบฝาห้องที่อยู่ข้างใน (Internal Chamber) และไดอะแฟรมซึ่งเป็นตัวแยกจากห้องที่ทำการบรรจุผง ห้องทั้งสองแยกออกจากกันได้อย่างอิสระ จึงทำให้ห้องบรรจุผงเป็นสุญญากาศได้ ขณะเดียวกันก็มีแรงทางกลกดอยู่

ขั้นตอนการทำเป็นแผ่นผืน เริ่มทำให้อากาศทั้งสองห้องถ่ายเทถึงกันได้ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าจุดหลอมละลายของอีวีเอที่ประมาณ 120°C อีวีเอก็ไหลแทรกช่องว่างและตรึงเซลล์ไว้ สุญญากาศเป็นตัวการสำคัญที่ดูดอากาศ ความชื้นและก๊าซอื่นๆ ออกไม่ให้เกิดช่องว่าง (Void) ขณะที่ผืนผึ่ง หลังจากนั้นสองสามนาที ขณะที่ห้องใส่ผงยังเป็นสุญญากาศ จะปล่อยอากาศเข้าห้องบนไดอะแฟรม กดลงบนแผ่นผืน อุณหภูมิถูกเพิ่มขึ้นเป็น 150°C

ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มต้นในการบ่ม โดยตัวกระทำการบ่มจะชักนำให้เกิด Cross-linking ของสายโซ่อีวีเอ ซึ่งก่อนการบ่มมี Cross-linking เพียงเล็กน้อย พลาสติกที่ได้ต้องมีสมบัติของความยืดหยุ่น (Elastomeric) คล้ายยาง ขั้นตอนนี้ ใช้เวลาประมาณ 60 นาที สำหรับบ่มอีวีเอตามมาตรฐาน หลังจากการทำให้เย็นลง แผ่นผืนก็ถูกนำออกจากเครื่องทำแผ่นผืน

การผืนผงที่กล่าวมา มีกระบวนการที่ซ้ำ จึงมีการปรับปรุงให้เหมาะสมกับงานอุตสาหกรรม ดังนี้คือ

- (1) การใช้สูตรอีวีเอบ่มเร็วเชิงการค้า ทำให้ใช้เวลาการบ่มลดลงมาก บางสูตรใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่า 10 นาที
- (2) ขั้นตอนปฏิบัติการบ่มในเตาอบแยก มีการลดเวลาที่อยู่ในเครื่องผืนผึ่งลง
- (3) เพิ่มพื้นที่การผืนผึ่งขนาดใหญ่ให้ใหญ่ขึ้นหลายๆ ตารางเมตร และสามารถทำได้หลายแผงพร้อมกันในกระบวนการเดียวกัน

### การพัฒนากระบวนการผืนผึ่ง

ในเชิงอุตสาหกรรม วัฏจักรที่เร็วและสั้นถูกใช้เพื่อให้ได้สมรรถนะการผลิตหรือมีปริมาณการผลิตได้ปริมาณมากๆ โดยการพัฒนากระบวนการทำแผ่นผืนให้อยู่ในช่วงเวลาเฉลี่ยประมาณ 22 นาที โดยไม่นับรวมเวลาที่เอาผงเข้าและเอาผงออกจากตู้

การพัฒนากระบวนการทำแผ่นผืน มักพิจารณาลำดับขั้นการปฏิบัติงาน เพื่อหาลำดับขั้นที่สั้นที่สุด โดยยังสามารถผลิตแผ่นผืนที่ดี ไม่มีผลเสียเกิดขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ในการผืนผึ่ง ส่วนที่วิกฤตมากที่สุดของวัฏจักรการผืนผึ่งคือ การละลายอีวีเอให้หุ้มผืนผึ่ง เวลาในการประกอบ

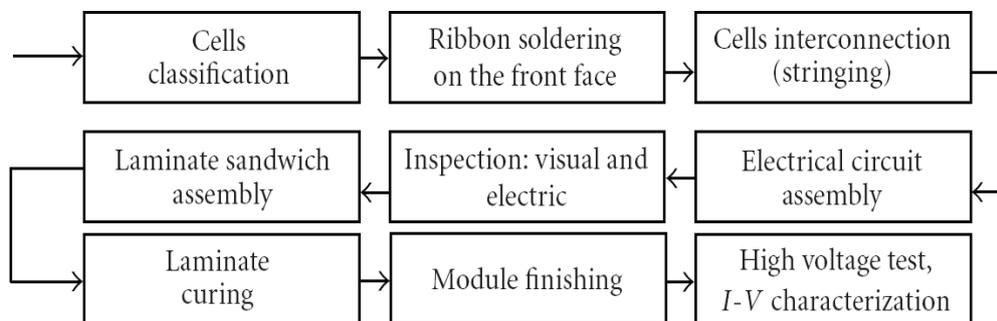
ภายใต้สุญญากาศ เวลาของความดันที่ใช้ อุณหภูมิภายใต้ความดันที่ใช้ และช่วงเวลากับความดันทั้งหมด ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของการทำเป็นแผ่นผนัง

ตัวอย่างการพัฒนาวัฏจักรการทำเป็นแผ่นผนังในเครื่องทำแผ่นผนัง โดยเริ่มต้นจากการนำแผ่นผนังมาซ้อนเป็นชั้น (กล่าวคือ เซลล์และวัสดุการหุ้มผนังต่างๆ) ห้องข้างล่างควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 100°C ห้องข้างบนเป็นสุญญากาศ (ความดัน 0.1 mmHg) มีระยะการทำแผ่นผนังอยู่ 2 ช่วง ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) ระยะที่หนึ่ง ดูดอากาศออกห้องชั้นล่างนาน 5 นาทีให้ได้ความดันไว้ที่ 0.1 mmHg และอยู่ที่ค่านี้นี้ตลอดเวลา ทั้งตอนการทำเป็นแผ่นผนัง และวัฏจักรการทำปฏิกิริยาโดยการเร่งด้วยความร้อน

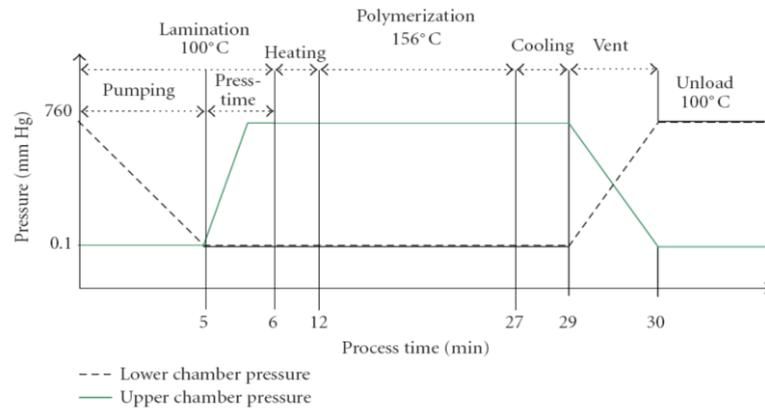
(2) ในระยะที่สอง เติมอากาศเข้าห้องบนเพื่อเพิ่มแรงกดลงที่แผง ป้อนอากาศห้องล่างและความดันที่แผ่นบาง (Membrane) ทำงานร่วมกันเพื่อดูดอากาศและความชื้นที่เหลืออยู่ในแผ่นผนังออก

ในช่วงเวลาที่แผงถูกทำให้ร้อน อีวีเอจะละลายหุ้มรอบผนังวงจรไฟฟ้ากับกระจกด้านหน้า และปิดแผ่นหลังของแผง ที่อุณหภูมิการบ่ม 156°C อีวีเอจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนจากโมโนเมอร์กลายเป็นโพลิเมอร์ ขั้นตอนนี้ทำให้เกิดการ Cross Link ของอีวีเอ



รูปที่ 2.8 แผ่นภูมิสายงานของกระบวนการประกอบแผง [23]

หลังจากลดอุณหภูมิลงที่ 100°C ห้องข้างล่างอยู่ที่ความดันบรรยากาศ และห้องข้างบนอยู่ที่ความดันสุญญากาศ 0.1 mmHg เกิดวัฏจักรยาว (Long Cycle) ของกระบวนการหุ้มผนัง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 วัฏจักรยาวของการทำแผ่นพนักด้วยการปรับสภาพทางความร้อน [23]

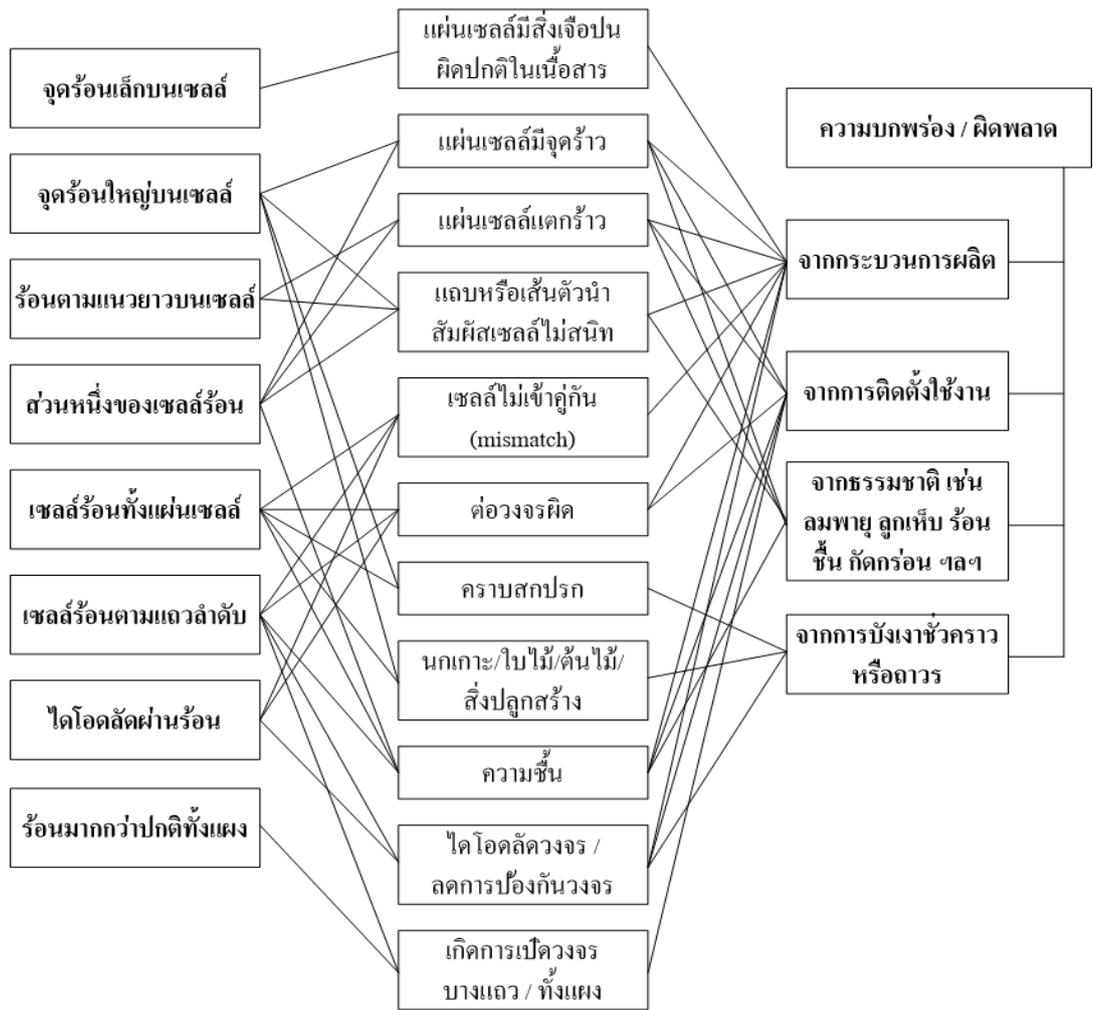
## 2.3 การเสื่อมสภาพในแผง

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพแผงมีหลายประการเช่น ความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีกระแสไหลผ่าน ความร้อนจากการบังเงา การใช้งานในที่ที่มีความชื้นหรือกักความร้อนสูง สภาพภูมิอากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมิกลางวันและกลางคืน การเสื่อมสภาพที่สำคัญคือ การเปลี่ยนสี (Discoloring) การหลุดร่อนหรือแยกชั้น (Delamination) ของวัสดุหุ้มพนักด้วยอีวีเอ และการซึมเข้าของความชื้น (Moisture Penetration or Water Ingression)

การวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเสื่อมสภาพเหล่านี้ส่งต่อสมรรถนะของแผง ทำให้ค่าประสิทธิภาพต่างๆ ด้านเอาต์พุตของของแผงมีค่าลดลง ทั้ง I-V Curve กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) กระแสที่จุดสูงสุด ( $I_{pp}$ ) แรงดันที่จุดสูงสุด ( $V_{pp}$ ) กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_m$ ) และหรือ Fill Factor (FF) โดยมีรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

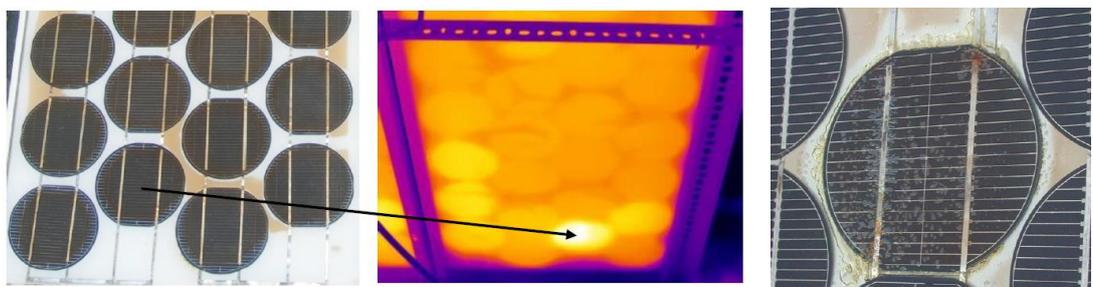
### 2.3.1 ความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้ของแผงและสมรรถนะของแผง นอกจากความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรงแล้ว ยังมีความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์เอง ความร้อนนี้เกิดขึ้นในขณะที่เซลล์ทำงาน ทั้งสภาวะมีโหลดหรือไม่มีโหลด ความผิดปกติทางความร้อนบนเซลล์ในแผงอาจมาจากหลายกระบวนการแสดงรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความผิดปกติทางความร้อนและสาเหตุที่อาจเป็นไปได้ [32]

จุดร้อนบนแผงอาจหาได้โดยการถ่ายภาพแผงในช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared Thermography) ดังรูปที่ 2.11 (ข) ซึ่งนอกจากสามารถบอกตำแหน่งจุดร้อนได้แล้ว ยังสามารถหาอุณหภูมิจากสีที่ถ่ายได้อีกด้วย ความร้อนบนเซลล์แสงอาทิตย์นี้ เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลทำให้เกิดการหลุดร่อนและการเปลี่ยนสีของอีวีเอ



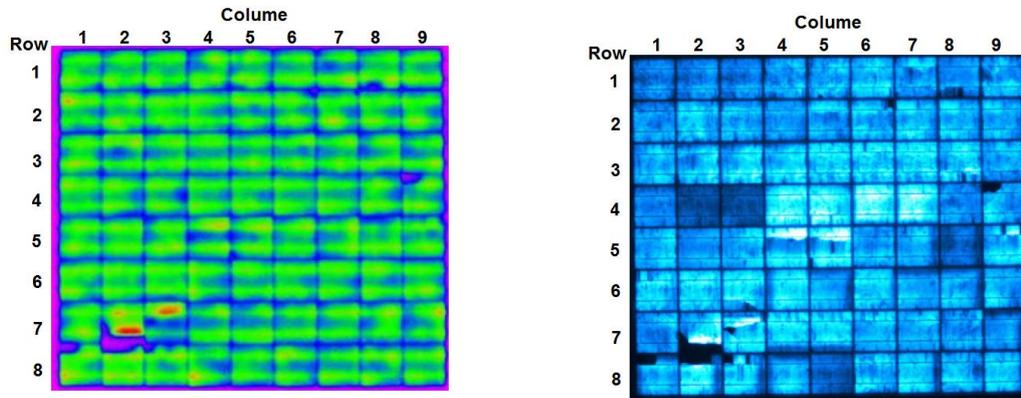
(ก) ภาพถ่ายทั่วไป

(ข) ภาพถ่ายอินฟราเรด

(ค) การหลุดร่อนบนเซลล์ที่เกิดจุดร้อน

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างจุดร้อนที่เกิดขึ้นบนแผง [17]

นอกจากนี้ ราวปลายปี ค.ศ. 2012 Buerhop, Cl., et al. [33] ได้รายงานเกี่ยวกับภาพถ่ายทางความร้อน แสงอินฟราเรดและภาพถ่ายการเรืองแสงทางไฟฟ้า (Electroluminescence) ของเซลล์แสงอาทิตย์ในแผงที่เกิดรอยแตก (Fracture) และรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ดังรูปที่ 2.12



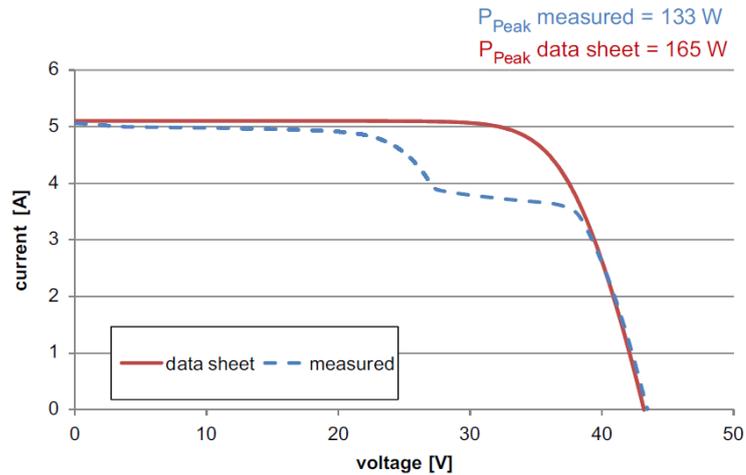
(ก) ภาพถ่ายทางความร้อนแสงอินฟราเรด

(ข) ภาพถ่ายการเรืองแสงทางไฟฟ้า

รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายเซลล์แตกร้าวภายในแผงด้วยวิธีแสงอินฟราเรดและการเรืองแสงทางไฟฟ้า [33]

ถึงแม้รอยร้าวขนาดเล็กจะส่งผลกระทบต่อกระจายอุณหภูมิในเซลล์ แต่หากการถ่ายภาพทางความร้อนด้วยแสงอินฟราเรดมีความละเอียด (Resolution) ไม่สูงพอ ก็อาจไม่สามารถตรวจจับความร้อนที่เกิดขึ้นจากรอยร้าวขนาดเล็กนี้ได้ ยกตัวอย่างเช่นเซลล์แถวที่ 6 คอลัมน์ที่ 3 ในรูปที่ 2.12 (ก) เนื่องจากแหล่งความร้อนแพร่กระจายครอบคลุมและได้คู่กับความร้อนเฉพาะแห่ง อย่างไรก็ตามในกรณีที่เกิดรอยแตกใหญ่ขึ้นเช่นเซลล์แถวที่ 7 คอลัมน์ที่ 2 ในรูปที่ 2.12 (ข) ซึ่งเห็นเป็นพื้นที่มืดกว่าในการถ่ายภาพแบบเรืองแสงทางไฟฟ้า และเซลล์นี้มีความร้อนสูงขึ้นเป็นสีแดงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) ที่อุณหภูมิแวดล้อม  $17^{\circ}\text{C}$  เซลล์ที่บกร่องเทียบกับเซลล์ใกล้เคียงที่ไม่ได้รับผลกระทบ มีความแตกต่างอุณหภูมิ  $\Delta T \approx 40.6^{\circ}\text{C}$  [33]

ผลการหาคณลัษณะ I-V ของแผงที่มีเซลล์แตก เทียบกับคุณลักษณะที่ระบุไว้เดิมตามรายงานของ Buerhop, Cl., et al. [33] แสดงดังรูปที่ 2.13 พบว่าเซลล์แตกภายในแผงทำให้กำลังไฟฟ้าและ Fill Factor ลดลง และหากเซลล์ใดมีรอยแตกใหญ่พอ ก็มีโอกาสดเกิดอุณหภูมิถึงจุดวิกฤต (Critical Temperature) ได้



รูปที่ 2.13 คุณลักษณะ I-V ของแผงที่เกิดเซลล์แตกร้าว (ดูรูปที่ 2.12) เทียบกับข้อมูลที่ระบุไว้ [33]

### 2.3.2 การเปลี่ยนสีของอีวีเอ

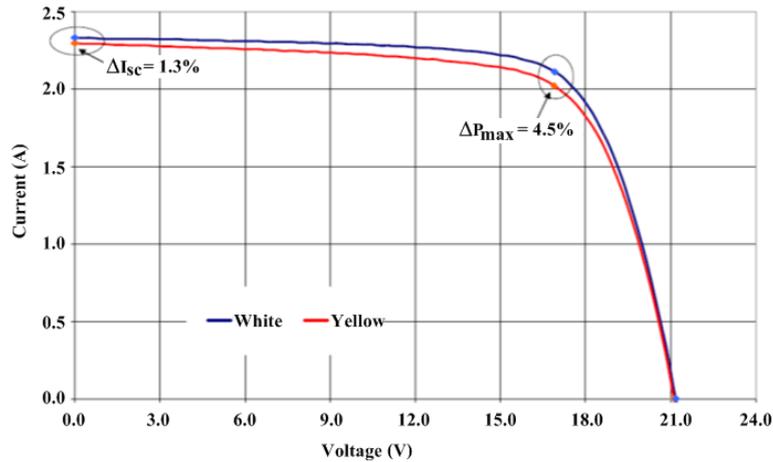
การเปลี่ยนสีของแผงมีหลายลักษณะเช่น ตัวหุ้มผนังกลายเป็นสีเหลือง (Yellowing of Encapsulant) แผ่นบางเคลือบด้านภายในกลายเป็นสีน้ำตาลหรือสีเหลือง ซึ่งสังเกตภายนอกด้วยตาได้เด่นชัด ส่วนมากตัวหุ้มผนังกลายเป็นสีเหลือง

การวิจัยปี ค.ศ. 1985 ของประเทศสวีตเซอร์แลนด์ รายงานการเปลี่ยนสีอีวีเอประมาณ 50% ของแผงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 12 เดือนต่อมา [17] ในปี ค.ศ. 2003 เกิดขึ้นถึงประมาณ 98% ของทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ตัวหุ้มผนังมีทั้ง Poly-vinyl-butyral Encapsulant, PVB และ Ethyl-vinyl-acetate, EVA เมื่ออยู่กลางแจ้งและถูกรังสียูวี กลายเป็นสีเหลืองเหมือนกัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography Analysis ของชิ้นตัวอย่างสีขาวและสีเหลืองที่ถูกตัดออกมาจากแผงที่แตกเสียหายสองแผง ปรากฏว่ามีส่วนผสม (พีวีบี) ที่เหมือนกัน



รูปที่ 2.14 แผงสีขาวและเหลืองในภาคสนามเดียวกัน [17]

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางไฟฟ้าและการเปลี่ยนสีของตัวหุ้มฉนวน แสดงดังรูปที่ 2.15 แสดงชัดเจนว่า เมื่อเทียบกับแผงที่ตัวหุ้มฉนวนเป็นสีขาวหรือเหลืองเพียงบางส่วน ในแผงที่เปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองอย่างสมบูรณ์ ค่า  $I_{sc}$  ลดลงมาก น้อยกว่าค่าที่ระบุ (Nominal Value) 10-13% สรุปได้ว่าการเหลืองของฉนวนหุ้มฉนวนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพกำลังไฟฟ้า (Power Degradation) และประสิทธิภาพแผง [17]



รูปที่ 2.15 คุณลักษณะทาง I-V ของแผงสีขาวและแผงสีเหลือง [17]

ในประเทศอิสราเอล มีการวิจัยระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพิ่มความเข้มกระจกเงา ที่ต่อเข้ากับกริดและติดตั้งในทะเลทรายเนเจฟ (Negev) พบว่าอีวีเอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและหลุดร่อนภายใน 5 ปีหลังการใช้งาน [34] ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในงานวิจัยนี้ นอกจากพบว่าอีวีเอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพแผงแล้ว การที่อีวีเอหลุดร่อนก็มีผลต่อประสิทธิภาพแผงเช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.16 แผงบริเวณกลางเซลล์เปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเหลือง-น้ำตาล [34]

ตารางที่ 2.5 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดพารามิเตอร์ไฟฟ้าที่ STC และค่าที่ระบุของแผงที่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหลังการใช้งานในทะเลทรายเนเจอร์ของประเทศอิสราเอล [34]

พารามิเตอร์	แผงที่กลายเป็นสีน้ำตาล (1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C)	ค่าที่ถูกระบุไว้ (1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C)
แรงดันเปิดวงจร V <sub>oc</sub>	22.8 ± 0.3V	22 V
กระแสลัดวงจร I <sub>sc</sub>	2.62 ± 0.07 A	2.9 A
แรงดันที่ก้ำกึ่งสูงสุด V <sub>pp</sub>	18.3 ± 0.4 V	18 V
กระแสที่ก้ำกึ่งสูงสุด I <sub>pp</sub>	2.39 ± 0.06 A	2.67 A
Fill factor FF	73.4 ± 0.9%	75%
กำลังไฟฟ้าสูงสุด P <sub>m</sub>	43.7 ± 1.3 W	48 W (ประกันไว้ต่ำสุดที่ 46 W)

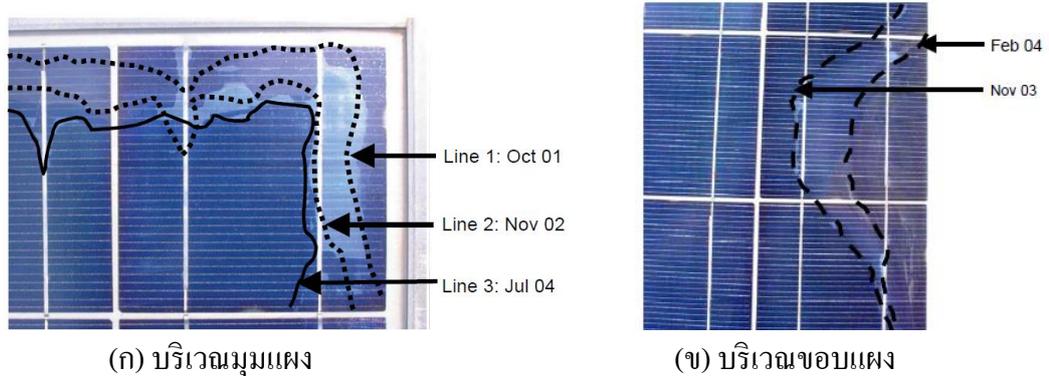
จากตารางที่ 2.5 พิจารณาพารามิเตอร์ I<sub>sc</sub>, V<sub>oc</sub>, I<sub>pp</sub>, V<sub>pp</sub>, P<sub>m</sub> และ FF ของแผงที่ใช้งานกับแผงใหม่ที่ผู้ผลิตโฆษณา (Advertised New Module) พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยของแผงที่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลคือ 43.7 W ลดลงถึง 9% จากค่าที่ได้ระบุไว้ที่ 48 W หรือลดลง 5% เทียบกับค่าต่ำสุดที่ได้รับประกันคือ 46 Wp

จากการวิจัยข้างต้นจึงสรุปได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของ 188 แผง ที่อีวีเอเป็นสีน้ำตาล น้อยกว่า 5% ของค่าต่ำสุดที่ได้รับประกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบของคณะผู้วิจัยกับเครื่องทดสอบของบริษัทผู้ผลิต พบว่าเครื่องของคณะผู้วิจัยมีแนวโน้มให้ค่าที่น้อยกว่าราว 4%-6% ดังนั้นพิกัดที่ลดลง 5% จากค่าตัวกำหนดที่บริษัทผู้ผลิตได้ระบุไว้คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดราว 45.6 W และค่าต่ำสุดที่ได้รับประกันไว้คือราว 43.7 W แต่ในความเป็นจริงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พบโดยคณะผู้วิจัยคือ 43.7 W และประมาณ 30% ของแผงมีค่าต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ได้รับประกันไว้สำหรับพิกัดที่ลดลง

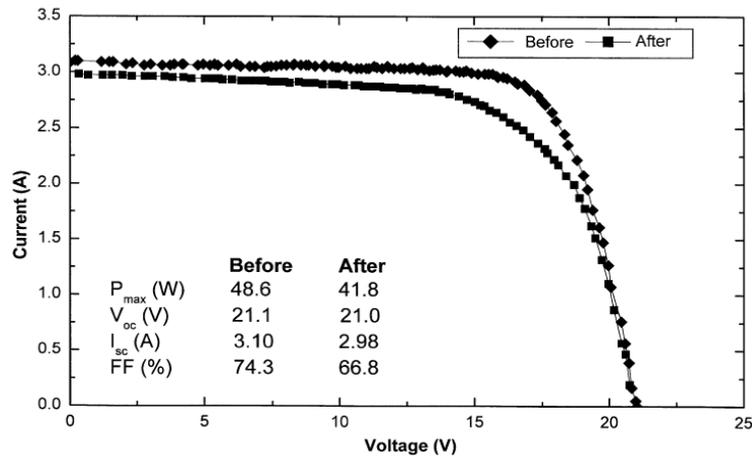
### 2.3.3 การหลุดร่อนของอีวีเอจากความชื้น

นอกจากการเสื่อมสภาพของอีวีเอที่เปลี่ยนสีแล้ว มีงานวิจัยแสดงการเสื่อมสภาพของชั้นหุ้มฉนวนจากการหลุดร่อนเนื่องจากการสูญเสียการยึดเกาะระหว่างชั้นหุ้มฉนวนกับส่วนอื่นๆ [34] ดังตัวอย่างรูปที่ 2.17 เป็นการหลุดร่อนบริเวณขอบรอบของแผง เนื่องจากการแทรกตัวของความชื้น ทำให้เกิดการหลุดแยกออกของฉนวนหุ้มฉนวนที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ แผงดังกล่าวเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบ Edge-defined Film-fed Growth (EFG) ใช้งานภายนอกอาคารเป็นเวลา 30 เดือนที่

Nelson Mandela Metropolitan University ประเทศแอฟริกาใต้ ที่มีอากาศร้อนและแห้งในช่วงเดือน ธันวาคมถึงมกราคม



รูปที่ 2.17 การเสื่อมสภาพจากการหลุดร่อนเนื่องจากการแทรกตัวเข้ามาของชื้น [35]



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบคุณลักษณะทาง I-V ของแผงในช่วงก่อนและหลังเกิดการหลุดร่อน [36]

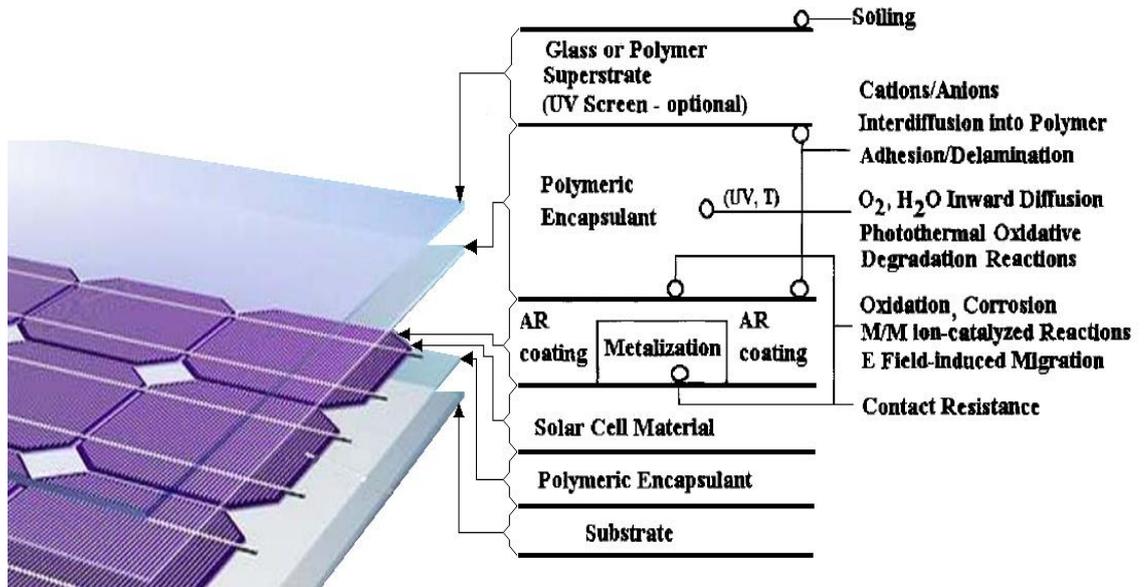
เมื่อนำแผงมาทดสอบหา I-V Curve และหาพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างการใช้งานสองปี (18 ตุลาคม ค.ศ. 2001 ถึง 3 เมษายน ค.ศ. 2003) ได้ I-V Curve และพารามิเตอร์ต่างๆ ดังในรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่ากระแสลัดวงจรและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดลดลง 3.8% และ 14% ตามลำดับ ค่า Fill Factor มีค่าลดลงจาก 74.3% เหลือเพียง 66.8%

## 2.4 กลไกการเสื่อมสภาพของไดโอดเล็กรีกหุ้มฉนวน

หัวข้อนี้สรุปสาระที่สำคัญของงานวิจัยด้านการเสื่อมสภาพของไดโอดเล็กรีกหุ้มฉนวนเนื่องจากอิทธิพลผสมผสานจากรังสีดวงอาทิตย์ ความร้อน ออกซิเจน น้ำ จุลินทรีย์ และสารเคมีต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพในวัสดุหุ้มฉนวน เพราะการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลจากปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญคือ การเสื่อมสภาพอีวีเอที่เกิดจากรังสียูวีและอนุมูล และความชื้นแทรกเข้าสู่แผง

### 2.4.1 การเสื่อมสภาพของอีวีเอจากรังสียูวีและอุณหภูมิ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีโอกาสเกิดความเสียหายจากความชื้นซึมเข้า การกัดกร่อนที่แถบตัวนำโลหะ ภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การลัดวงจรและการอาร์ก การเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ไม่ดีพอ การแตกของเซลล์เนื่องจากการขยายตัว และการเกิดจุดร้อนจากการบังเงา เป็นต้น ฉนวนหุ้มผนังเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะอีวีเอ ยังมีโอกาสเสื่อมสภาพจากรังสียูวีและอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.19

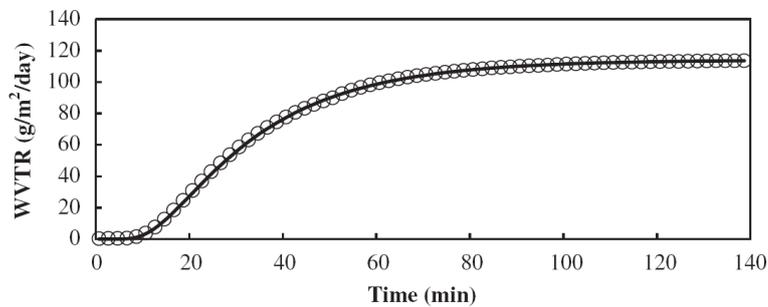


รูปที่ 2.19 โครงสร้างของวัสดุหุ้มผนังเซลล์แสงอาทิตย์สัมพันธ์กับการเสื่อมสภาพของแผง [37, 38]

Holley [39] รายงานในปี ค.ศ. 1993 เกี่ยวกับการกลายเป็นสีน้ำตาลทั่วทั้งแผงของฉนวนหุ้มผนังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอีวีเอ หลังจากใช้งานในภาคสนาม เป็นรายงานที่ไม่น่าแปลกใจ เนื่องจากการที่อีวีเอเปลี่ยนเป็นสีเหลืองถูกสังเกตพบมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1979 เมื่ออีวีเอบนแผ่นโลหะเงินเริ่มออกสีเหลืองอ่อนๆ หลังจากทดสอบเป็นเวลา 2 วัน ภายใต้แสงอาทิตย์เทียมเครื่องที่ใช้หลอดไฟอาร์กแบบ Xe ขนาด 6000 W อุณหภูมิ 70°C และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% [40] นอกจากนี้มีการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก 12.7 ซม. × 21 ซม. ซึ่งเซลล์ถูกหุ้มด้วยอีวีเอ เมื่อนำไปทดสอบภายใต้หลอดกำเนิดรังสียูวี RS-4 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 85°C รวมทั้งทดสอบภายใต้เครื่องปฏิบัติการเร่งทางอุณหภูมิและทางแสงยูวี ที่อุณหภูมิ 70°C, 90°C และ 105°C [41] พบว่าอีวีเอเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะการเร่งทางอุณหภูมิและทางแสงยูวีที่เพิ่มขึ้น และไม่นานนี้มีการรายงานโดย Michael D. Kempe [41] ว่าการเสื่อมสภาพของวัสดุพอลิเมอร์ที่หุ้มแผงภายใต้แสงยูวี ยังส่งผลต่อการสูญเสียการยึดเกาะติดที่ผิวเชื่อมต่อระหว่างกระจกกับวัสดุพอลิเมอร์อีกด้วย สำหรับกลไกการเสื่อมสภาพของอีวีเอจากรังสียูวีและอุณหภูมิในรูปของแผนภาพทางเคมีเบื้องต้นมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก

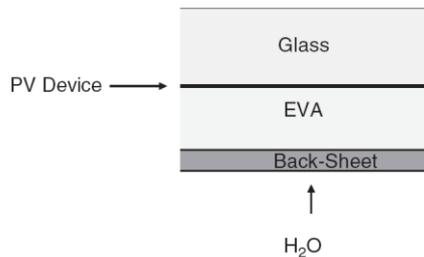
### 2.4.2 การแทรกความชื้นเข้าแผง

ด้านการเสื่อมสภาพของวัสดุไดอิเล็กตริกจากการแทรกตัวของความชื้นสู่แผง มีการวิจัยและการวัดผลการแพร่กระจายตัวของน้ำผ่านเข้าอีวีเอเพียงอย่างเดียว [43] มีการวัดอัตราการส่งผ่านไอน้ำชั่วคราว (Transient Water Vapor Transmission Rate, WVTR) ได้ข้อมูลเกี่ยวกับระยะเวลาของน้ำแพร่กระจายผ่านวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการวัดอัตราการส่งผ่านไอน้ำชั่วคราวผ่านอีวีเอหนา 2.84 มม. พบว่าในช่วงเริ่มต้น 10 นาทีแรก อัตราการส่งผ่านไอน้ำชั่วคราวมีค่าน้อยมาก แต่หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัวของ WVTR (Steady State WVTR) เราสามารถนำค่า WVTR ในช่วงนี้ ไปหาความเข้มข้นอิ่มตัวของน้ำ (Water Saturation Concentration) และคำนวณหาการแทรกซึมของความชื้นในแบบจำลองของแผงได้

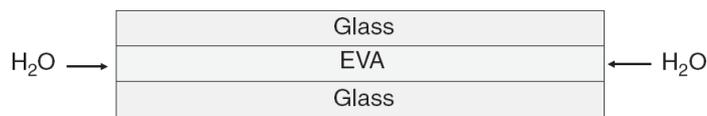


รูปที่ 2.20 อัตราการส่งผ่านไอน้ำชั่วคราว WVTR ผ่านอีวีเอหนา 2.84 มม. ที่อุณหภูมิ 85°C [43]

นอกจากนี้มีการวิจัยการแทรกเข้าของความชื้น ด้วยการสร้างแบบจำลองของจนวนหุ้มฉนวนสองแบบ คือ แบบจำลองการแทรกเข้าของความชื้นผ่านแผ่นปิดหลังดังแสดงในรูปที่ 2.21 และแบบจำลองการแทรกเข้าของความชื้นทางด้านข้างแสดงดังรูปที่ 2.22

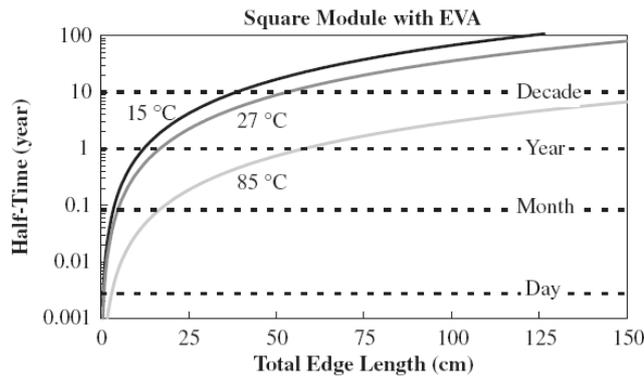


รูปที่ 2.21 แบบจำลองของแผงซึ่งมีแผ่นปิดด้านหลังแบบ Breathable [43]



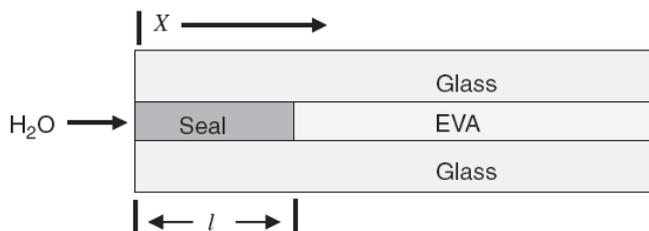
รูปที่ 2.22 แบบจำลองของแผงซึ่งมีแทรกเข้าของความชื้นทางด้านข้าง [43]

จากการวิเคราะห์โดยองค์ประกอบแบบไฟไนท์เอเลเมนต์ ด้วยข้อมูลบรรยากาศจากหลายแห่ง เช่น ไมอะมิ ฟลอริดา ทำให้ทราบว่าเนื่องจากค่าการแพร่กระจายสูง (High Diffusivity) ของอีวีเอ แม้ว่าน้ำไม่สามารถซึมเข้ากระจกและแผ่นปิดหลังได้ แต่ความชื้นแทรกเข้าจากด้านขอบได้ในช่วงอายุการใช้งาน 20-30 ปี ดังแสดงในรูปที่ 2.23 เป็นการแทรกเข้าของความชื้นด้านขอบสู่กึ่งกลางแผง ที่อุณหภูมิ 15, 27 และ 85°C ตามลำดับ ทั้งนี้แบบจำลองของแผงมีลักษณะเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส มีแผ่นปิดด้านหน้ากับด้านหลังเป็นกระจกและมีอีวีเออยู่ตรงกลาง

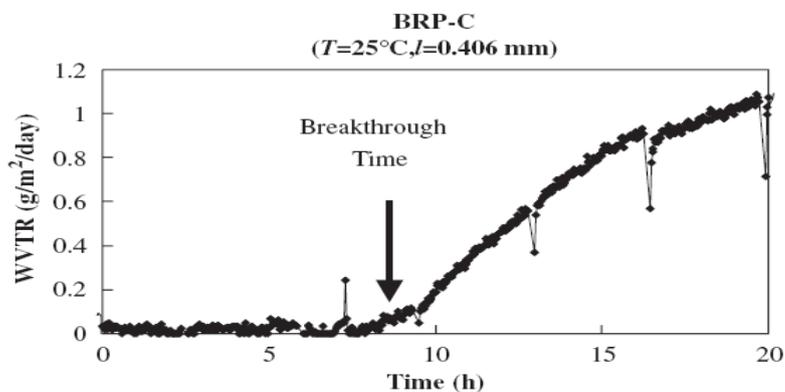


รูปที่ 2.23 การแทรกเข้าทางความชื้นจากทางด้านขอบสู่กึ่งกลางแผงที่อุณหภูมิต่างๆ [43]

ความชื้นที่แทรกซึมแผงสามารถกลั่นตัว และเพิ่มอัตราการกัดกร่อน การลดความชื้นแทรกตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องมีการปิดผนึกให้แน่นหนาอย่างแท้จริง (True Hermetic Seal) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยการใช้วัสดุหุ้มผนึกที่แห้งแล้ว หรือใช้วัสดุหุ้มผนึกที่มีค่าการแพร่กระจายต่ำ



รูปที่ 2.24 แผนภาพขอบแผงที่มีกาวผนึกขอบแผงซึ่งกาวนี้ต้องยอมให้น้ำซึมเข้าไปได้น้อยมาก [43]



รูปที่ 2.25 WVTR ชั่วครู่กับเวลาที่ใช้ในเจาะทะลุแนวหุ้มผนึกขอบสำหรับวัสดุ BRP-C [43]

การพิจารณาว่าวัสดุต่างๆ มีประสิทธิภาพในการใช้ผนึกขอบแผงได้แค่ไหนนั้น ประเมินได้ด้วยวัดเวลา กับปริมาณความชื้นเริ่มแทรกผ่านเยื่อแก้วผนึกขอบในเทอมของ WVTR ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งวัสดุตัวอย่างหุ้มผนึกขอบชื่อ BRP-C ซึ่งผลิตโดยบริษัท BRP

โดยสรุป การวิจัยเกี่ยวกับลักษณะและกลไกการเสื่อมสภาพของแผงที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.3 และ 2.4 แสดงได้ในตารางที่ 2.6

**ตารางที่ 2.6** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะและกลไกการเสื่อมสภาพของแผง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการเสื่อมสภาพของแผง		วิธีการวิจัย	ผลการวิจัย
ลักษณะการเสื่อมสภาพ	ความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ถ่ายภาพแผงในช่วงแสงอินฟราเรด [17, 33]</li> <li>- ถ่ายภาพการเรืองแสงทางไฟฟ้า [33]</li> <li>- หาคุณลักษณะ I-V ของแผงที่ STC [33]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทราบตำแหน่งจุดร้อนบนแผง [17, 33]</li> <li>- พบการหลุดร่อนและการเปลี่ยนสีของอีวีเอ [17]</li> <li>- พบรอยแตกรอยร้าวขนาดเล็ก [33]</li> <li>- คุณลักษณะ I-V ของแผงมีค่าลดลง [33]</li> </ul>
	การเปลี่ยนสีของวัสดุหุ้มผนึก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รวบรวมแผงที่มีการเปลี่ยนสี [17, 34, 39]</li> <li>- วัดและเปรียบเทียบคุณลักษณะ I-V ที่ STC ของแผงสีขาวและแผงสีเหลือง [17]</li> <li>- วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ STC ของแผงซึ่งเปลี่ยนสีเทียบกับค่าที่โฆษณา [34]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พบตัวหุ้มผนึกโพลีไวนิลบิวทิล-พีวีบีกลายเป็นสีเหลือง [17] และ อีอีล-ไวนิล-อะซิเตทกลายเป็นสีเหลือง-น้ำตาล [17, 34, 39]</li> <li>- พบคุณลักษณะ I-V และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อเกิดการเปลี่ยนสี [17, 34]</li> </ul>
	การหลุดร่อนของอีวีเอจากความชื้น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สังเกตการหลุดร่อนจากความชื้น แทรกเข้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Edge-defined Film-fed Growth นาน 30 เดือน [35, 36]</li> <li>- วัดและเปรียบเทียบคุณลักษณะ I-V และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ STC ของแผงในช่วงก่อนและหลังเกิดการหลุดร่อน [36]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พบการหลุดร่อนจากความชื้นแทรกเข้าที่บริเวณมุมหรือขอบแผงถ้าเข้าหาเซลล์เพิ่มขึ้น [35, 36]</li> <li>- พบคุณลักษณะ I-V และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อเกิดความชื้นแทรกเข้าที่บริเวณมุมหรือขอบแผง [35, 36]</li> </ul>
กลไกการเสื่อมสภาพ	การเสื่อมสภาพของอีวีเอจากรังสียูวีและอุณหภูมิ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทดสอบอีวีเอหุ้มแผ่นโลหะเงิน ภายใต้แสงอาทิตย์เทียมที่ใช้หลอดไฟอาร์กแบบ Xe ขนาด 6000 W อุณหภูมิ 70°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% [40]</li> <li>- ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ที่หุ้มด้วยอีวีเอ ภายใต้หลอดกำเนิดรังสียูวี RS-4 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 85°C, 70°C, 90°C และ 105°C [41]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พบอีวีเอเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้น ภายใต้สภาวะการเร่งทางอุณหภูมิและทางแสงยูวีที่เพิ่มขึ้น [40, 41]</li> <li>- พบว่ารังสียูวีและอุณหภูมิส่งผลต่อการสูญเสียการยึดเกาะยึดที่ผิวเชื่อมต่อระหว่างกระจกกับวัสดุพอลิเมอร์ [41]</li> </ul>
	การแทรกความชื้นเข้าแผง [43]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัดอัตราการส่งผ่านไอน้ำผ่านอีวีเอ หนา 2.84 มม. ที่อุณหภูมิ 85°C</li> <li>- วัดอัตราการแทรกเข้าของความชื้น ผ่านกระจกและแผ่นปิดหลัง</li> <li>- จำลองการแทรกเข้าของความชื้น ผ่านอีวีเอ ด้านขอบสู่กึ่งกลางแผง ที่อุณหภูมิ 15, 27 และ 85°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อัตราการส่งผ่านไอน้ำผ่านอีวีเอ มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น</li> <li>- น้ำไม่สามารถซึมผ่านกระจกและแผ่นปิดหลังได้</li> <li>- จากการจำลองความชื้นแทรก สามารถแทรกเข้าอีวีเอจากด้านขอบได้ในระหว่างการใช้งาน 20-30 ปี</li> <li>- วัสดุหุ้มผนึกขอบ BRP-C สามารถลดอัตราการส่งผ่านไอน้ำด้านขอบแผงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นได้</li> </ul>

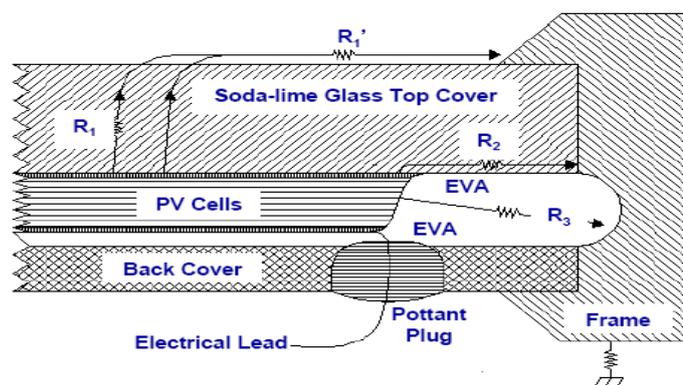
## 2.5 การเสื่อมสภาพที่มีผลต่อการฉนวนของแผง

การเสื่อมสภาพของของวัสดุหุ้มฉนวนแผง ทำให้โครงสร้าง โมเลกุลและสมบัติของวัสดุหุ้มฉนวนเปลี่ยนแปลงไป สมบัติด้านไฟฟ้าที่สำคัญเปลี่ยนไปด้วยเช่น ค่าสภาพต้านทานของฉนวน ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก ตัวประกอบการสูญเสีย และค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวน เป็นต้น หากค่าความเป็นฉนวนน้อยลง อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยทางวงจรไฟฟ้าของแผงและเกิดอันตราย

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงงานวิจัยด้านสมบัติด้านไดอิเล็กตริกของวัสดุหุ้มฉนวนแผง ทั้งที่ยังไม่เสื่อมสภาพและเสื่อมสภาพแล้ว เพื่อเป็นพื้นฐานในการวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็กตริกโดยการประยุกต์สนามไฟฟ้า สำหรับการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายแผง ในหัวข้อถัดไป

### 2.5.1 การเสื่อมสภาพที่มีผลต่อค่าความต้านทานของฉนวนของแผง

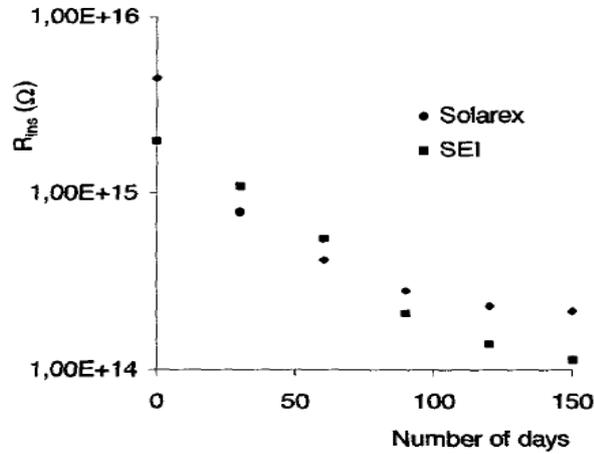
การเสื่อมสภาพในแผงจากการใช้งานกลางแจ้ง ทั้งแสงอาทิตย์ ความร้อน และความชื้นที่อุณหภูมิสูง ทำให้ความชื้นแทรกซึมเข้าแผง เกิดกระแสรั่วไหลส่วนต่างๆซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าต่างกัน ตั้งแต่ความต้านทานของเนื้อฉนวนกระจกกรอบบน ( $R_1$ ) ร่วมกับค่าความต้านทานที่ผิวของกระจกไปยังโครง ( $R_1'$ ) ความต้านทานผิวฉนวนระหว่างฉนวนหุ้มเซลล์กับกระจก ( $R_2$ ) และความต้านทานเนื้อฉนวนอีวีเอที่หุ้มแผงเซลล์ไว้ทั้งหมด ( $R_3$ ) ดังรูปที่ 2.26 เมื่อมีกระแสรั่วไหลผ่าน กระแสจะเสริมปฏิกิริยาเคมีซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ [44]



รูปที่ 2.26 กระแสรั่วไหลผ่านค่าความต้านทานของเนื้อฉนวนในส่วนต่างๆ [44]

มีตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความต้านทานของวัสดุหุ้มแผงสองชนิด ในเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ใช้แรงดันป้อนเข้า 500 โวลต์ ในวันเริ่มทดลองที่วัสดุ

หุ้มแผงยังไม่เสื่อมสภาพ จนวัสดุหุ้มเสื่อมสภาพซึ่งใช้เวลาทั้งสิ้น 150 วัน ผลการวัดค่าดังในรูปที่ 2.27 จะเห็นว่าค่าความต้านทานของวัสดุหุ้มแผงลดลง หลังจากถูกทำให้เสื่อมสภาพไปแล้ว [44]



รูปที่ 2.27 ค่าความต้านทานของวัสดุหุ้มแผงสองชนิด [45]

### 2.5.2 การเสื่อมสภาพของอีวีเอที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริก

มีการศึกษาสมบัติกายภาพและเคมีของอีวีเอตั้งแต่กระบวนการบ่มตามมาตรฐานเพื่อใช้ในการหุ้มฉนวน กระบวนการในช่วงหุ้มฉนวน และวางอีวีเอไว้กลางแจ้งในทะเลทรายซาฮาราประเทศแอลจีเรียเป็นเวลา 8 ปี [10] หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างอีวีเอมาวัดความจุเจล (Gel Content) เพื่อหาว่าอีวีเอที่ถูกบ่มหุ้มฉนวนก่อนและหลังการนำไปไว้กลางแจ้งแสงธรรมชาตินั้น มีการเสื่อมสภาพมากน้อยเพียงใด ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลการวัดปริมาณความจุเจลของอีวีเอก่อนและหลังนำอีวีเอไปไว้กลางแจ้ง [10]

ชิ้นตัวอย่าง	ก่อนไปไว้กลางแจ้ง	หลังไปไว้กลางแจ้ง
ปริมาณเจลสุทธิ (%)	88.5	87.4

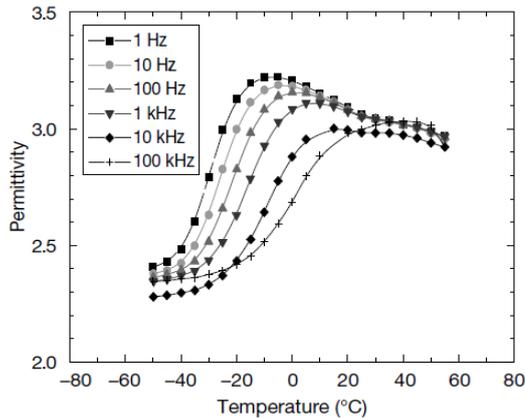
จากตารางที่ 2.7 แม้ว่าปริมาณความจุเจลของอีวีเอมีค่าแตกต่างกันระหว่างก่อนและหลังนำอีวีเอไปไว้กลางแจ้ง 8 ปี แต่ความจุเจลที่สามารถยอมรับได้ต่ำสุดอยู่ที่ 65% ตามที่ Springbron Laboratory ได้แนะนำไว้ จึงถือว่าอีวีเอยังไม่มีผลการเสื่อมสภาพที่เห็นได้อย่างชัดเจนมากนัก

มีการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริกด้วยสภาพต้านทานไฟตรง (Electrical Resistivity,  $\rho$ ) สภาพยอมสัมพัทธ์ที่ความถี่ 50 Hz (Relative Permittivity,  $\epsilon_r$ ) และตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อน

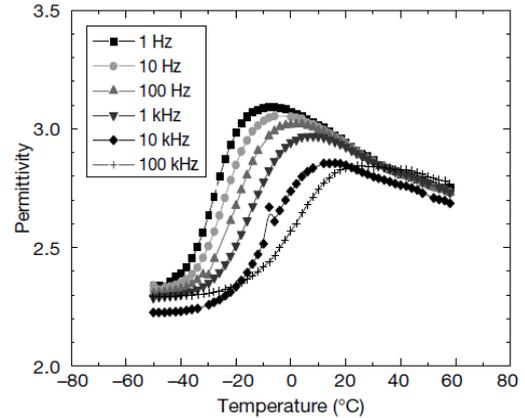
(Dissipation Factor,  $\text{tg } \delta$ ) ที่ความถี่ 50 Hz พบว่าหลังผ่านการนำไปไว้กลางแจ้ง สภาพต้านทานไฟตรงและสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าลดลง แต่ตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างอีวีเอที่ถูกบ่มหุ้มฉนวนก่อน และหลังการนำไปไว้ภายใต้แสงอาทิตย์ตามธรรมชาติ นั้น มีผลการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างผลการทดสอบทางไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 25°C [10]

สมบัติทางไดอิเล็กตริกของอีวีเอ	$\rho$ ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	$\epsilon_r$	$\text{tg } \delta$
ก่อน นำไปไว้กลางแจ้ง	$1.7 \times 10^{13}$	2.6	$0.3 \times 10^{-2}$
หลัง นำไปไว้กลางแจ้ง	$1.4 \times 10^{13}$	2.58	$9 \times 10^{-2}$



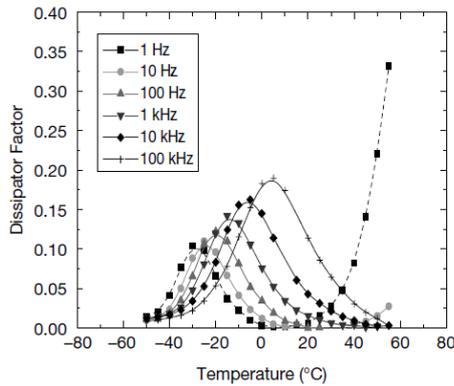
(ก) ก่อนไปไว้กลางแจ้ง



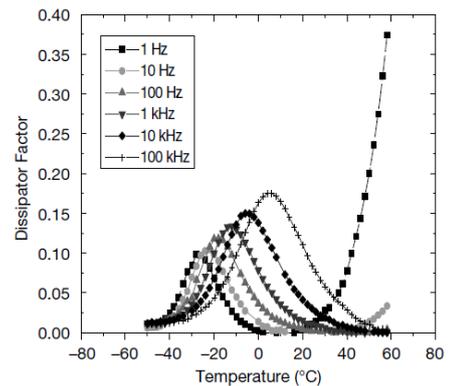
(ข) หลังไปไว้กลางแจ้ง

รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงของสภาพยอมสัมพัทธ์ของอีวีเอที่ผ่านการบ่มแล้ว [10]

ผลการทดสอบสภาพยอมสัมพัทธ์และตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กตริก ตั้งแต่ อุณหภูมิ -50°C ถึง 60°C ที่ความถี่ 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz และ 100 kHz แสดงดังรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 ตามลำดับ พบว่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของอีวีเอหลังผ่านการนำไปไว้กลางแจ้งมีค่าลดลง ส่วนตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนระหว่างก่อนและหลังผ่านการนำไปไว้กลางแจ้งแตกต่างกันอย่างมาก



(ก) ก่อนไปไว้กลางแจ้ง



(ข) หลังไปไว้กลางแจ้ง

รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของอีวีเอที่ผ่านการบ่มแล้ว [10]

## 2.6 แบบจำลองสายส่งสำหรับสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

องค์ประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันผ่านแถบตัวนำ ฉนวนหุ้มฉนวน และสายไฟ สามารถพิจารณาในรูปแบบของแบบจำลองของสายส่งที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ [47]

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการหาตำแหน่งที่เสียหาย (Fault Location) ในแผงแสงอาทิตย์รวมทั้งลานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแผงเซลล์ต่อเรียงกันเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้ทดสอบจ่ายพัลส์ไฟฟ้า (Electrical Pulse) เข้าไปในแผง สัญญาณพัลส์นี้แพร่กระจายผ่านแถบตัวนำของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์ที่ต่อเรียงกัน ดังนั้นแถบตัวนำและไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในแผง จึงถูกมองเหมือน Component ของสายส่งไฟฟ้า (Transmission Line) ซึ่งต้องพิจารณาทั้งแถบตัวนำต่างๆ กับโครงแผงและระหว่างแถบตัวนำเอง

### 2.6.1 แบบจำลองสายส่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ติดกับโครงขอบแผง

แบบจำลองสมมูลสำหรับแถบตัวนำบนเซลล์ที่อยู่ติดกับโครงแผง ในเบื้องต้นพิจารณาส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วนคือ ส่วนที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำกับโครงขอบแผง ส่วนที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำของตัวเอง และส่วนที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำกับกราวด์ดังรูปที่ 2.30 (ก)

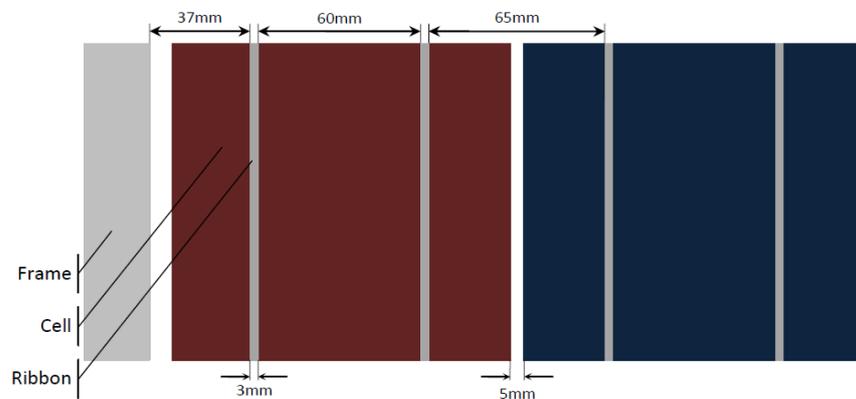
จากรูปที่ 2.30 (ข) พิจารณาได้ดังนี้

ก) ส่วนที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำกับโครงแผงเป็นฉนวนหุ้มฉนวนแผงซึ่งประกอบด้วย กระจก อีวีเอ และแผ่นเทคดาร์ จึงถูกแทนด้วยค่าเก็บประจุสมมูลที่แถบตัวนำกับโครงแผง ( $C_{meplat-cadre}$ ) และค่าความนำสมมูลที่แถบตัวนำกับโครงแผง ( $G_{meplat-cadre}$ ) ต่อขนานกัน

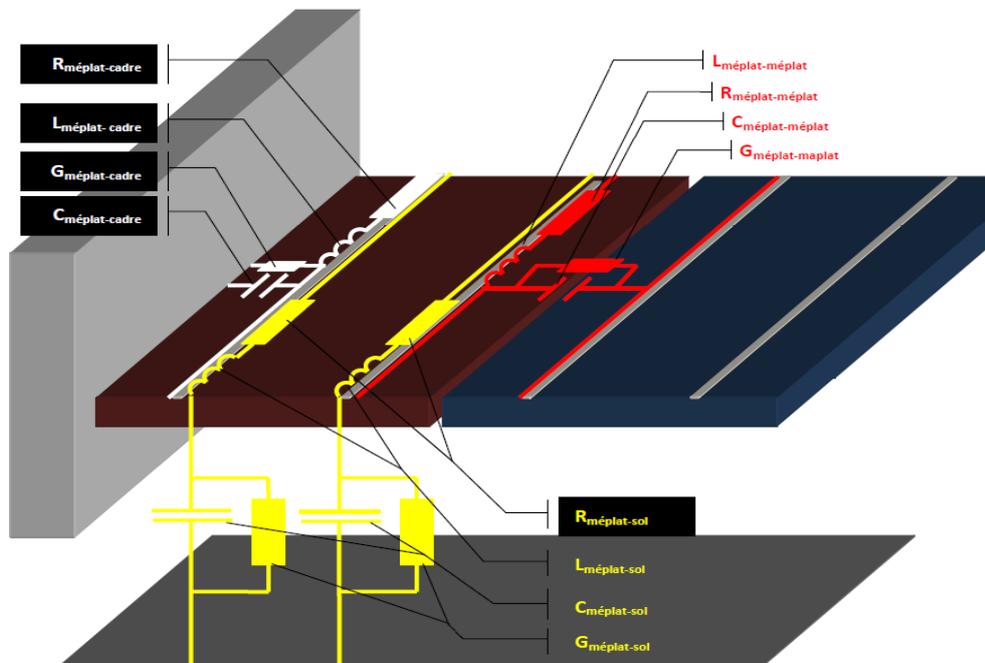
ข) แถบตัวนำโลหะบนเซลล์ด้านหน้าถูกแทนด้วยค่าความต้านทาน ( $R_{\text{meplat-cadre}}$ ) และค่าความเหนี่ยวนำ ( $L_{\text{meplat-cadre}}$ ) ต่ออนุกรมกัน

ค) ในทำนองเดียวกัน แถบตัวนำโลหะบนเซลล์ด้านหลังถูกแทนด้วยค่าความต้านทาน ( $R_{\text{meplat-sol}}$ ) และค่าความเหนี่ยวนำ ( $L_{\text{meplat-sol}}$ ) ต่ออนุกรมกัน โดยมีค่าเก็บประจุสมมูลที่แถบตัวนำกับกราวด์ ( $C_{\text{meplat-sol}}$ ) และค่าความนำสมมูลที่แถบตัวนำกับกราวด์ ( $G_{\text{meplat-sol}}$ ) ต่อขนานกัน

ง) นอกจากนั้น ยังต้องพิจารณา แถบตัวนำโลหะด้านข้างระหว่างเซลล์กับเซลล์ ซึ่งถูกแทนด้วยค่าความต้านทาน ( $R_{\text{meplat-meplat}}$ ) และค่าความเหนี่ยวนำ ( $L_{\text{meplat-meplat}}$ ) ต่ออนุกรมกัน โดยฉนวนที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำของเซลล์ที่อยู่ข้างๆ ระหว่างเซลล์ทั้งสองนี้ ถูกแทนด้วยค่าเก็บประจุสมมูลที่แถบตัวนำกับแถบนำ ( $C_{\text{meplat-meplat}}$ ) และค่าความนำสมมูลที่แถบตัวนำกับแถบตัวนำ ( $G_{\text{meplat-meplat}}$ ) ต่อขนานกัน



(ก) เซลล์แสงอาทิตย์สองเซลล์กับโครงแผง



(ข) องค์ประกอบต่างๆ ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงแผง รูปที่ 2.30 แบบจำลองสมมูลสำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกับโครงแผง [47]

หากพิจารณาวัสดุฉนวนในรูปของความนำสมมูล  $G$  สามารถหาค่าความนำสมมูลได้จาก

$$G = \frac{\sigma A}{l} \quad [\text{S}] \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือสภาพความนำจำเพาะของฉนวน  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโตรด

สำหรับค่าเก็บประจุสมมูล  $C$  ระหว่างอิเล็กโตรดของฉนวน โดยทั่วไปพิจารณาจาก

$$C = \varepsilon \frac{A}{l} \quad [\text{F}] \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ สภาพยอมของวัสดุฉนวน

ค่าความต้านทานสมมูลของแถบตัวนำโลหะ ( $R_{\text{meplat}}$ ) บริเวณต่างๆ ถูกกำหนดโดยสูตร

$$R_{\text{meplat}} = \frac{\rho \ell}{A_c} \quad [\Omega] \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ สภาพต้านทานจำเพาะของตัวนำ,  $\ell$  คือ ความยาว และ  $A_c$  คือพื้นที่หน้าตัด

ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลระหว่างสายส่งตัวนำ ( $L_{\text{meplat}}$ ) สองเส้นวางขนานกัน โดยพื้นฐานพิจารณาเป็นตัวนำกลมตันมีรัศมีเท่ากับ  $r$  วางห่างกันเท่ากับ  $D$  หาได้จาก

$$L_{\text{meplat}} = 4 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad [\text{H/m}] \quad (2.4)$$

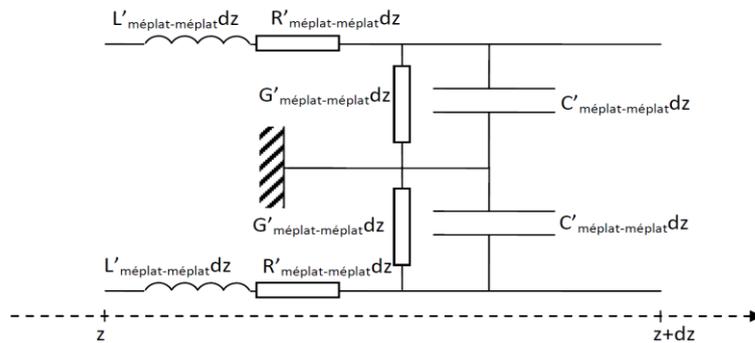
ค่าเก็บประจุสมมูลที่แถบตัวนำกับแถบนำ ( $C_{\text{meplat-meplat}}$ ) สองเส้นวางขนานกัน โดยพื้นฐานพิจารณาเป็นตัวนำกลมตันมีรัศมีเท่ากับ  $r$  วางห่างกันเท่ากับ  $D$  หาได้จาก

$$C_{\text{meplat-meplat}} = \frac{\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad [\text{F/m}] \quad (2.5)$$

และค่าเก็บประจุสมมูลที่แถบตัวนำกับกราวด์ ( $C_{\text{meplat-sol}}$ ) คิดเป็น 2 เท่าของ ค่าเก็บประจุสมมูลที่แถบตัวนำกับแถบนำ ( $C_{\text{meplat-meplat}}$ ) สองเส้นวางขนานกันนั่นคือ

$$C_{\text{meplat-sol}} = \frac{2\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad [\text{F/m}] \quad (2.6)$$

ดังนั้นแบบจำลองสมมูลสำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกับโครงแผงของรูปที่ 2.30 สามารถเขียนเป็นวงจรสายส่งที่กระจาย (Distribution Line) ตามองค์ประกอบระยะทางของสายส่ง  $dz$  ได้ดังรูปที่ 2.31

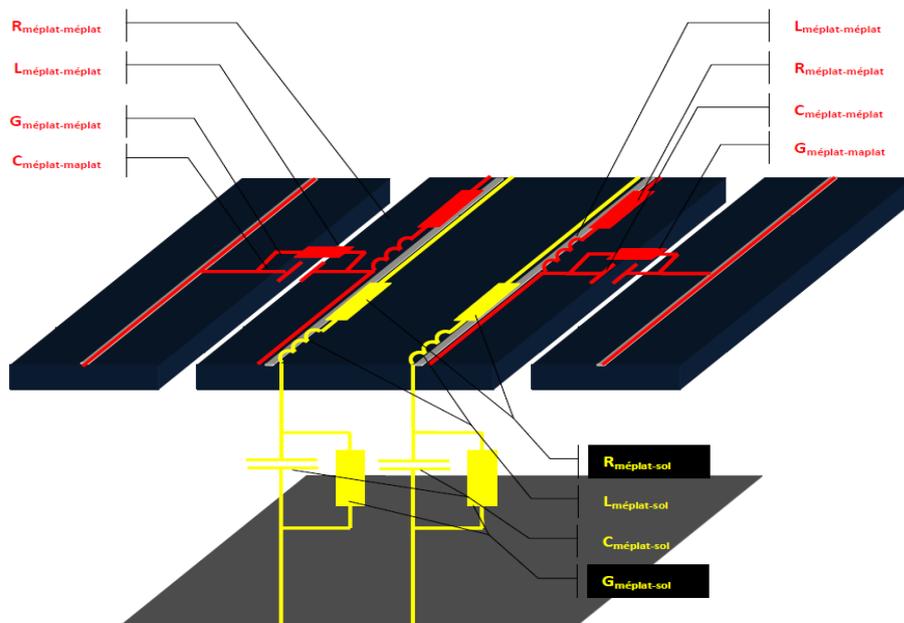


รูปที่ 2.31 แผนภาพวงจรสายส่งที่กระจายตามองค์ประกอบระยะทางของสายส่งความยาว  $dz$  สำหรับแบบจำลองสมมูลสำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกับโครงแผง [47]

### 2.6.2 แบบจำลองสายส่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ระหว่างเซลล์

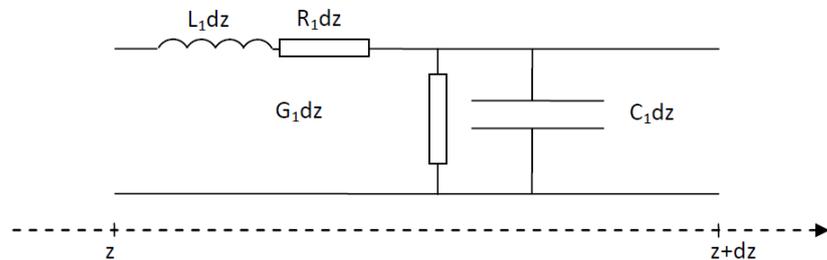
ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ระหว่างเซลล์สองข้าง โครงแผงไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นจึงเหลือเพียงแถบตัวนำด้านหน้าแผงและด้านหลังแผง รวมทั้งฉนวนระหว่างเซลล์ด้านหน้าแผงและฉนวนระหว่างเซลล์ด้านหลังกับกราดที่ถูกนำมาพิจารณา

แบบจำลองสายส่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ระหว่างเซลล์ทั้งสอง ถูกแทนด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แบบจำลองสมมูลด้วยองค์ประกอบต่างๆ ทางไฟฟ้าสำหรับบริเวณเซลล์กับเซลล์ [47]

แบบจำลองสมมูลบริเวณเซลล์กับเซลล์ในรูปที่ 2.32 สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสายส่งที่กระจายตามองค์ประกอบระยะทางของสายส่งความยาว  $dz$  ได้ดังรูปที่ 2.33 โดย  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $G_1$  และ  $C_1$  แทนองค์ประกอบ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำ ค่าความต้านทานของตัวนำ ค่าความนำของฉนวนและค่าความจุของฉนวนระหว่างตัวนำ ตามลำดับ



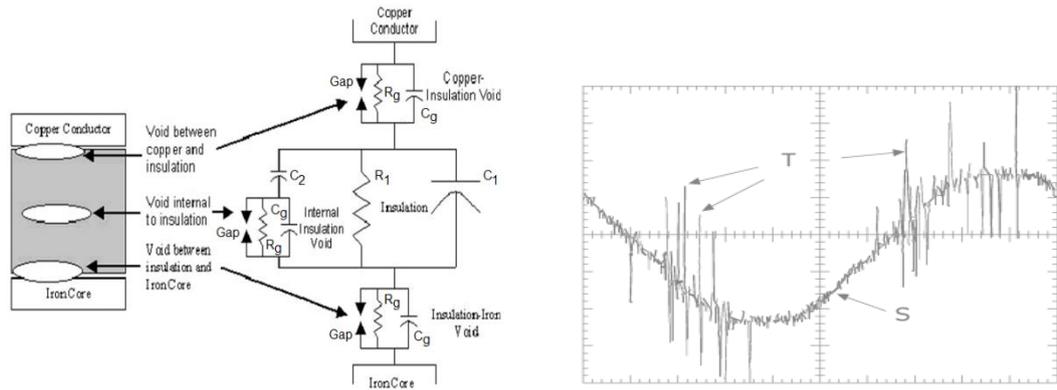
รูปที่ 2.33 แผนภาพวงจรสายส่งที่กระจายตามองค์ประกอบระยะทางของสายส่งความยาว  $dz$  สำหรับแบบจำลองสมมูลสำหรับบริเวณเซลล์กับเซลล์ [47]

### 2.6.3 แบบจำลองการปล่อยประจุภายในโพรงฉนวนก๊าซ

การปล่อยประจุภายในฉนวนไดอิเล็กตริก (เช่น อีวีเอ) ที่ห่อหุ้มเซลล์เกิดขึ้น เพราะมีไดอิเล็กตริกอื่นที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปนอยู่ เช่น ฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวน หรือที่เขตต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรด โพรงก๊าซจะเสียดสภาพ (Breakdown) นั้บพลันที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวนของแข็ง เพราะโพรงก๊าซมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำกว่าเนื้อฉนวนของแข็ง ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงจะมีค่าสูงกว่าในฉนวน จึงเกิดการเสียดสภาพนั้บพลันในโพรงก่อน ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้นระหว่างขบวนการเตรียมเช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์ หรือกระบวนการชุบน้ำยาฉนวน เป็นต้น

พิจารณาแบบจำลองวงจรไฟฟ้าของฉนวนที่ล้อมอยู่ระหว่างตัวนำ 2 ตัว โดยมีโพรงก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวน ดังรูปที่ 2.34 ถ้าแบ่งพิจารณาฉนวนเป็น 3 ส่วน โดย  $R_g$ ,  $C_g$  และช่อง Gap แทนความต้านทาน ความเก็บประจุของโพรงก๊าซและการปล่อยประจุบางส่วนในช่อง Gap ส่วน  $C_2$  เป็นความเก็บประจุของเนื้อฉนวนที่ต่ออันดับกับโพรงก๊าซ สำหรับ  $R_1$  และ  $C_1$  แทนค่าความเก็บประจุเนื้อฉนวนที่เหลือ

เนื่องจากโพรงก๊าซอาจเกิดขึ้นได้หลายบริเวณดังรูปที่ 2.34 (ก) เมื่อจ่ายแรงดันระหว่างฉนวนจนค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความคงทนต่อแรงดันเสียดสภาพนั้บพลันของโพรงก๊าซ ทำให้เกิดการเสียดสภาพนั้บพลันขึ้นเรียกว่า ค่าแรงดันการปล่อยประจุเริ่มต้น



(ก) โพรจนวนของแข็งบริเวณต่างๆ (ข) ตัวอย่างรูปคลื่นที่เกิดจากการปล่อยประจุบางส่วน  
**รูปที่ 2.34** ตัวอย่างแบบจำลองโพรงในฉนวนของแข็งและการปล่อยประจุบางส่วนในฉนวน [46]

ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่จ่ายกับผลการปล่อยประจุบางส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.34 (ข) เมื่อเกิดเสียดสภาพฉนวนปล้นขึ้นครั้งแรกขึ้นที่โพรงก๊าซ ค่าแรงดันเสียดสภาพฉนวนปล้นที่คร่อมโพรงก๊าซจะกลายเป็นศูนย์ เมื่อแรงดันเป็นศูนย์ทำให้การสปาร์คดับลง ค่าแรงดันที่คร่อมอยู่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และเกิดเสียดสภาพฉนวนปล้นอีกครั้ง กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำๆ และได้คลื่นปลายแหลมขนาดเล็กหลายลูกคลื่นทั้งซีกบวกและซีกลบ เกิดที่ความถี่หลายร้อยเมกะเฮิร์ตซ์ซ้อนทับกับแรงไฟฟ้ากระแสสลับ คลื่นปลายแหลมนี้มีลักษณะเฉพาะที่เรียกว่าความถี่สัญญาณ (Ringing Frequency) เกิดขึ้นเป็นห้วงๆ

## 2.7 การตรวจสอบแฉงที่เกิดการเสื่อมสภาพ

พื้นฐานด้านการตรวจสอบ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักที่สำคัญคือ

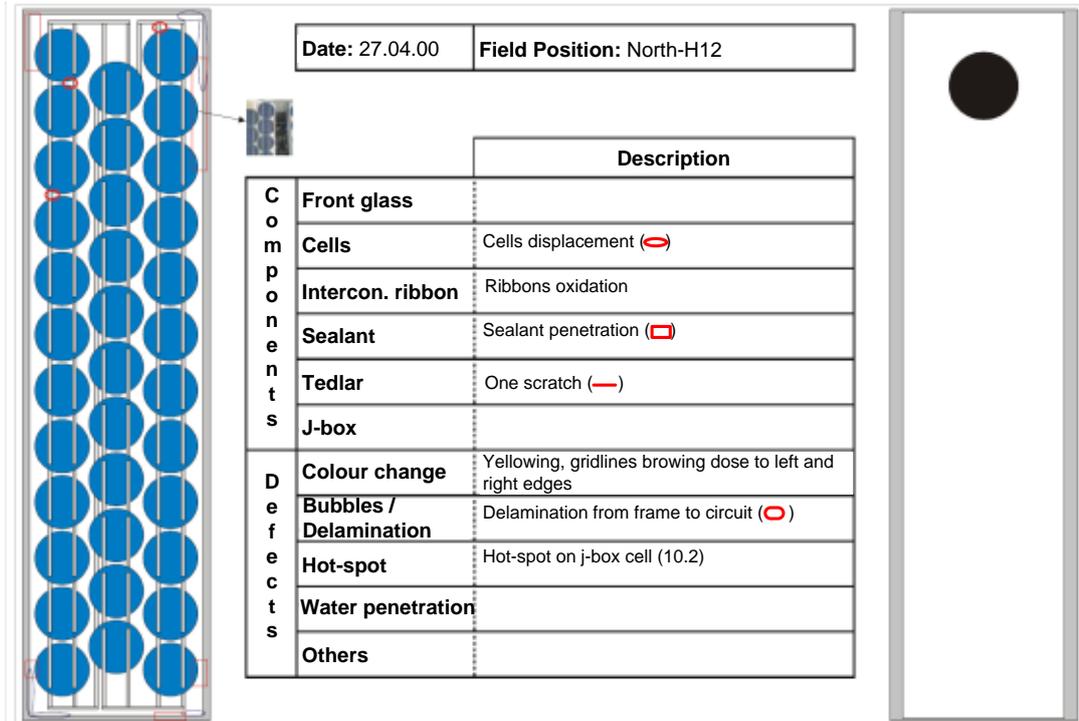
- (1) การตรวจสอบการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับแฉงโดย (i) การสังเกตลักษณะการเกิดการเสื่อมสภาพภายนอกด้วยตา (ii) การทดสอบหาสมรรถนะทางไฟฟ้าของแฉง (iii) การทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวนหุ้มแฉง และ (iv) การทดสอบฉนวนของแฉงด้วยแรงดันอิมพัลส์
- (2) การตรวจสอบโดยการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริกที่เกิดการเสื่อมสภาพโดย (i) การวัดหาค่าสภาพต้านทาน (ii) ค่าไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องและที่แปรตามความถี่กับอุณหภูมิ

### 2.7.1 การสังเกตลักษณะการเสื่อมสภาพด้วยภายนอกด้วยตา

ในการตรวจสอบแฉงด้วยการสังเกตภายนอก จดบันทึกความผิดปกติต่างๆ ลงในแบบบันทึก ดังรูปที่ 2.35 มีส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาอยู่ 2 ส่วนคือ

- (1) องค์ประกอบต่างๆ ของแฉง ได้แก่ กระจกด้านหน้า เซลล์ แถบตัวนำ ฉนวนหุ้มฉนวนเทลดาร์ และกล่องต่อสาย

(2) ความผิดปกติต่างๆ ได้แก่ การเปลี่ยนสี ฟองอากาศหรือการลอกกร่อน จุดร้อน น้ำซึมเข้า และอื่นๆ

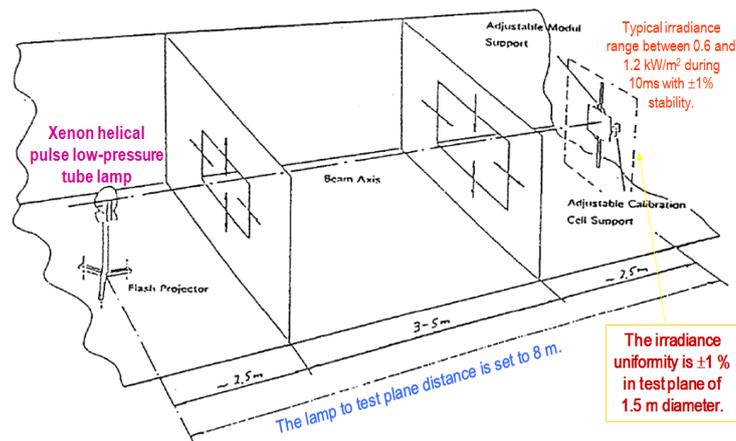


รูปที่ 2.35 ตัวอย่างแบบฟอร์มการจดบันทึกผลการตรวจสอบด้วยการสังเกตภายนอกด้วยตา [17]

### 2.7.2 การทดสอบหาสมรรถนะทางไฟฟ้าจากแผงที่เกิดการเสื่อมสภาพ

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61215 ในหัวข้อที่ 10.6 เงื่อนไขการทดสอบที่สภาวะทดสอบมาตรฐานคือ มีอุณหภูมิของแผงที่ 25°C ความเข้มของรังสีตกกระทบ 1000 W.m<sup>-2</sup> ที่มวลอากาศ Air Mass 1.5 [48] ภายใต้แสงธรรมชาติหรือภายใต้แสงอาทิตย์เทียมระดับ A ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60904-3 (1989)

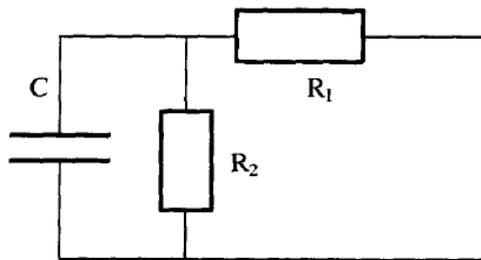
กรณีที่ใช้ห้องทดสอบเพื่อวัด I-V Curve ของแผง ใช้ระบบแสงอาทิตย์เทียมแบบพัลส์ (Pulsed Solar Simulator) ห้องทดสอบเป็นห้องมืดที่มีม่านสีดำหรือฉากสีดำอยู่ในตำแหน่งระหว่างหลอดกับระนาบทดสอบ เพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อนแสงดังรูปที่ 2.36 การหา I-V Curve แต่ละกรณี มีการเปลี่ยนแปลงโหลดตั้งแต่ลัดวงจรจนถึงเปิดวงจรใช้เวลา 1/100 วินาที ความเข้มแสงมีเสถียรภาพ ±1%



รูปที่ 2.36 ตัวอย่างห้องมืดของยี่ห้อ Pasan สำหรับการวัด I-V Curve ของแผง [49]

### 2.7.3 การทดสอบหาความต้านทานของแผงที่เกิดการเสื่อมสภาพ

การวัดของวัสดุหุ้มแผงซึ่งมีสภาพเป็นฉนวนสูง เมื่อเราต้องการวัดค่าความต้านทานของฉนวนหุ้มแผงเซลล์ จะต้องลัดวงจรแผงเซลล์ทั้งสองขั้วเข้าด้วยกันเป็นหนึ่งอิเล็กโทโรด และให้โครงเหล็กของตัวแผงเป็นอีกหนึ่งอิเล็กโทโรด ฉนวนอีวีเอถูกมองเป็นไดอิเล็กตริกคล้ายตัวเก็บประจุ C ตัวต้านทานอนุกรม  $R_1$  และตัวต้านทานขนาน  $R_2$  อันเนื่องมาจากสภาพฉนวนหุ้มแผงเซลล์ไม่เป็นไปตามอุดมคติ [45] (มีค่าความต้านทานไม่เป็นอนันต์) สามารถเขียนวงจรเทียบเท่าของวัสดุหุ้มแผงใน รูปวงจรไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 วงจรเทียบเท่าของวัสดุหุ้มแผง [45]

ในการทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวน ป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวน และวัดกระแสที่ไหล เครื่องมือวัดความต้านทานของฉนวน ซึ่งสามารถอ่านค่าความต้านทานได้โดยตรงจากเมกเกอร์ (Megger) แรงดันทดสอบโดยทั่วไปมีค่า 500 V ใช้วัดความต้านทานของฉนวนในวงจรแรงดันต่ำ และ 1000 V ขึ้นไปใช้สำหรับวงจรแรงดันสูง ค่าความต้านทานที่วัดมีหน่วยเป็น  $M\Omega$  ซึ่งค่าความต้านทานของฉนวนจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพอุณหภูมิ ความชื้น ความสกปรกที่ผิวของฉนวน และสภาพของฉนวน ค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ยังขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันพิกัด และลักษณะการฉนวนของอุปกรณ์นั้น

นอกจากนี้ เราสามารถคาดคะเนความเสื่อมสภาพของฉนวนจากค่าความต้านทานของฉนวนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฉนวน ตอนแรกจะมีกระแสไหลมาก เนื่องจากค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวน เมื่อเวลาผ่านไปกระแสนี้จะลดลงจนเหลือแต่ค่ากระแสรั่วไหลเท่านั้น อัตราส่วนค่ากระแสที่เวลา 1 นาทีต่อค่ากระแสที่เวลา 10 นาที หลังจากที่มีป้อนแรงดันเข้าไป เรียกว่า Polarization Index (P.I.) ถ้าฉนวนสกปรกและมีกระแสรั่วไหลมาก ค่า P.I. มีค่าเข้าใกล้ 1

#### 2.7.4 การทดสอบฉนวนของแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์

มาตรฐาน IEC 61730-2 [50] เกี่ยวกับการทดสอบด้านความปลอดภัยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากความเครียดทางกลและความเครียดทางไฟฟ้า ทำให้แผงเสื่อมสภาพและอาจทำให้เกิดไฟลุกและเพลิงไหม้ได้ เป็นต้น ข้อกำหนดการทดสอบด้านความปลอดภัยและการทดสอบที่จำเป็น จะขึ้นอยู่กับระดับของการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละระดับ ดังต่อไปนี้

(ก) ระดับ A: โอกาสการใช้งานทั่วไป ด้านแรงดันที่อันตราย ด้านการใช้กำลังไฟฟ้าที่อันตราย

แผงที่ระบุสำหรับการใช้งานในระดับนี้ เป็นแผงที่ถูกคาดว่าอาจใช้ทำงานกับระบบที่มีแรงดันไฟตรงมากกว่า 50 V DC หรือ กำลังไฟฟ้ามากกว่า 240 W แผงต้องผ่านคุณสมบัติด้านความปลอดภัยตามมาตรฐาน IEC 61730-1 [51] และในส่วนของ มาตรฐาน IEC 61730-2 นี้ ต้องทดสอบสอดคล้องกับระดับความปลอดภัยที่ II

(ข) ระดับ B: โอกาสการใช้งานถูกจำกัด ด้านแรงดันที่อันตราย ด้านการใช้กำลังไฟฟ้าที่อันตราย

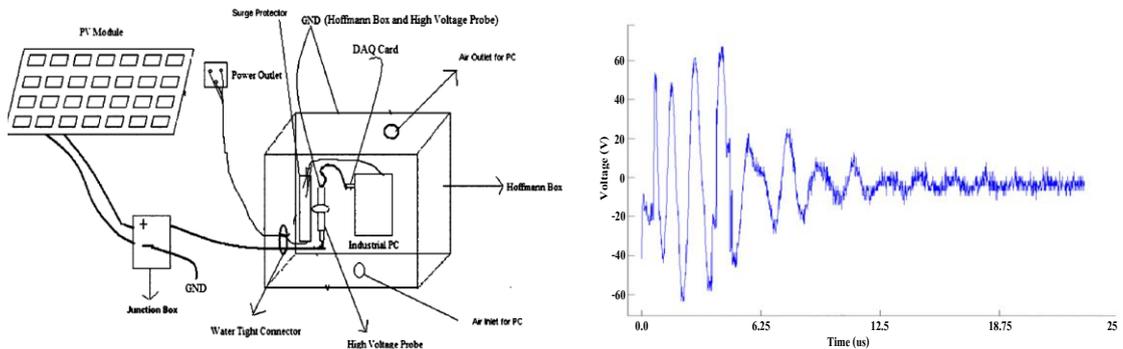
แผงที่ระบุสำหรับการใช้งานในระดับนี้ ถูกจำกัดการเข้าถึงระบบ โดยมีการป้องกันการเข้าสัมผัสโดยใช้รั้วกัน เป็นต้น แผงสำหรับการใช้งานในระดับนี้ ต้องป้องกันโดยการฉนวนขึ้นพื้นฐาน ซึ่งมีการทดสอบสอดคล้องกับระดับความปลอดภัยที่ 0

(ค) ระดับ C: แรงดันถูกกำหนดขีดจำกัดสูงสุด การใช้กำลังไฟฟ้าถูกกำหนดขีดจำกัดสูงสุด แผงที่ระบุสำหรับการใช้งานในระดับนี้ ถูกคาดการณ์ว่าโอกาสการใช้งานทั่วไป อาจถูกใช้ในการทำงานกับระบบที่มีแรงดันไฟตรงน้อยกว่า 50 V DC หรือกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 240 W แผงต้องผ่านคุณสมบัติด้านความปลอดภัยตามมาตรฐาน IEC 61730-1 [51] และในส่วนของ มาตรฐาน IEC 61730-2 นี้ ต้องการทดสอบสอดคล้องกับระดับความปลอดภัยที่ III

ในแง่ของการทดสอบยืนยันเกี่ยวกับพิกัดขีดความสามารถของฉนวนของแข็งของแผง ต่อการคงทนต่อแรงดันเกินที่อาจจะมาจากสภาพบรรยากาศ รวมทั้งแรงดันเนื่องจากการสับสวิตซ์ของอุปกรณ์แรงต่ำในระบบ ในมาตรฐาน IEC 61730-2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีการทดสอบฉนวนของแผง ด้วยการป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning Impulse Voltage) ซึ่งมีเวลาหน้าคลื่น  $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30\%$  และเวลาหางคลื่น  $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$  หรือเรียกย่อๆ ว่า 1.2/50  $\mu s$  โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป สำหรับระดับแรงดันเสิร์จอิมพัลส์ (Surge Impulse Voltage) ที่ป้อนเข้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทดสอบความคงทนต่อแรงดันเสิร์จอิมพัลส์ของฉนวนของแข็งของแผง แสดงดังตารางที่ 2.9 นอกจากนี้จะขึ้นอยู่กัวยังขึ้นอยู่กัวยังระดับโอกาสการนำไปใช้งาน A และ B ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังขึ้นอยู่กัวยังแรงดันระบบสูงสุดด้วย

ตารางที่ 2.9 ระดับแรงดันเสิร์จอิมพัลส์สำหรับทดสอบความคงทนต่อแรงดันเสิร์จอิมพัลส์ของฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [50]

แรงดันระบบสูงสุด V	แรงดันอิมพัลส์	
	ระดับการใช้งาน A V	ระดับการใช้งาน B V
100	1500	800
150	2500	1500
300	4000	2500
600	6000	4000
1000	8000	6000

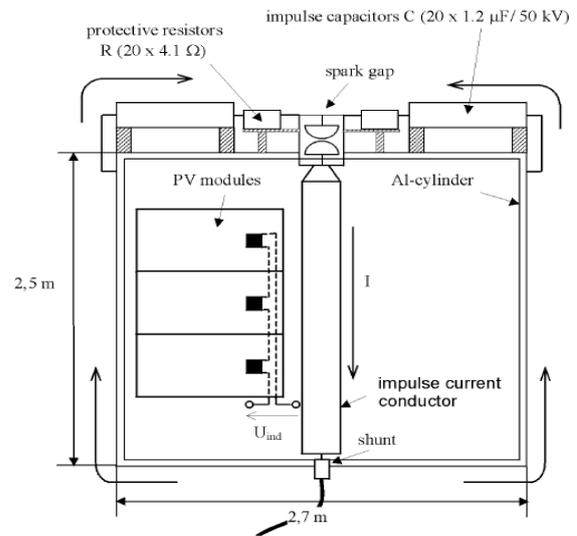


(ก) แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์

(ข) ตัวอย่างผลของแรงดันเหนี่ยวนำเกินชั่วครู่ที่วัดได้

รูปที่ 2.38 การวัดแรงดันเหนี่ยวนำชั่วครู่จากแผงอันเนื่องมาจากกระแสฟ้าผ่าห่างจากที่ติดตั้งแผงประมาณ 7 กิโลเมตร [52]

นอกจากนี้ มีการวิจัยเกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งกลางแจ้งบนหลังคาหรืออาคารของอาคาร หรือติดตั้งในที่ซึ่งรับแสงได้ตลอดทั้งวันให้ได้มากที่สุด ปราศจากการบังเงาจาก สิ่งปลูกสร้าง อาคาร บ้านเรือน เสาไฟฟ้า หรือ ต้นไม้ เป็นต้น พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้มีโอกาสที่ถูกฟ้าผ่าลงบนแผงหรือขอบแผงโลหะโดยตรง เกิดการเชื่อมโยงทางสนามไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าระหว่างแผงกับก้อนเมฆ หรือสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำจากกระแสฟ้าผ่า [53-55] ดังรูปที่ 2.38 หรืออาจเกิดเสิร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge) เข้ามาโดยผ่านระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ [56] ทำให้ไม่เพียงแต่ระบบอิเล็กทรอนิกส์หรือระบบไฟฟ้าเสียหาย แต่อาจทำให้แผงเสียหายด้วย



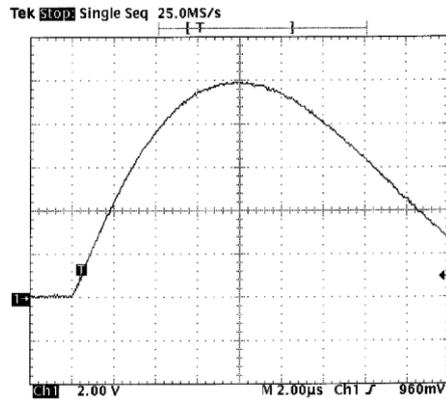
(ก) ตัวอย่างการจัดวางแผงข้างตักนำกระแสลมพัด (ข) แผนภาพและอุปกรณ์ประกอบหลัก

รูปที่ 2.39 เครื่องกำเนิดกระแสลมพัดแบบแกนร่วม [58]

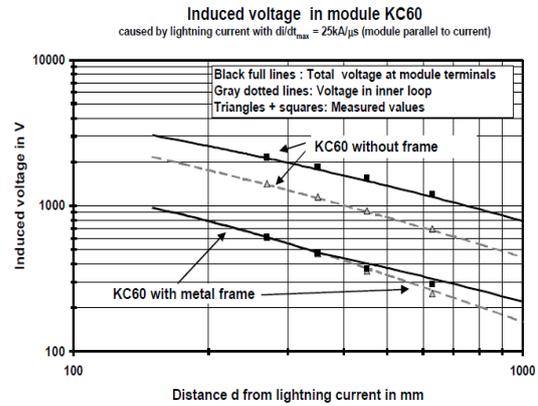
ในการติดตั้งแผง นอกจากพิจารณาความจำเป็นต้องติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าอาทิเช่น การใช้แท่งตัวนำล่อฟ้าต่อลงดินในแนวตั้ง การใช้สายตัวนำต่อลงดินซึ่งตามแนวยาวในอากาศ [57, 58] และการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำแล้ว [59] ฉนวนของแผงควรมีค่าความคงทนต่อแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ [50] โดยไม่ทำให้เกิดการเสียดสภาพฉนวนของไดอิเล็กตริก ซึ่งนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าวุ่นไหลลงดินจากแรงดันในระบบทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟต่อไป และอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่ไปสัมผัสแผง [51]

การทดสอบแผงเพื่อหาแรงดันแทรกสอดที่ถูกเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กของกระแสฟ้าผ่า ใช้เครื่องกำเนิดกระแสลมพัดดังรูปที่ 2.39 เพื่อสร้างคลื่นของกระแสฟ้าผ่ามาตรฐานซึ่งมีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $8 \mu\text{s}$  และเวลาหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu\text{s}$  ( $8/20 \mu\text{s}$ ) ดังตัวอย่างกระแสฟ้าผ่าแสดงในรูปที่ 2.40 (ก) เป็นรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่ามาตรฐาน  $8/20 \mu\text{s}$  ซึ่งมีขนาดกระแสฟ้าผ่าค่ายอดเท่ากับ  $100 \text{ kA}$  ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลาสูงสุด  $25 \text{ kA}/\mu\text{s}$  เมื่อทดสอบกับแผงยี่ห้อ Kyocera รุ่น KC 60 ขณะมีขอบ

และไม่มีขอบแฉง พบว่าถ้าแฉงมีขอบแฉง แรงดันเหนี่ยวนำจากกระแสอิมพัลส์ไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าแฉงที่ไม่มีขอบแฉงดังรูปที่ 2.40 (ข)



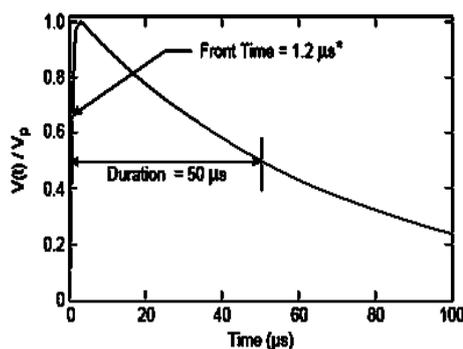
(ก) 20 kA/div. และ 2 μs/div



(ข) แรงดันเหนี่ยวนำขณะมีและไม่มีขอบแฉง

รูปที่ 2.40 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และแรงดันเหนี่ยวนำในแผงโซลาร์ Kyocera รุ่น KC 60 [58]

ขีดความสามารถในการคงทนต่อเสิร์จของแฉงตามมาตรฐาน IEC 61730-2 [50] โดยวิธีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ดังรูปที่ 2.41 (ก) ซึ่งเป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs และมีขนาดแรงดันตามค่าที่ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน (8 kV<sub>max</sub>) ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันระบบสูงสุด และชนิดของการใช้งานตามแบบที่กำหนดคือระดับ A, B หรือ C ที่สัมพันธ์กับการจัดกลุ่มตามความเสี่ยงอันตรายจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน IEC 61730-2 ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของแฉงที่มีเทคนิคการฉนวนที่แตกต่างกันว่า มีผลตอบสนองต่อแรงดันเสิร์จในระดับที่แตกต่างกันมากน้อยเพียงใด



(ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs



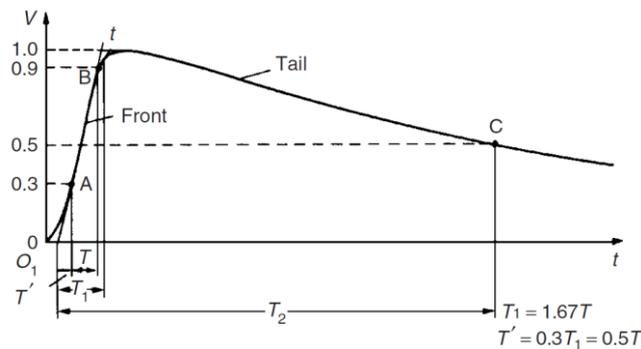
(ข) ตัวอย่างการจัดวางแผ่นทองแดงบางด้านหน้าแผง

รูปที่ 2.41 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าและการเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เข้ากับแฉง [60]

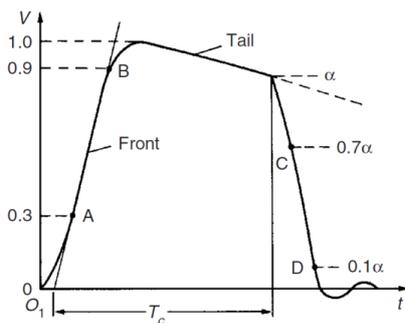
มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเสียดสภาพฉนวนทางไดอิเล็กตริกของแฉง ซึ่งมีเทคนิคการฉนวนที่แตกต่างกัน [60] โดยใช้กระบวนการทดสอบคล้ายกับมาตรฐาน IEC 61730-2 และมีการคลุมด้วยแผ่น

ทองแดงบางด้านหน้าแผงเพื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์เข้ามา เทียบกับขั้วเอาต์พุตของแผงที่ถูกลัดวงจรอยู่ แต่ใช้แรงดันสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.41 (ข)

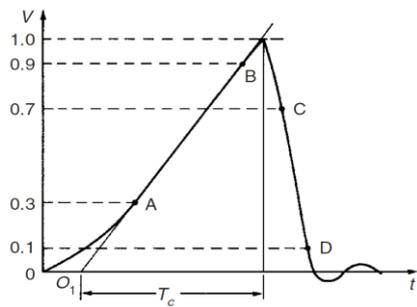
การทดสอบพบว่า ระยะรั้วไหลระหว่างส่วนที่นำกระแสภายในกับขอบกระจกรวมรูปแบบการฉนวนด้านหลังแผง (ทั้งแบบกระจกและแบบฉนวนพอลิเมอร์) มีผลต่อการเสียดสภาพฉนวนบนแผงไดอิเล็กตริกของแผงที่แตกต่างกัน โดยแผงที่มีฉนวนเป็นแบบพอลิเมอร์บางที่ขอบแผง มีค่าแรงดันก่อนการเสียดสภาพฉนวนบนแผงไดอิเล็กตริกของแผงหรือการวาวไฟไปตามผิวราว 16-28 kV ส่วนแผงที่มีฉนวนเป็นแบบกระจกทั้งสองด้านที่ขอบแผง มักสังเกตเห็นการเสียดสภาพฉนวนแบบวาวไฟไปตามผิวเสมอ เนื่องจากกระจกมีขีดความสามารถในการคงทนต่อเสียดสูงกว่ฉนวนแบบพอลิเมอร์บาง โดยการเสียดสภาพฉนวนแบบวาวไฟไปตามผิวอยู่ที่แรงดันประมาณ 16-28 kV ที่ขนาดของแผงเท่ากันกับแผงที่มีฉนวนเป็นแบบพอลิเมอร์บางที่ขอบ



(ก) รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบเต็มคลื่น



(ข) รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบตัดที่หางคลื่น



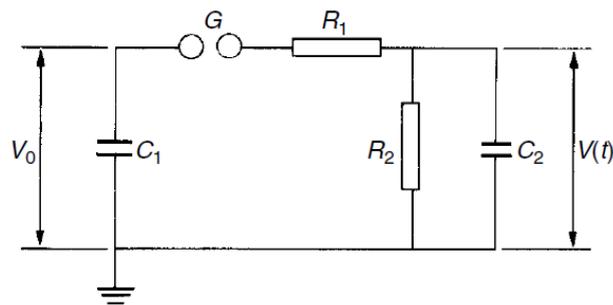
(ค) รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบตัดที่หน้าคลื่น

รูปที่ 2.42 รูปคลื่นทั่วไปและค่าจำกัดความของอิมพัลส์ฟ้าผ่า [61]

การเลียนแบบแรงดันเกินฟ้าผ่าด้วยเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้แรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วย ช่วงเวลานำคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงประมาณหนึ่งถึงหลายสิบ ไมโครวินาที ซึ่งโดยทั่วไปรู้จักกันในนามของอิมพัลส์ฟ้าผ่า ดังรูปที่ 2.42 (ก) เป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบเต็มคลื่น ส่วนรูปที่ 2.42 (ข) และ 2.42 (ค) เป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ถูกตัดที่เวลาหางคลื่น

และหน้าคลื่นตามลำดับ อันเนื่องมาจากการปล่อยประจุทำลายจนวนภายใต้การทดสอบ สำหรับจุดกำเนิดเวกซ์ (Virtual Origin)  $O_1$  ถูกกำหนดด้วยเส้นตรง AB ที่ตัดผ่านแกนเวลา ช่วงเวลาหน้าคลื่น (Front Time)  $T_1$  ตามพารามิเตอร์เวกซ์ (Virtual Parameter) ถูกกำหนดเป็น 1.67 เท่าของช่วงเวลา  $T$  ( $T_1 = 1.67 T$ ) ระหว่างช่วงทันทีที่อิมพัลส์เป็น 30% และ 90% ของค่ายอด (Peak Value) สำหรับอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบเต็มคลื่นหรือแบบถูกสับ (Full or Chopped Lightning Impulses) สำหรับตัวอย่างอิมพัลส์ที่ถูกสับเวลาหน้าคลื่นดังรูปที่ 2.42 (ค) เวลาถึงจุดสับ (Time to Chopping)  $T_C$  มีค่าประมาณเท่ากับ  $T_1$

โดยทั่วไป รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบเต็มคลื่น เวลาหน้าคลื่นเวกซ์ (Virtual Front Time)  $T_1$  คือ  $1.2 \mu\text{s}$  และเวลาที่ค่ายอดลดลงถึงครึ่งหนึ่งหรือเรียกสั้นๆ ว่า เวลาสู่ค่าครึ่งหนึ่ง (Time to Half-value)  $T_2$  คือ  $50 \mu\text{s}$  และกำหนดให้มีค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ถึง  $\pm 30\%$  สำหรับ  $T_1$  และ  $\pm 20\%$  สำหรับ  $T_2$  ส่วนค่ายอด (Peak Value) ของแรงดันอิมพัลส์ยอมให้ผิดพลาดได้  $\pm 3\%$  และมักเรียกแรงดันอิมพัลส์ในรูปของ  $T_1/T_2$  นั่นคืออิมพัลส์  $1.2/50 \mu\text{s}$  เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน



รูปที่ 2.43 วงจรพื้นฐานของชุดกำเนิดอิมพัลส์ [61]

เมื่อ  $V_0$  คือ ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

$G$  คือ ชุดช่องว่างประกายข้าม (Spark Gap)

$R_1$  คือ ตัวต้านทานหน่วง

$R_2$  คือ ตัวต้านทานปล่อยประจุ

$C_1$  คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

$C_2$  คือ โหลดตัวเก็บประจุ

$V(t)$  คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

วิธีการหนึ่งในการสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบเต็มคลื่น สามารถทำได้โดยใช้พื้นฐานของวงจรเก็บประจุและคายประจุสองวงจรดังรูปที่ 2.43 เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงอัดประจุตัวเก็บประจุ  $C_1$  จนแรงดันสูงพอ ก็จะเกิดการปล่อยประจุแบบประกายข้ามระหว่างชุดช่องว่างประกายข้าม  $G$  พลังงานที่

สะสมอยู่ใน  $C_1$  ก็จะถูกส่งผ่านตัวต้านทานหน้าวง  $R_1$  ไปประจุให้กับ  $C_2$  ทำให้เกิดแรงดันเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุด จึงไม่เกิดประกายข้ามระหว่างชุดช่องว่างประกายข้าม  $G$  ต่อไป แต่เนื่องจาก  $C_2$  มีตัวต้านทานปล่อยประจุ  $R_2$  ต่อขนานอยู่ ทำให้แรงดันลดค่าลงเรื่อยๆ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า  $R_1$  เป็นตัวกำหนดเวลาหน้าคลื่น และ  $R_2$  เป็นตัวกำหนดเวลาหางคลื่น

ส่วนแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า  $V(t)$  สามารถหาได้จากสมการที่ 2.7

$$V(t) = \left( \frac{V_0}{K} \right) \left( \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $K = R_1 C_2$  และ  $\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \mp \sqrt{\left( \frac{a}{2} \right)^2 - b}$  โดยที่  $a$  และ  $b$  หาได้จากสมการ

$$a = \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) \quad (2.8)$$

และ

$$b = \left( \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right) \quad (2.9)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ก็คือ พลังงาน  $W$  ที่ถูกสะสมได้สูงสุดในตัวเก็บประจุ  $C_1$  คือ

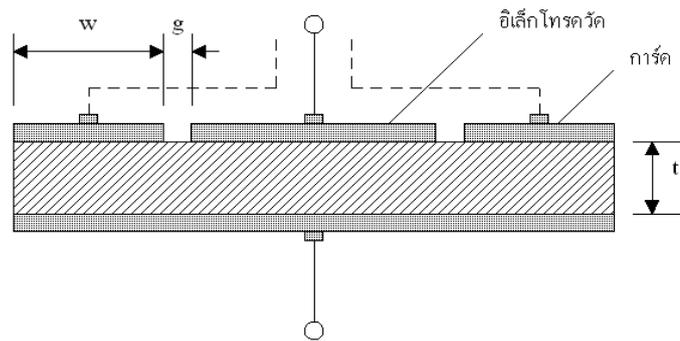
$$W = \frac{1}{2} C_1 (V_{o_{\max}})^2 \quad (2.10)$$

ซึ่งพลังงานนี้ต้องมากพอต่อการคายประจุให้กับ  $C_2$  และโดยทั่วไปค่าความจุของ  $C_1$  จะมีค่ามากกว่า  $C_2$  มากๆ เพื่อให้คายประจุให้ถึงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ารวมทั้งมีค่าเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นตามที่กำหนด

### 2.7.5 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวน

#### การวัดค่าความต้านทานจำเพาะ

ความต้านทานจำเพาะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของฉนวน หาได้โดยวัดความต้านทานของตัวอย่างฉนวนด้วยแรงดันตรง ฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าง่ายๆ ที่สะดวกแก่การคำนวณความต้านทานจำเพาะ

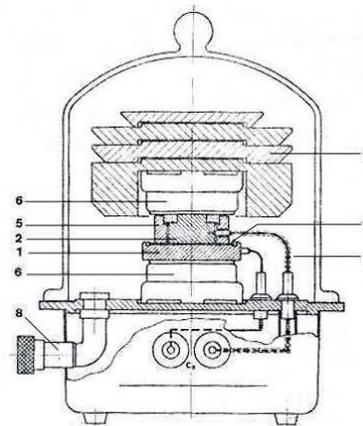


รูปที่ 2.44 อิเล็กโทรดวัตต์ความต้านทานจำเพาะของฉนวนแข็ง [62]

- เมื่อ  $t$  = ความหนาของฉนวน  
 $g$  = ความกว้างช่องช่องว่างแคบ  
 $w$  = ความกว้างของอิเล็กโทรดแอโนด,  $w > 2t$

ถ้าเป็นฉนวนของแข็ง รูปร่างตัวอย่างฉนวนจะเป็นแผ่นระนาบกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5–10 เซนติเมตร และหนาประมาณ 3–12 มิลลิเมตร วางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดผิวหน้าเรียบเป็นระนาบวางขนานกัน อิเล็กโทรดที่ใช้วัดความต้านทานประกอบด้วย 3 อิเล็กโทรด ดังในรูปที่ 2.44

1. อิเล็กโทรดแรงสูง
2. อิเล็กโทรดวัตต์
3. วัสดุทดสอบ
4. สายต่อเข้าอิเล็กโทรดวัตต์
5. วงแหวนการ์ท
6. ตัวทำความร้อน
7. มวลน้ำหนัก
8. ที่ต่อเข้าปั๊มสุญญากาศ



รูปที่ 2.45 เครื่องวัดเปอร์มิตติวิตีและคาปาซิแตนซ์ฉนวนแข็ง [63]

เพื่อให้การวัดความต้านทานมีความถูกต้อง อิเล็กโทรดกับผิวฉนวนตัวอย่างต้องสัมผัสพอดี ซึ่งอาจใช้แผ่นโลหะเปลวเช่น อะลูมิเนียมอัดติดกับผิวฉนวนด้วยน้ำยาแก้วที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเช่นปิโตรเลียมขึ้นหรือไซลิโคน หรืออาจใช้สีที่เป็นตัวนำเช่นเงินทาเป็นอิเล็กโทรด หรือใช้ปรอทเป็นอิเล็กโทรด โดยวางฉนวนตัวอย่างบนผิวปรอทที่ล้อมรอบด้วยแหวนโลหะดังรูปที่ 2.45

จากวิธีจัดวางชิ้นฉนวนตัวอย่าง สภาพค่าความต้านทานสุทธิ (Volume Resistivity,  $\rho$ ) สามารถหาได้จากสมการ

$$\rho = \frac{R \pi r^2}{t} \quad [\Omega \cdot m] \quad (2.11)$$

เมื่อ  $R$  = ค่าความต้านทานที่ถูกวัด  $[\Omega]$   
 $t$  = ความหนาของชิ้นฉนวนตัวอย่าง  $[m]$   
 $r$  = รัศมีประสิทธิผล (Effective Radius)  $[m]$

### การวัดค่าทางไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้อง

ค่าความเก็บประจุถูกกำหนดด้วยประจุจริงต่อหน่วยแรงดันที่ถูกป้อน ตามสมการ

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\sigma_d A}{V} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $C$  = ค่าความเก็บประจุ  $[\mu F]$   
 $q$  = ประจุไฟฟ้า  $[C]$   
 $V$  = แรงดันที่ถูกป้อน  $[V]$   
 $A$  = พื้นที่ผิวของอิเล็กโตรด  $[m^2]$   
 $\sigma_d$  = ความหนาแน่นของประจุ =  $q/A$   $[C/m^2]$

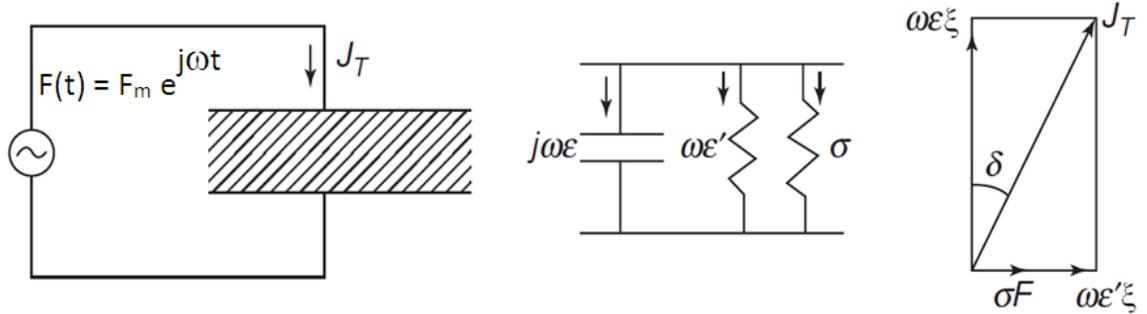
ในกรณีที่แผ่นอิเล็กโตรดวางแยกห่างกัน  $d$  แรงดันคือ  $V = Ed = d\sigma/(\epsilon_0 \epsilon_r)$  ดังนั้น

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (2.13)$$

ถ้าค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นเพลตว่างเปล่า ( $\epsilon_r = 1$ ) ถูกกำหนดเป็น  $C_0$  แล้ว

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.14)$$

สมการข้างต้นเป็นพื้นฐานในการวัดหาสภาพยอมสัมพันธ์หรือค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามวัสดุฉนวนที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะระนาบขนาน ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  $F(t) = F_m \exp(j\omega t)$  ดังรูปที่ 2.46 (ก) กระแสทั้งหมด ( $J_T$ ) ไม่ได้เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นเพลตเพียงอย่างเดียว



(ก) ตัวเก็บประจุแผ่นขนาน (ข) วงจรสมมูล (ค) เฟสเซอร์ของกระแสต่างๆ

รูปที่ 2.46 วัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะแผ่นระนาบภายใต้สนามไฟฟ้าสลับ [64]

เมื่อสนามไฟฟ้าสลับถูกป้อนคร่อมตัวเก็บประจุแผ่นเพลตขนาน ที่มีพื้นที่แผ่นเพลตหนึ่งหน่วยและแผ่นเพลตวางห่างกัน  $d$  แล้ว กระแสรวม ( $J_T$ ) กำหนดได้ด้วยสมการ [64]

$$J_T = J + \frac{db}{dt} = J + \epsilon^* \frac{d\xi}{dt} \tag{2.15}$$

เมื่อ  $J$  คือกระแสการนำ (Conduction Current)  $D$  คือความหนาแน่นสนามไฟฟ้า  $\xi$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า และ  $\epsilon^*$  คือไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนเขียนได้ด้วยสมการ

$$\epsilon^* = \epsilon - j\epsilon' = (\epsilon_r - j\epsilon'_r)\epsilon_0 \tag{2.16}$$

$\epsilon_r$  คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) และ  $\epsilon'_r$  คือตัวประกอบความสูญเสีย (Loss Factor)

สนามไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือความเร็วเชิงมุม  $\omega$  สามารถเขียนในรูปของสมการได้เป็น

$$\xi = \xi_m \exp(j\omega t) \tag{2.17}$$

แทนสมการที่ (2.16) และ (2.17) ลงในสมการ (2.15) จะได้

$$J_T = J + j\omega(\epsilon - j\epsilon')\xi$$

และแทนกระแสการนำ ( $J$ ) เท่ากับ ค่าความนำทางไฟฟ้าของวัสดุ ( $\sigma$ ) คูณกับความเข้มสนามไฟฟ้า ( $\xi$ ) จะได้

$$\begin{aligned} J_T &= \sigma\xi + j\omega(\epsilon - j\epsilon')\xi \\ &= (\sigma + \omega\epsilon')\xi + j\omega\epsilon\xi \end{aligned} \tag{2.18}$$

สมการที่ (2.18) สามารถนำไปเป็นวงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกและเฟสเซอร์ของกระแสต่างๆ ภายใต้สนามไฟฟ้าสลับได้ดังรูปที่ 2.46 (ข) และ 2.46 (ค) ตามลำดับ โดยแต่ละเทอมมีความหมายดังนี้

: เทอม  $\sigma \xi$  เป็นกระแสการนำที่ทำให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากสภาพความนำทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริกมีความต้านทานไม่ถึงค่านันต์ ซึ่งความสูญเสียนี้เกิดขึ้นได้ทั้งความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

: เทอม  $\omega \mathcal{E}' \xi$  เป็นองค์ประกอบกระแสสูญเสียเนื่องมาจากการแยกขั้ว (Polarization) ภายในวัสดุไดอิเล็กตริก จึงจัดเป็นพลังงานสูญเสียเปล่าทางกลไฟฟ้า เพราะโมเลกุลของไดอิเล็กตริกต้องกลับขั้วไปมา ตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ไม่เกิดขึ้นภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง ( $\omega = 0$ ) และความสูญเสียนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วเชิงมุม  $\omega$  เพิ่มขึ้น

: เทอม  $\omega \mathcal{E} \xi$  เป็นองค์ประกอบจินตภาพ ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลในค่าความจุไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ มีเฟสหน้าหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

สำหรับไดอิเล็กตริกแบบพอลิเมอร์  $\sigma$  มีค่าน้อยมาก สามารถตัดเทอมแรกทิ้งไปได้ ทำให้  $\tan \delta$  คำนวณได้จาก

$$\tan \delta = \mathcal{E}'_r / \mathcal{E}_r \quad (2.19)$$

$\tan \delta$  เรียกแทนเจนต์ความสูญเสีย (Loss Tangent) ดังแสดงในรูปที่ 2.43 (ค)

ถ้า  $\mathcal{E}'_r / \mathcal{E}_r \ll 1$

$$\tan \delta = \mathcal{E}'_r / \mathcal{E}_r \approx \delta \quad (2.20)$$

โดยทั่วไป เรียก  $\delta$  ว่า มุมสูญเสีย (Loss Angle)

ดังนั้นการวัดค่าทางไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้อง นอกจากต้องวัดค่าความต้านทาน และค่าความจุแล้ว ยังต้องวัดแทนเจนต์ความสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ในกรณีที่ทดสอบไดอิเล็กตริกภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับพลังงานชั่วขณะที่ถูกดูดกลืนต่อวินาทีต่อปริมาตร ( $\text{cm}^3$ ) โดยวัสดุ ถูกกำหนดเป็น  $J_T(t) F(t)$  ดังนั้น ค่าพลังงานเฉลี่ยต่อ  $\text{cm}^3$  ต่อวินาทีที่ถูกดูดกลืนโดยวัสดุ ( $W$ ) คือ

$$W = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} J_T(t) F(t) d(\omega t)$$

จากสมการที่ (2.18) คือ  $J_T(t)$  เท่ากับ  $(\sigma + \omega \mathcal{E}' \xi) \xi + j\omega \mathcal{E} \xi$  หากคิดในเชิงปริมาตร  $J_T(t)$  เท่ากับ  $(\sigma + \omega \mathcal{E}' \xi) F(t) + j\omega \mathcal{E} F(t)$  และถ้าพิจารณาเฉพาะพลังงานที่ถูกดูดกลืนจากกระบวนการแยกขั้ว

(Polarization) ภายในวัสดุไดอิเล็กตริก  $J_T(t)$  เท่ากับ  $\omega \mathcal{E}' F(t)$  และ  $F(t)$  เป็นแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับคือ  $F_m \exp(j\omega t)$  เมื่อแทนลงในสมการได้

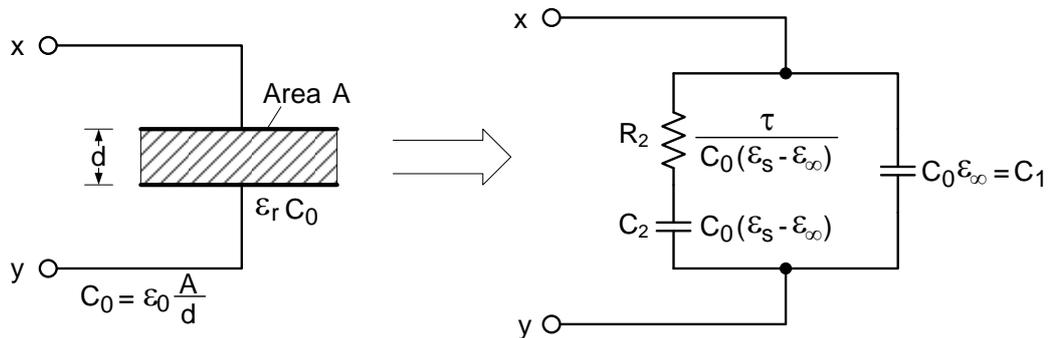
$$W = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega \mathcal{E}' F_m^2 e^{2j\omega t} d(\omega t)$$

นั่นคือค่าพลังงานเฉลี่ยต่อ  $\text{cm}^3$  ต่อวินาทีที่ถูกดูดกลืนโดยจากกระบวนการแยกขั้ววัสดุไดอิเล็กตริกจึงหาได้จาก

$$W = \omega \epsilon_r' \epsilon_0 F_m^2 / 2 \tag{2.21}$$

**การวัดค่าไดอิเล็กตริกที่แปรตามความถี่และอุณหภูมิ**

เมื่อพิจารณาในระดับจุลภาค ผลตอบสนองโมเลกุลแบบมีขั้ว (Polar Molecule) ที่มีต่อสนามไฟฟ้าแบบสลับ จะขึ้นอยู่กับความหนืดของตัวกลางที่แสดงในพจน์เวลาผ่อนคลาย (Relaxation Time,  $\tau$ ) ซึ่งเป็นเวลาน้อยที่สุดที่ประจุบวกและประจุลบในโมเลกุลสามารถปรับทิศทางตามสนามไฟฟ้า (ξ) หรือแสดงในพจน์ของความถี่เชิงมุม ซึ่งแรงหนืดมีผลมากที่สุด ( $\omega_0 = \tau^{-1}$ )



(ก) วัสดุไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นเพลตขนาน (ข) วงจรสมมูลของเดบาย

**รูปที่ 2.47** แบบจำลองของไดอิเล็กตริกของเดบาย [65]

การสร้างวงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกของแข็ง โดยพิจารณาผลของเวลาผ่อนคลาย อาจใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของเดบาย (Debye) ดังรูปที่ 2.47 ซึ่งมีตัวต้านทาน  $R_2$  และตัวเก็บประจุ  $C_2$  ต่ออนุกรมกัน และขนานกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในการวิเคราะห์หาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน กำหนดให้แอดมิตแดนซ์ของวงจรสมมูลระหว่างขั้ว  $x$  และ  $y$  เท่ากับ  $Y$

$$Y = j\omega C_1 + \left( R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right)^{-1}$$

หรือ 
$$Y = j\omega C_1 + \frac{j\omega C_2}{(1 + j\omega C_2 R_2)} \tag{2.22}$$

ถ้าประจุให้  $C_2$  มีแรงดันเป็น  $V_0$  แล้วลัดวงจรที่ขั้ว  $x$  และ  $y$  ทันที จะเกิดการผ่อนคลาย และมีกระแสชั่วครู่ไหลผ่าน  $R_2$  และเกิดความสูญเสียขึ้น ถ้ากำหนดให้ค่าคงที่เวลา  $R_2C_2 = \tau$  เป็นค่าที่เรียกว่า เวลาผ่อนคลาย (Relaxation Time) เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.22) จะได้

$$Y = \frac{\omega^2 C_2 R_2}{1 + \omega^2 \tau^2} + j\omega C_1 + \frac{j\omega C_2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.23)$$

และค่าแอดมิตแตนซ์ของวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งคิดในรูปไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุถูกกำหนดโดย  $Y = j\omega C_0 \epsilon^*$  และจากสมการที่ (2.16) คือ  $\epsilon^* = \epsilon - j\epsilon'$  จะได้

$$Y = \omega C_0 \epsilon' + j\omega C_0 \epsilon \quad (2.24)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (2.23) กับสมการที่ (2.24) โดยการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จึงได้

$$\epsilon = \frac{C_1}{C_0} + \frac{C_2}{C_0} \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.25)$$

$$\epsilon' = \frac{C_2}{C_0} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.25) และสมการที่ (2.26) สามารถพิจารณาตามเงื่อนไขที่กำหนดซึ่งขึ้นอยู่กับขีดจำกัดของค่า  $\omega$  ดังต่อไปนี้

(ก) ที่  $\omega = 0$  ได้  $\epsilon' = 0$  และค่า  $\epsilon$  มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $\epsilon_s$  คือ

$$\epsilon = \frac{C_1}{C_0} + \frac{C_2}{C_0} = \epsilon_s \quad (2.27)$$

และเรียก  $\epsilon_s$  นี้ว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสถิติก (Static Dielectric Constant) ภายใต้อสนามไฟฟ้ากระแสตรง

(ข) ที่  $\omega \rightarrow \infty$  ได้  $\epsilon$  เข้าใกล้ค่าต่ำสุดเท่ากับ  $\epsilon_\infty$  คือ

$$\epsilon = \frac{C_1}{C_0} = \epsilon_\infty \quad (2.28)$$

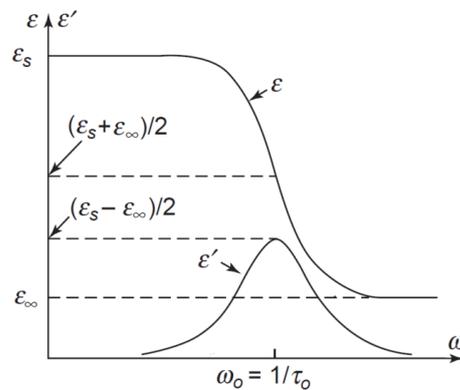
จึงเรียก  $\epsilon_\infty$  นี้ว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง (High Frequency Dielectric Constant) ภายใต้อสนามไฟฟ้ากระแสสลับ

นำสมการที่ (2.27) และ (2.28) ไปแทนในสมการที่ (2.25) และ (2.26) จึงได้

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.29)$$

$$\epsilon' = (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.30)$$

สมการที่ (2.29) และ (2.30) เป็นฟังก์ชันของ  $\omega$  ซึ่งแสดงได้ด้วยกราฟดังรูปที่ 2.48 และสมการทั้งสองนี้เป็นสมการของเดบาย ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการเขียนวงจรมมูลสำหรับไดอิเล็กตริกที่เกิดขั้วได้ รวมถึงการพิจารณาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ



รูปที่ 2.48 กราฟของ  $\epsilon$  และ  $\epsilon'$  ตามโมเดลของเดบาย [64]

กรณีที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนคือ  $\epsilon$  และ  $\epsilon'$  อยู่ภายใต้สภาวะเปลี่ยนแปลงทั้งความถี่และอุณหภูมิ เวลาผ่อนคลาย (Relaxation Time,  $\tau$ ) ของสมการเดบาย จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ซึ่งสามารถเขียนสมการเวลาการผ่อนคลายใหม่ได้เป็น

$$\tau = \tau_h \exp(H / kT) \quad (2.31)$$

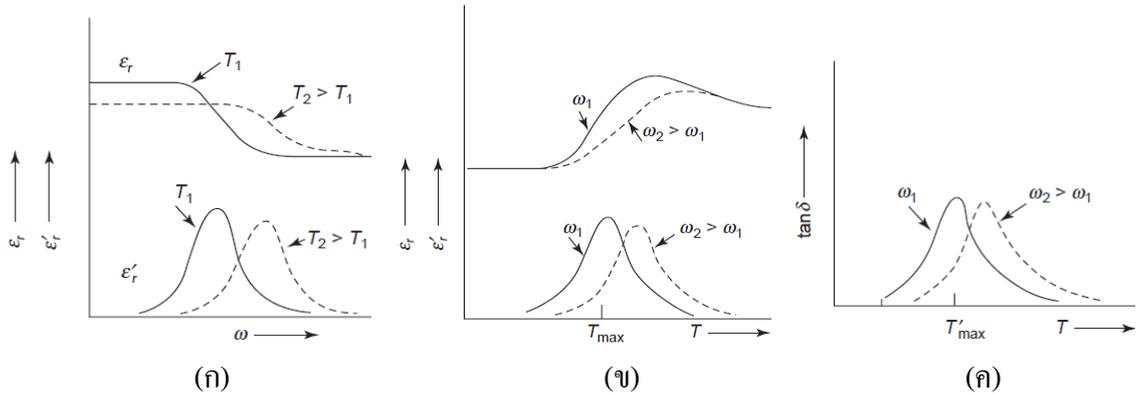
เมื่อ  $\tau_h$  เป็นตัวประกอบพรีเอ็กซ์โปเนนเชียล (Pre-exponential Factor, H) คือพลังงานการกระตุ้น (Activation Energy, k) คือ Boltzmann's Constant และ T คืออุณหภูมิ

โดยการแทนค่าของ  $\tau$  ที่มีการแปลงตามอุณหภูมิลงในสมการเดบายที่ (2.29) และ (2.30) และเนื่องจาก  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,  $\epsilon' = \epsilon_0 \epsilon'_r$ ,  $\epsilon_{\infty} = \epsilon_0 \epsilon_{r\infty}$  และ  $\epsilon_s = \epsilon_0 \epsilon_{rs}$  จึงสามารถเขียนสมการเดบายที่ขึ้นกับอยู่ความถี่และอุณหภูมิได้เป็น

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty}^T + \frac{\epsilon_{rs}^T - \epsilon_{r\infty}^T}{1 + \omega^2 \tau_h^2 \exp(2H / kT)} \quad (2.32)$$

$$\varepsilon_r' = (\varepsilon_{rs}^T - \varepsilon_{r\infty}^T) \frac{\omega\tau_h \exp(H/kT)}{1 + \omega^2\tau_h^2 \exp(2H/kT)} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{rs}^T$  และ  $\varepsilon_{r\infty}^T$  เป็นค่าของ  $\varepsilon_{rs}$  และ  $\varepsilon_{r\infty}$  ที่อุณหภูมิ  $T$  จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก  $\varepsilon_r$  และค่ายอดความสูญเสีย (Loss Peak,  $\varepsilon_r'(\max)$ ) ลดลงตามอุณหภูมิ และค่ายอดความสูญเสียเลื่อนไปทางอุณหภูมิสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 สำหรับความถี่เดียวกัน  $T_{\max}$  สำหรับ  $\varepsilon_r'(\max)$  มีค่าสูงกว่า  $T'_{\max}$  สำหรับ  $\tan \delta(\max)$  [64]  
 (ก)  $\varepsilon_r$  และ  $\varepsilon_r'$  ในฟังก์ชันของ  $\omega$  สำหรับอุณหภูมิที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ ณ อุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$  โดย  $T_1 > T_2$  (ข)  $\varepsilon_r$  และ  $\varepsilon_r'$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสำหรับความถี่ที่ถูกกำหนดให้คงที่  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  โดย  $\omega_1 > \omega_2$  และ (ค)  $\tan \delta$  ในฟังก์ชันของอุณหภูมิสำหรับความถี่ที่ถูกกำหนดกำหนดให้คงที่  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  โดย  $\omega_1 > \omega_2$

ในกรณีของวัสดุไม่เกิดขั้ว (Non-dipolar Material) เทอมของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\varepsilon_{rs}^T - \varepsilon_{r\infty}^T$ ) ในสมการที่ (2.33) จะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จึงกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกให้เป็น  $(\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty})$  เมื่อทำการหาพื้นที่ใต้เส้นโค้ง  $\varepsilon_r'$  vs  $1/T$  ของสมการที่ (2.33) จึงเขียนสมการได้ว่า

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \varepsilon_r' d\left(\frac{1}{T}\right) &= \int_0^\infty (\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}) \frac{\omega\tau_h e^{H/kT}}{1 + \omega^2\tau_h^2 e^{2H/kT}} d\left(\frac{1}{T}\right) \\ &= (\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}) \left(\frac{1}{\omega\tau_h}\right) \left(\frac{k}{H}\right) \int_0^\infty \frac{d(e^{H/kT})}{(e^{H/kT})^2 + \left(\frac{1}{\omega\tau_h}\right)^2} \end{aligned}$$

จากสูตร  $\int \frac{du}{u^2+a^2} = \frac{1}{a} \tan^{-1}\left(\frac{u}{a}\right) + c$  จะได้

$$\int_0^\infty \varepsilon_r' d\left(\frac{1}{T}\right) = (\varepsilon_{rs} - \varepsilon_{r\infty}) \frac{k}{H} \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \omega\tau\right) \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) ไดอิเล็กตริกไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ขึ้นอยู่กับพลังงานการกระตุ้น  $H$  และในกรณีที่  $\tan^{-1} \omega\tau < \pi/2$  พื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง  $\varepsilon_r'$  vs  $1/T$  ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่

อย่างไรก็ตาม สำหรับวัสดุไดโพลาร์ พิจารณาในระดับจุลภาคเป็นไดโพลาร์โมเลกุล เทอมของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_{rs}^T - \epsilon_{r\infty}^T$ ) ในสมการเดบาย (2.33) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จึงเขียนสมการให้เป็น

$$(\epsilon_{rs}^T - \epsilon_{r\infty}^T) = \frac{A}{T} \quad (2.35)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่ ในกรณีนี้ พื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง  $\epsilon_r'$  vs  $1/T$  ในสมการเดบาย (2.33) จึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^\infty \epsilon_r' d\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{Ak^2}{H} \left[ -\frac{\pi \ln \omega\tau}{2} + \sum_{r=1}^\infty \frac{(-1)^r (\omega\tau)^{2r+1}}{(2r+1)^2} \right] \quad (2.36)$$

ถ้ากำหนดให้  $T_{\max}$  เป็นจุดที่  $\epsilon_r'$  มีอุณหภูมิสูงที่สุด ดังนั้น

$$(\epsilon_{rs}^{T_{\max}} - \epsilon_{r\infty}^{T_{\max}}) = \frac{A}{T_{\max}} \quad (2.37)$$

$$\tau_{T_{\max}} = \tau_h \exp(H / kT_{\max}) \quad (2.38)$$

โดยทั่วไป  $\omega\tau_{T_{\max}}$  มีค่ามากกว่าหนึ่งหน่วยไปเล็กน้อย สังเกตได้จากรูปที่ 2.49 (ก) ถึง (ค) จุดยอดของเส้นโค้งลดลงเมื่ออุณหภูมิหรือความถี่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากย่านความถี่ใช้งานโดยทั่วไปในทางปฏิบัติ ( $\omega\tau < 1$ ) สมการที่ (2.34) สามารถถูกประมาณให้เป็น

$$\int_0^\infty \epsilon_r' d\left(\frac{1}{T}\right) = (\epsilon_{rs}^{T_{\max}} - \epsilon_{r\infty}^{T_{\max}}) \frac{\pi k}{2H} \quad (2.39)$$

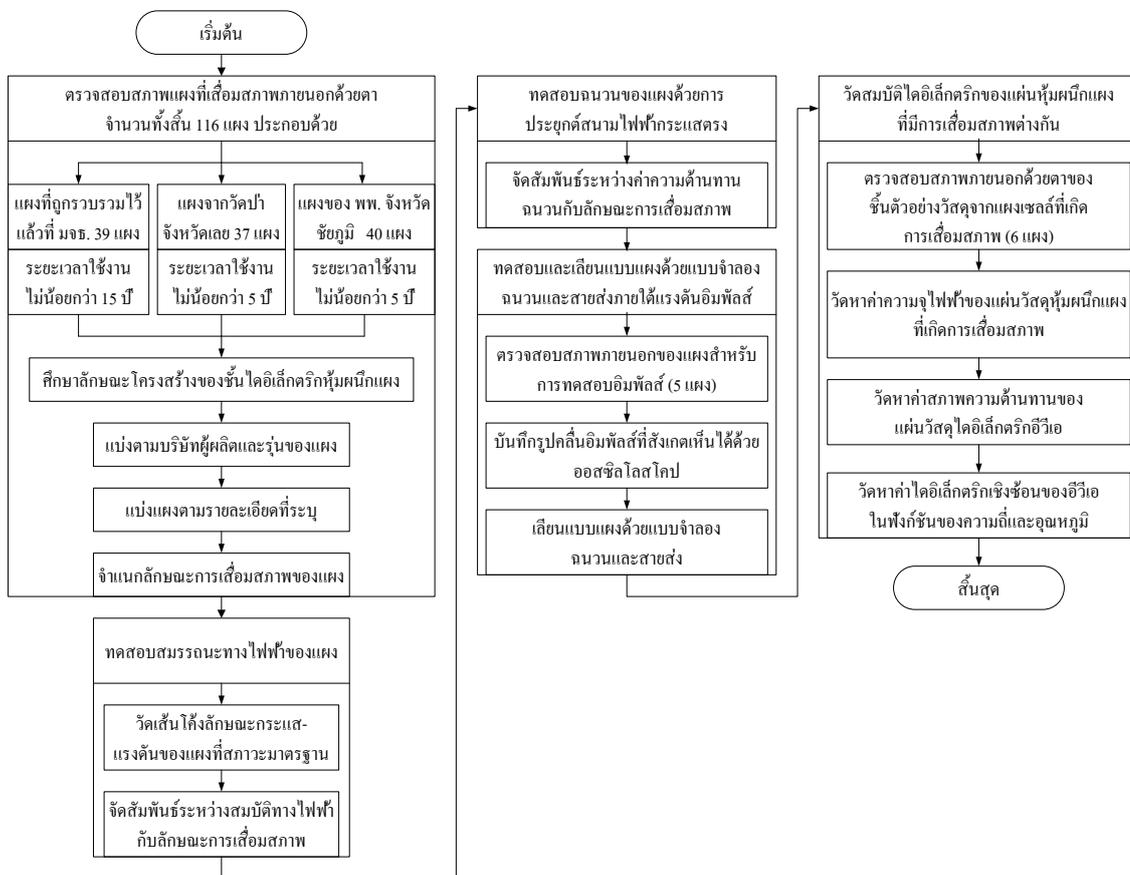
ดังนั้นที่  $\omega\tau < 1$  เมื่อนำสมการที่ (2.39) ไปเทียบกับสมการที่ (2.34) จะพบว่า มีเพียงเทอม  $(\epsilon_{rs}^T - \epsilon_{r\infty}^T)$  เท่านั้นที่แตกต่างกัน และเป็นที่น่าสนใจว่า ที่ความถี่เดียวกันอุณหภูมิ  $T_{\max}$  สำหรับ  $\epsilon_{r(\max)}'$  ในรูปที่ 2.49 (ข) มีค่ามากกว่าอุณหภูมิ  $T'_{\max}$  สำหรับ  $\tan \delta_{(\max)}$  ในรูปที่ 2.49 (ค)

# บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

## 3.1 บทนำ

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทนี้ เป็นระเบียบวิธีในการดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์แผนที่เสื่อมสภาพ ซึ่งประกอบด้วย วัตถุประสงค์การทดสอบ เครื่องมือและอุปกรณ์ ลำดับขั้นตอนการดำเนินการในการวัด การทดสอบและการวิเคราะห์ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 ส่วนตามแผนภาพในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ

1. การตรวจสอบสภาพแผนที่เสื่อมสภาพภายนอกด้วยตา
2. การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผนที่เสื่อมสภาพ
3. การทดสอบจนวนของแผนที่ด้วยการประยุกต์สนามไฟฟ้ากระแสตรง
4. การทดสอบและเลียนแบบแผนที่ด้วยแบบจำลองจนวนและสายส่งภายใต้แรงดันอิมพัลส์
5. การวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นหุ้มฉนวนแผนที่ที่มีการเสื่อมสภาพ



รูปที่ 3.1 แผนภาพระเบียบวิธีในการดำเนินการวิจัย

### 3.2 การตรวจสอบสภาพแผงภายนอกด้วยตา

การสังเกตภายนอกด้วยตามีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดบกพร่องที่มองเห็นได้ และจำแนกรูปแบบของการเสื่อมสภาพ

#### วัสดุและอุปกรณ์

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 116 แผง
2. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล
3. ห้องถ่ายภาพมีความสว่างไม่น้อยกว่า 1,000 lux

#### ลำดับขั้นการทดลอง

(ก) สังเกตแผงภายนอกขั้นตอนดังรูปที่ 3.2 ภายใต้ความสว่างไม่น้อยกว่า 1,000 lux เพื่อหาจุดบกพร่องทั้งด้านหน้าแผง ด้านหลัง และรอบขอบแผง

(ข) จำแนกและบันทึกความบกพร่อง ตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเกตภายนอกด้วยตา

### ตารางที่ 3.1 ความบกพร่องสำคัญของแผงที่สังเกตได้ด้วยตา

ด้านหน้าแผง			ด้านหลังแผง		รอบขอบแผง
ผิวด้านหน้า	เซลล์	บัสบาร์	ผิวด้านหลัง	กล่องต่อสาย	
แตกหรือร้าว	แตกหรือร้าว	ต่อผิด	ถลอก	แตกหรือร้าว	แตกหรือร้าว
คราบขุ่นมัว	เรียงผิด	ไม่ได้ต่อ	ฉีกขาด	ไม่ได้ต่อ	บดงอ
ลอร้อน	เส้นกริดขาดหาย	ขาดหาย	ลอร้อน	ตัวนำขาดหาย	ลอร้อน
ฟองอากาศ	สัมผัสกับโครง	บดงอ	ฟองอากาศ	ไม่ได้หุ้มส่วนมีไฟ	ฟองอากาศ
เปลี่ยนสี	เซลล์สัมผัสกับ อีกเซลล์หนึ่ง	จุดต่อใหม่	ไม่ได้หุ้มส่วน มีไฟ	ไดโอดเบี่ยง เสียหาย	กาวฉนวนขอบแตก หรือหลุดเป็นผง
ความชื้นซึมเข้า	กั๊กกร้อน	กั๊กกร้อน	ผิวเป็นน้ำมัน	กั๊กกร้อน	กั๊กกร้อน

#### การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบสภาพแผงภายนอกด้วยตา

การสังเกตสภาพแผงภายนอก 116 แผงด้วยตา จำแนกเป็น 4 ส่วนหลักดังนี้

1. การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของชั้นไดอิเล็กตริกหุ้มแผง
2. การแบ่งแผงตามบริษัทผู้ผลิต และรุ่นของแผง
3. การแบ่งแผงตามรายละเอียดเทคนิคที่ระบุ
4. การจำแนกลักษณะการเสื่อมสภาพของแผงจากด้านหน้าและด้านหลัง

### 3.3 การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผง

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ การวัดกราฟกระแส-แรงดัน ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า) และการจำลองกราฟกระแส-แรงดัน โดยใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าของแผง ซึ่งมีรายละเอียดดังจะกล่าวต่อไป

#### 3.3.1 การวัดกราฟลักษณะกระแส-แรงดันของแผงภายใต้สภาวะมาตรฐาน

##### จุดประสงค์

เพื่อหาสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงในสภาวะการทดสอบมาตรฐาน ภายใต้แสงอาทิตย์เทียม Class A ที่เป็นไปตาม IEC 60904-3 (1989) ที่มวลอากาศ 1.5



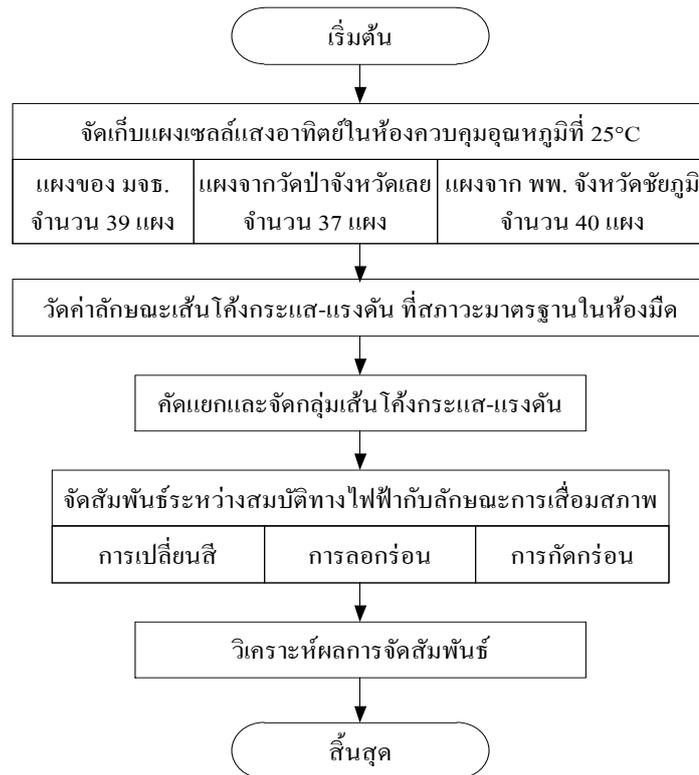
รูปที่ 3.3 ห้องมืดสำหรับการวัดกราฟกระแส-แรงดันของแผง

### วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม PASAN Solar Simulator
2. ห้องทดสอบที่เป็นห้องมืดดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีม่านสีดำหรือฉากสีดำอยู่ในตำแหน่งระหว่างหลอดกับระนาบทดสอบ เพื่อลดการสะท้อนแสง
3. เซลล์โฟโตโวลตาอิกอ้างอิง (Photovoltaic Reference Device)
4. ตัวจับยึดแผงที่ถูกทดสอบ วางอยู่ระนาบเดียวกันอุปกรณ์อ้างอิงและตั้งฉากกับรัศมีทางแสง
5. ตัวฝ้าตรวจอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงทดสอบ และอุปกรณ์อ้างอิง มีความถูกต้อง  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  และสามารถตรวจซ้ำได้ถึง  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
6. อุปกรณ์วัดกระแสและแรงดันสำหรับแผงทดสอบและอุปกรณ์อ้างอิง มีความถูกต้อง  $\pm 0.2\%$
7. อิเล็กทรอนิกส์โหลดที่การเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลัดวงจรจนถึงเปิดวงจร ภายใต้อุณหภูมิที่เสถียรภาพ  $\pm 1\%$  ภายในเวลา 1/100 วินาที

### ขั้นตอนการทดสอบ

การวัดกราฟกระแส-แรงดันของแผง มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการวัดกราฟกระแส-แรงดันและการหาความสัมพันธ์กับลักษณะการเสื่อมสภาพ

### การวิเคราะห์สมรรถนะทางไฟฟ้าของแผง

จากแผง 116 แผงที่เห็นการเสื่อมสภาพภายนอกชัดเจน เลือกแผง 32 แผงที่กราฟกระแสแรงดันเปลี่ยนรูปร่างชัดเจนจากกราฟปกติ เช่นกราฟกระแสแรงดันเป็นเส้นตรงแทนที่เป็นเส้นโค้งต่อเนื่อง (Continuous) กราฟมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) นำมาวิเคราะห์ต่อไปอีก 3 ประเด็นคือ

1. พารามิเตอร์ของแผง ได้แก่  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $P_{max}$ ,  $FF$ ,  $R_s$  และ  $R_{sh}$
2. ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะกราฟกระแส-แรงดันของแผง กับลักษณะการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงที่สังเกตได้ด้วยตา ในแง่ของการเปลี่ยนสี การลอกกร่อน และการกัดกร่อน

### 3.4 การทดสอบฉนวนของแผงด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรง

#### จุดประสงค์

เพื่อทดสอบสภาพการฉนวนของแผง ระหว่างส่วนของแผงที่นำกระแส กับโครงหรือส่วนที่อยู่รอบ

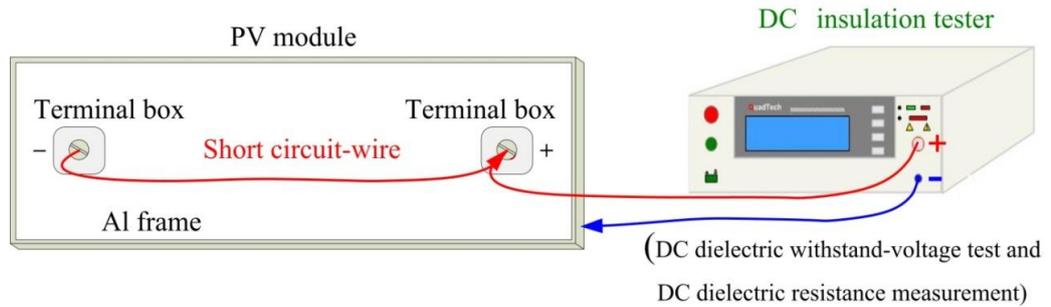
#### วัสดุและอุปกรณ์

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 116 แผง
2. ฐานฉนวนรองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 3. เครื่องวัดความต้านทานฉนวน

#### เงื่อนไขในการทดสอบ

ทำการทดสอบแ่งตาม IEC 61215 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 75%



รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรการต่อระหว่างแ่งกับเครื่องทดสอบฉนวน

#### ผลที่ต้องการในการทดสอบ

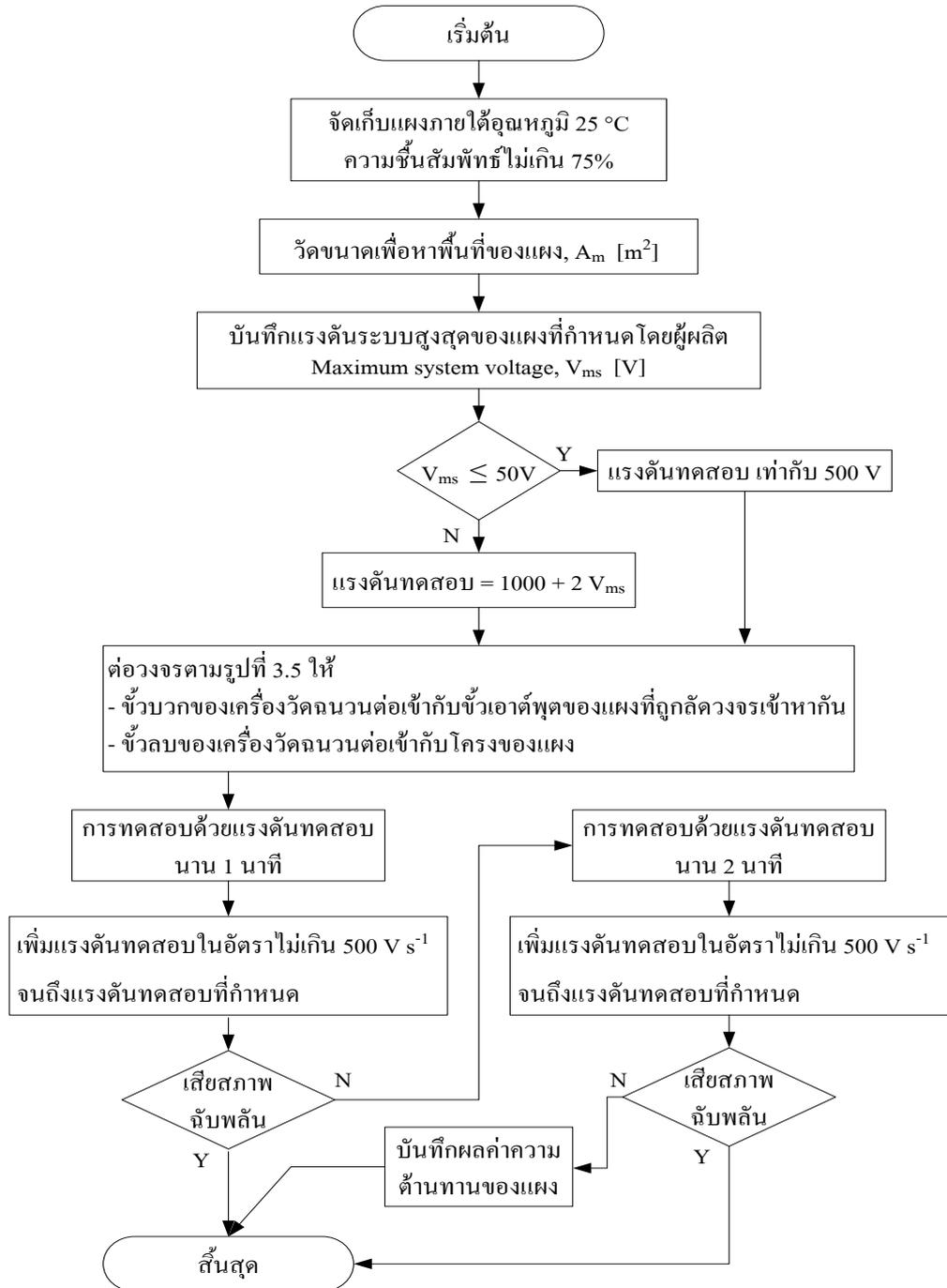
1. ไม่เกิดการเสียหายฉลัปล้นทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Breakdown) หรือเกิดเป็นร่องรอยทางเดินที่ผิว (Surface Tracking) ในช่วงการทดสอบ
2. แ่งที่มีพื้นที่น้อยกว่า 0.1 m<sup>2</sup> ค่าความต้านทานฉนวนควรจะไม่น้อยกว่า 400 MΩ
3. แ่งที่มีพื้นที่มากกว่า 0.1 m<sup>2</sup> ค่าความต้านทานฉนวนที่วัดได้คูณกับพื้นที่ของแ่ง ไม่ควรน้อยกว่า 40 MΩ·m<sup>2</sup>

#### การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของแ่ง

1. ใช้หลักสถิติวิเคราะห์ผลค่าความต้านทานฉนวนของแ่ง หาค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในแต่ละกลุ่มแ่ง
2. จัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉนวน กับลักษณะการเสื่อมสภาพภายนอกของแ่ง โดยการ
  - : แบ่งค่าความต้านทานฉนวนของแ่ง ออกเป็นช่วง จากน้อยไปมาก
  - : หาสัมพันธ์กับการเสื่อมสภาพด้านหน้าแ่ง ซึ่งประกอบด้วย การเปลี่ยนสี การลอกกร่อน และการกัดกร่อน
  - : หาค่าความสัมพันธ์กับการเสื่อมสภาพด้านหลังแ่ง ซึ่งประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กตริกปิดหลัง และไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนขอบแ่ง
3. วิเคราะห์การกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับโครงแ่ง เพื่อหาบริเวณที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งมีโอกาสเกิดการรั่วไหลของกระแสมากที่สุด

4. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงบริเวณขอบแผง ซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุหุ้มฉนวนคือ กระจก อีวีเอ แผ่นปิดหลัง และ ไดโอดีล็กทริกหุ้มฉนวนขอบแผง

### ขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของแผง

### 3.5 การทดสอบจนวนของแผงและแบบจำลองแผงภายใต้แรงดันอิมพัลส์

หัวข้อนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ (1) การจนวนทดสอบจนวนของแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์ (2) การเลียนแบบการทดสอบแรงดันอิมพัลส์กับแผงด้วยแบบจำลองจนวนและสายส่ง มีรายละเอียดคังต่อไปนี้

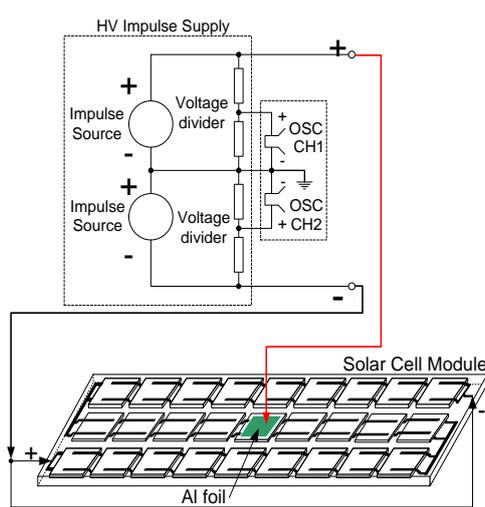
#### 3.5.1 การจนวนทดสอบจนวนของแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์

##### จุดประสงค์

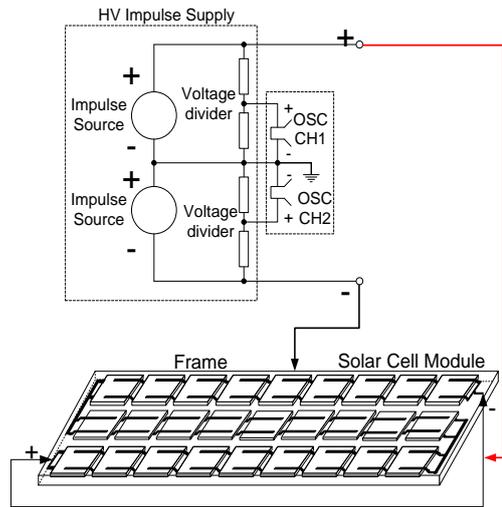
เพื่อยืนยันสภาพการจนวนของแผงว่าคังทนต่อแรงดันเกินที่เกิดจากสภาพบรรยากาศได้ โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เลียนแบบรูปคลื่นแรงดันเกินฟ้าผ่า 1.2/50 $\mu$ s ป้อนให้กับแผง

##### วัสดุอุปกรณ์และเครื่องวัด

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. ออสซิลโลสโคป
3. ชุดสายวัด
4. แผงเซลล์แสงอาทิตย์จนวน 5 แผง
5. แท่นรองแผงเซลล์แสงอาทิตย์



(ก) การต่อขั้วต่อสายป้อนเข้าด้านหน้าแผง

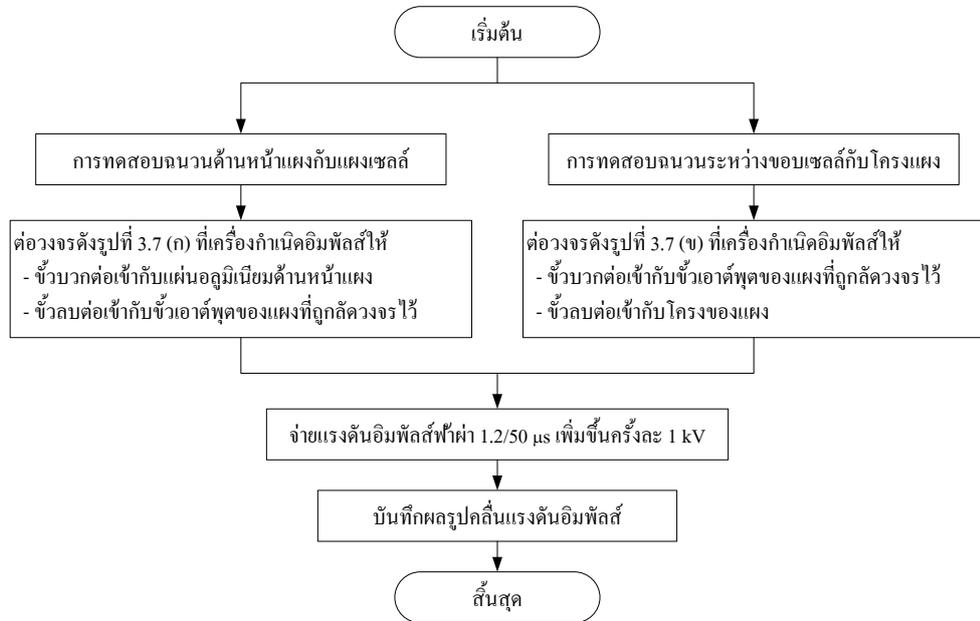


(ข) การต่อขั้วต่อสายป้อนเข้าโครงขอบแผง

รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการต่อเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับทดสอบแผงด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า

**ขั้นตอนการทดลอง**

ทดสอบจนวนของแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์มีการทดลองตามแผนภาพดังรูปที่ 3.8 ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบจนวนด้านหน้าแผงและการทดสอบจนวนระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง ภายใต้รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า



**รูปที่ 3.8** ขั้นตอนการทดสอบจนวนของแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์

**การวิเคราะห์ผลการทดสอบแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์**

วิเคราะห์ผลการทดสอบและเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์กับลักษณะการเสื่อมสภาพของแผง

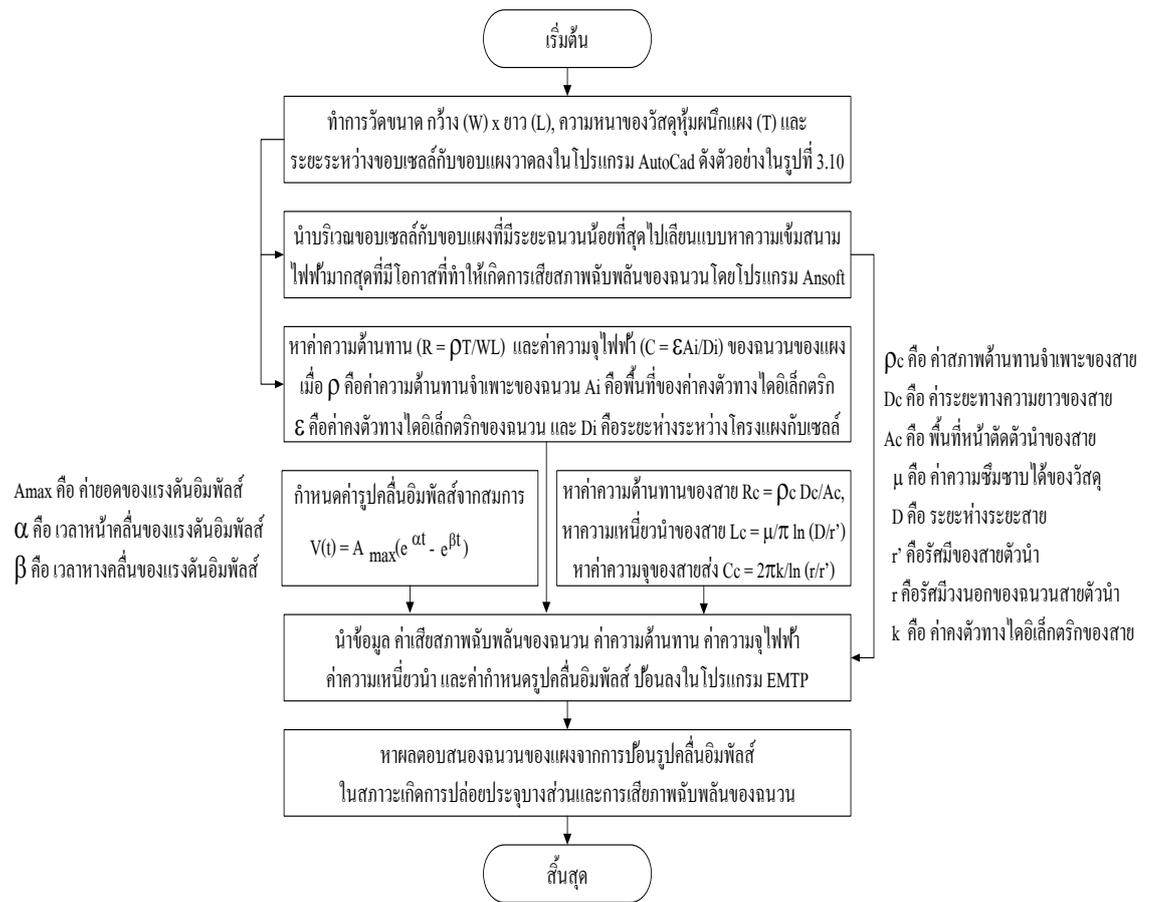
**3.5.2 การเลียนแบบการทดสอบแผงด้วยแรงดันอิมพัลส์โดยแบบจำลองจนวนและสายส่งจุดประสงค์**

- (1) เพื่อจำลองผลการตอบสนองต่อแรงดันอิมพัลส์ของแผงที่เสื่อมสภาพแตกต่างกัน เทียบกับรูปคลื่นอิมพัลส์ที่วัดได้จริง
- (2) เพื่อทำนายสถานะที่อาจจะเกิดการปล่อยประจุบางส่วน หรือการเสียดสภาพฉนวนของจนวนภายใต้แรงดันทดสอบแบบอิมพัลส์

**วัสดุและอุปกรณ์**

- 1. คอมพิวเตอร์ Pentium IV, >1 GHz หรือดีกว่า
- 2. โปรแกรม AutoCad
- 3. โปรแกรม Ansoft: Maxwell<sup>®</sup> 2D Electrostatic Problem
- 4. โปรแกรม Electromagnetic Transient Program (EMTP)

ขั้นตอนการทำโมเดลลิงแมงด้วยแบบจำลองทางไฟฟ้าภายใต้แรงดันทดสอบอิมพัลส์



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเขียนแบบด้วยแบบจำลองของแมงภายใต้แรงดันทดสอบแบบอิมพัลส์

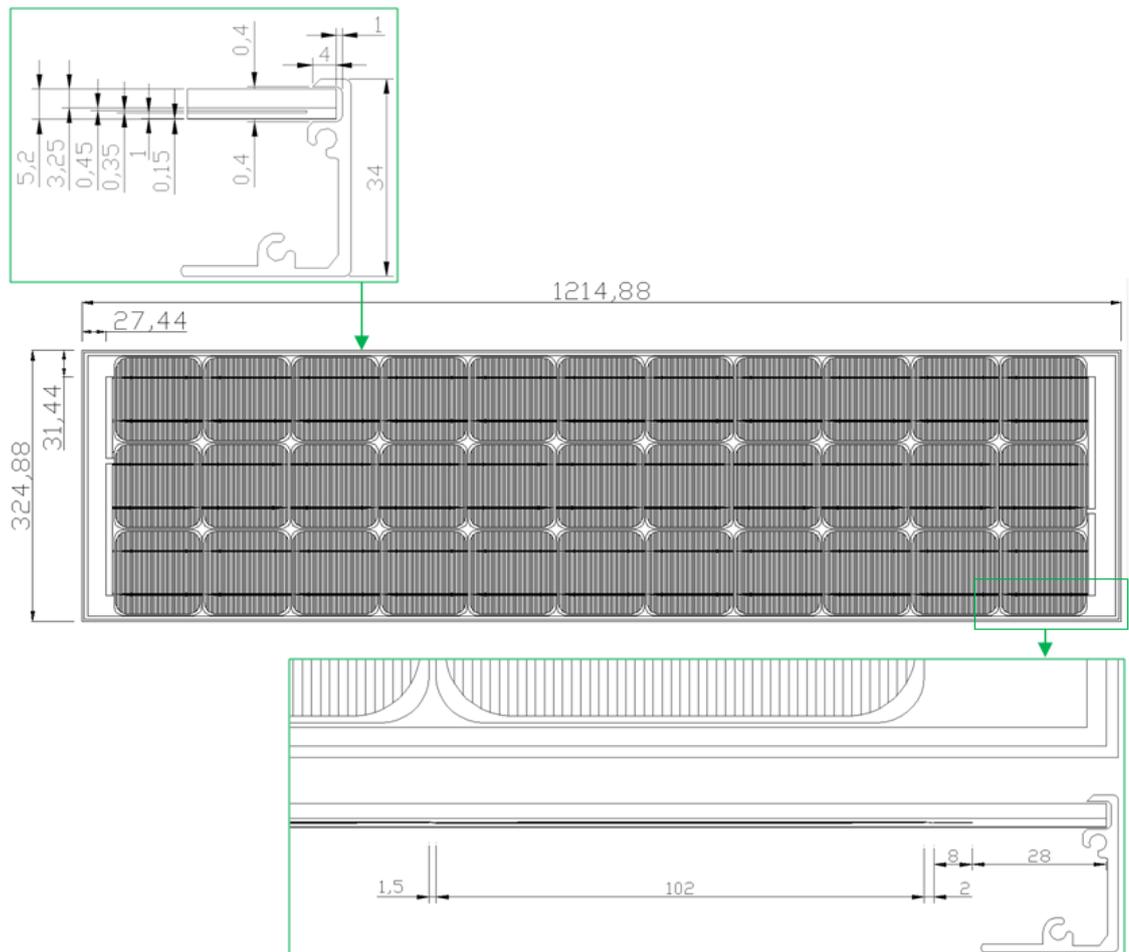
จากรูปที่ 3.9 ในส่วนของแบบจำลองของแมงซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองสายส่งและแบบจำลองฉนวนบริเวณขอบแมงนั้น สามารถหาดังต่อไปนี้

ค่าความต้านทานสายตัวนำของสายตัวนำ เมื่อ  $\rho_c$  เป็นค่าสภาพต้านทานจำเพาะของตัวนำทองแดงมีค่าเท่ากับ  $17 \times 10^{-9} \Omega.m$  [47] หากคิดความยาวสายต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ 1 เมตร และมีพื้นที่หน้าตัดของสายเท่ากับ  $3-4 \text{ mm}^2$  จึงได้ค่าความต้านทานของตัวนำประมาณ  $5.2 \text{ m}\Omega/m$  [47]

ค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำ เมื่อ  $\mu_0$  คือค่าซาบซึมได้ของสุญญากาศ (Vacuum Permeability) เท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  และค่าซาบซึมได้สัมพัทธ์ของทองแดง ( $\mu_{r,cu}$ ) เท่ากับ 0.99999 [47] ดังนั้นค่าซาบซึมได้ของทองแดง  $\mu_{cu}$  ประมาณ  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  หากสายมีรัศมีของตัวนำ ( $r'$ ) เท่ากับ 1.125 mm

และวางห่างกัน (D) 10 cm ได้ค่าความเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ 1 เมตร คือ  $4 \times 10^{-7} \ln(10/0.1125)$  เท่ากับ 1.8  $\mu\text{H/m}$

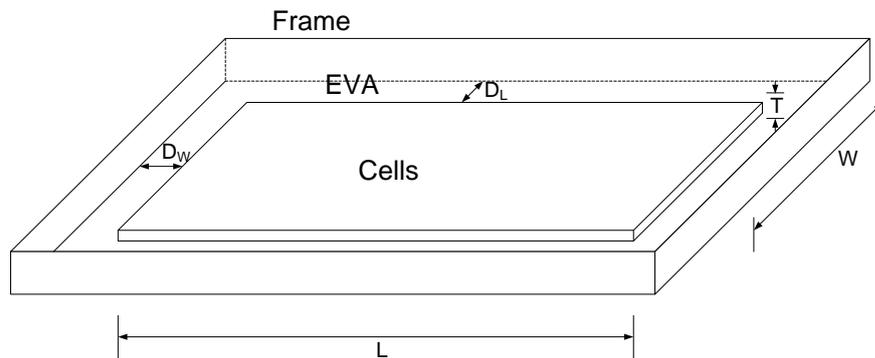
ค่าความจุไฟฟ้าของสายตัวนำ  $k_0$  คือค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (Vacuum Permittivity) เท่ากับ  $1/36\pi \times 10^{-9} \text{ F/m}$  [47] และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสาย ( $k_{r\_pvc}$ ) เท่ากับ 3 [31] ดังนั้นค่าสภาพยอมของสาย  $k$  ประมาณ  $1/12\pi \times 10^{-9} \text{ F/m}$  หากสายมีรัศมีของตัวนำ ( $r'$ ) เท่ากับ 1.125 mm และรัศมีวงนอกของฉนวนตัวนำ ( $r$ ) เท่ากับ 2.42 mm จึงได้ค่าความจุของสายตัวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวคือ  $10^{-9}/(6 \times \ln(2.42/1.125))$  เท่ากับ 0.2176 pF/m ในกรณีที่สายตัวนำมีระยะสั้นพออาจจะไม่จำเป็นต้องนำค่าความจุของสายตัวนำมาพิจารณา ตามหลักการของแบบจำลองสายส่งระยะสั้น



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างขนาด ระยะห่าง และความหนาของวัสดุฉนวนต่างๆ ของแผง

ค่าความต้านทานฉนวนของแผงบริเวณขอบกับ โครงแผงที่เกิดการเสื่อมสภาพ จากการวัดพบว่าค่าความต้านทานฉนวนมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับ การเสื่อมสภาพของแผง ดังนั้นในการทำโมเดลถึง

จนวนที่ขอบแผง เมื่อพิจารณาในแง่ดีจึงกำหนดให้ค่าความต้านทานจนวนของแผงที่มาจากคาร์บอนมีค่าสูงประมาณ  $10 \text{ G}\Omega$  อย่างไรก็ตาม หากต้องการทราบค่าความต้านทานจนวนของแผง ( $R_{pv}$ ) สามารถหาได้จาก  $R_{pv} = \rho T/WL$  ซึ่งในการทำโมเดลแผง หากพิจารณากระจกหนาประมาณ  $5 \text{ mm}$  มีการเชื่อมสภาพน้อยและมีค่าความต้านทานสูงกว่าอีวีเอมาก ๆ จึงประมาณค่าความต้านทานแผงที่เชื่อมสภาพได้โดยวัดค่า  $\rho$  ของอีวีเอในแผงที่เชื่อมสภาพได้ประมาณ  $1 \times 10^{14} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$  เมื่อแผงกว้าง ( $W$ ) เท่ากับ  $315.88 \text{ mm}$  ยาว ( $L$ ) เท่ากับ  $1160 \text{ mm}$  และความหนาของวัสดุอีวีเอ ( $T$ ) เท่ากับ  $1.8 \text{ mm}$  จะได้  $R_{pv}$  ประมาณ  $5 \text{ G}\Omega$



รูปที่ 3.11 ระยะเวลาต่างๆ ของแผงสำหรับหาค่าความจุไฟฟ้าของจนวนระหว่างเซลล์กับขอบแผง

สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของจนวนในกรณีทำโมเดลถึงภายใต้แรงดันอิมพัลส์ เพื่อทดสอบความคงทนต่อแรงดันและการตอบสนองต่อแรงดันอิมพัลส์ของจนวน โดยคิดเฉพาะวัสดุที่เป็นอีวีเอบริเวณเซลล์กับโครงขอบแผง ซึ่งมีโอกาสเกิดการปล่อยประจุบางส่วนหรือเสียดสภาพฉนวนของจนวนมากที่สุด มีวิธีการหาค่าความจุตามขนาดของแผงตามรูปที่ 3.11 ซึ่งอาศัยพื้นฐานของสมการ  $C = \epsilon A/D_i$  จึงเขียนสมการได้เป็น

$$C_{edge} = \frac{\epsilon_{r,EVA} \times 10^{-9}}{18\pi} T \left( \frac{W}{D_W} + \frac{L}{D_L} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\epsilon_{r,EVA}$  คือค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกของอีวีเอมีค่าเท่ากับ 2.65 [47] จึงหาค่าความจุไฟฟ้าของจนวนได้คือ

$$C_{edge} = \frac{2.65 \times 10^{-9}}{18\pi} 1.8 \times 10^{-3} \left( \frac{315.88}{28} + \frac{1160}{9} \right) = 12 \text{ pF}$$

การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงด้วยแบบจำลองจนวนของแผงภายใต้แรงดันทดสอบแบบอิมพัลส์

1. เปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการเปลี่ยนแปลงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบแรงดันอิมพัลส์จริง
2. วิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันแบบอิมพัลส์ภายใต้สภาวะการปล่อยประจุบางส่วนและการเสียสภาพฉนวนในจนวนของแผง

### 3.6 การวัดสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นหุ้มฉนวนที่เสื่อมสภาพต่างกัน

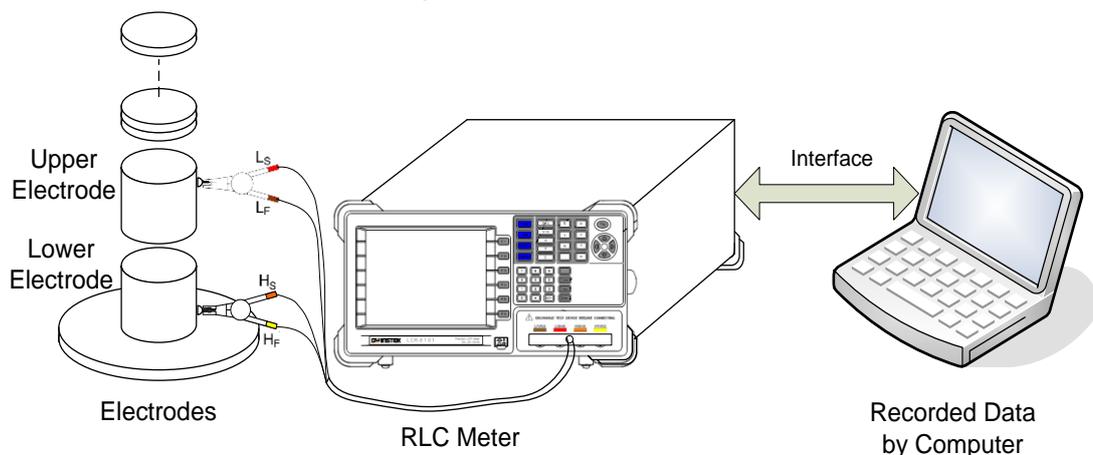
#### 3.6.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวัสดุหุ้มฉนวน

##### จุดประสงค์

เพื่อวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละชนิด (อีวีเอด้านหน้าเซลล์ และแผ่นปิดหลัง) จากแผงที่เสื่อมสภาพ

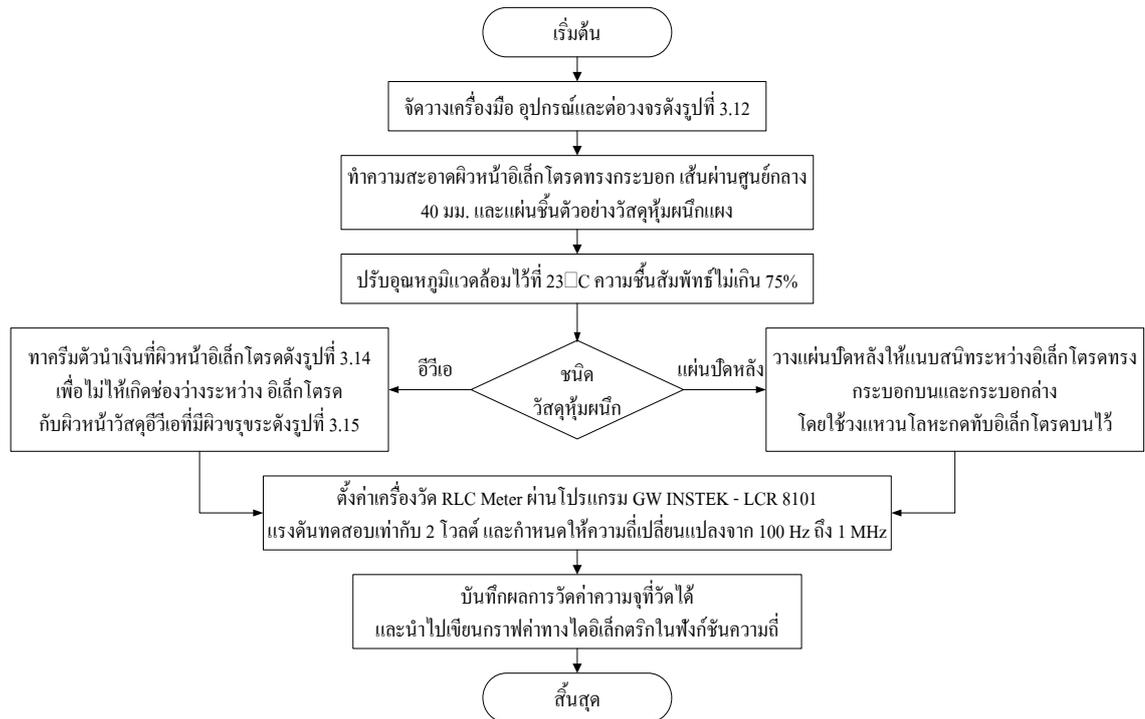
##### วัสดุอุปกรณ์และเครื่องวัด

1. วัสดุไดอิเล็กทริกจากแผง B2 ถึง B7
2. ชุดอิเล็กโตรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม.
3. เครื่องวัด Precision LCR Meter ยี่ห้อ GW INSTRON รุ่น 8101
4. คริมตัวนำเงิน
5. ชุดเชื่อมต่อ RS232 to USB Port
6. คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลที่วัดได้



รูปที่ 3.12 แผนภาพชุดอิเล็กโตรดพร้อมเครื่องวัดสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า

ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการวัดหาค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวัสดุหุ้มฉนวน



(ก) อิเล็กโทรดล่าง

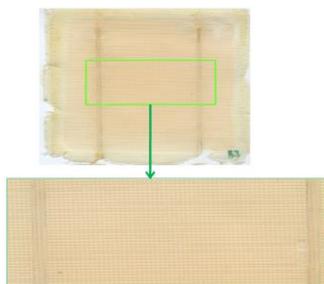


(ข) อิเล็กโทรดบน

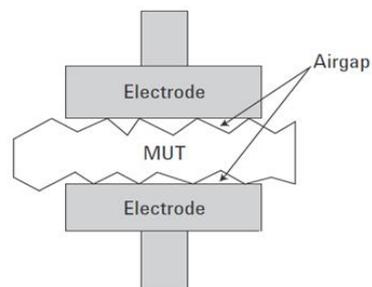


(ค) การเชื่อมต่อสายไปยังเครื่องวัด

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการทาสีเงินบนผิวหน้าของอิเล็กโทรดและอีวีเอที่เชื่อมสภาพ



(ก) ผิวหน้าที่ขรุขระของอีวีเอ



(ข) ช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรดและอีวีเอ

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างลักษณะผิวหน้าของอีวีเอที่เชื่อมสภาพและช่องว่างอากาศบนผิวอีวีเอ

**การวิเคราะห์ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวัสดุ**

1. จากข้อมูลจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าของกระจก อีวีเอ และแผ่นปิดหลัง จากแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพ B2 ถึง B7 พล็อตกราฟค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับความถี่ตั้งแต่ 100 Hz ถึง 1 MHz
2. วิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของกระจก อีวีเอ และแผ่นปิดหลัง จากแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพ B2 ถึง B7 เทียบกับตามความถี่

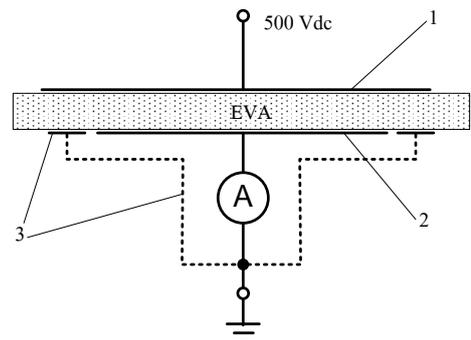
**3.6.2 การวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของชิ้นตัวอย่างอีวีเอ**

**จุดประสงค์**

เพื่อทดสอบอีวีเอวัสดุแบบไม่ทำลาย โดยการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันคงที่ และวัดค่ากระแสที่รั่วไหล เพื่อหาค่าสภาพความต้านทานของชิ้นตัวอย่างอีวีเอที่มีลักษณะเสื่อมสภาพที่แตกต่างกัน

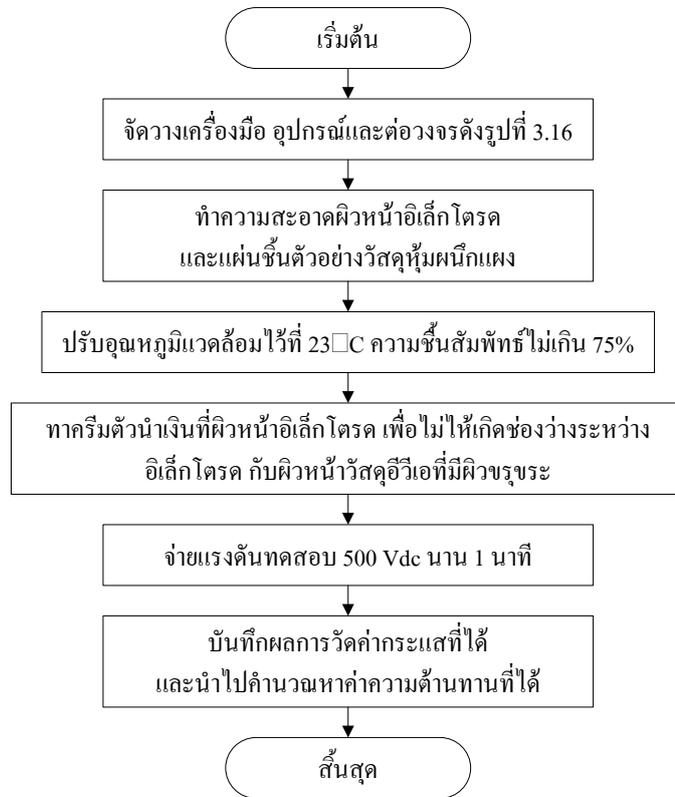
**วัสดุอุปกรณ์และเครื่องวัด**

1. ชุดอิเล็กทรอนิกส์หือ Keithley รุ่น 6105
2. แหล่งจ่ายแรงดันสูงหือ Keithley รุ่น 247
3. อิเล็กโตรมิเตอร์หือ Keithley รุ่น 617
4. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ
5. เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์
6. ไมโครมิเตอร์



(ก) ชุดอิเล็กทรอนิกส์หือ Keithley รุ่น 6105      (ข) วงจรการต่อของชุดอิเล็กทรอนิกส์  
 1 อิเล็กโตรดแรงดันไฟสูง, 2 อิเล็กโตรดการวัด, 3 อิเล็กโตรดวงแหวนป้องกันและตัวกัน  
**รูปที่ 3.16** การจัดเรียงอิเล็กโตรดเพื่อหาสภาพต้านทานของอีวีเอด้วยแรงดันไฟตรง

ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการวัดหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของขึ้นตัวอย่างอีวีเอ

การวิเคราะห์ผลการวัดค่าสภาพต้านทานของอีวีเอ

1. จากข้อมูลจากการวัดค่าสภาพต้านทานของแผ่นอีวีเอ จากแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพ B2 ถึง B7 พล็อตกราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผงกับค่าความต้านทานของอีวีเอ
2. วิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานของอีวีเอ กับค่าความต้านทานแผง จากแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพ B2 ถึง B7

3.6.3 การหาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของแผ่นอีวีเอที่เสื่อมสภาพ

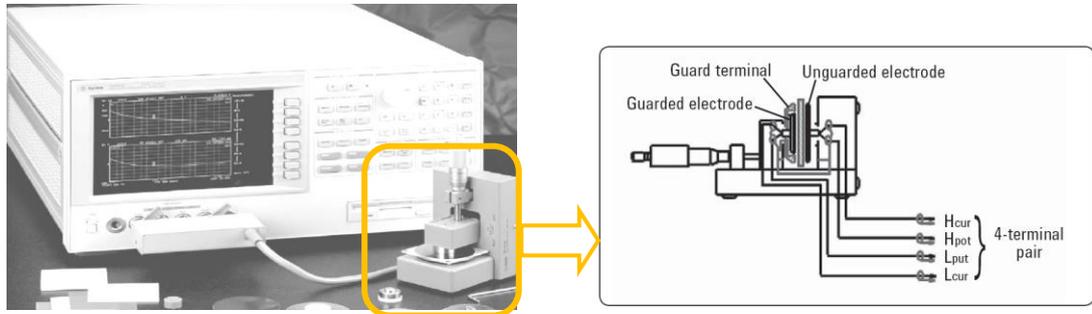
จุดประสงค์

เพื่อหาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนช่วงความถี่ 1 kHz - 1 MHz ของแผ่นอีวีเอที่เสื่อมสภาพแตกต่างกัน

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องวัด

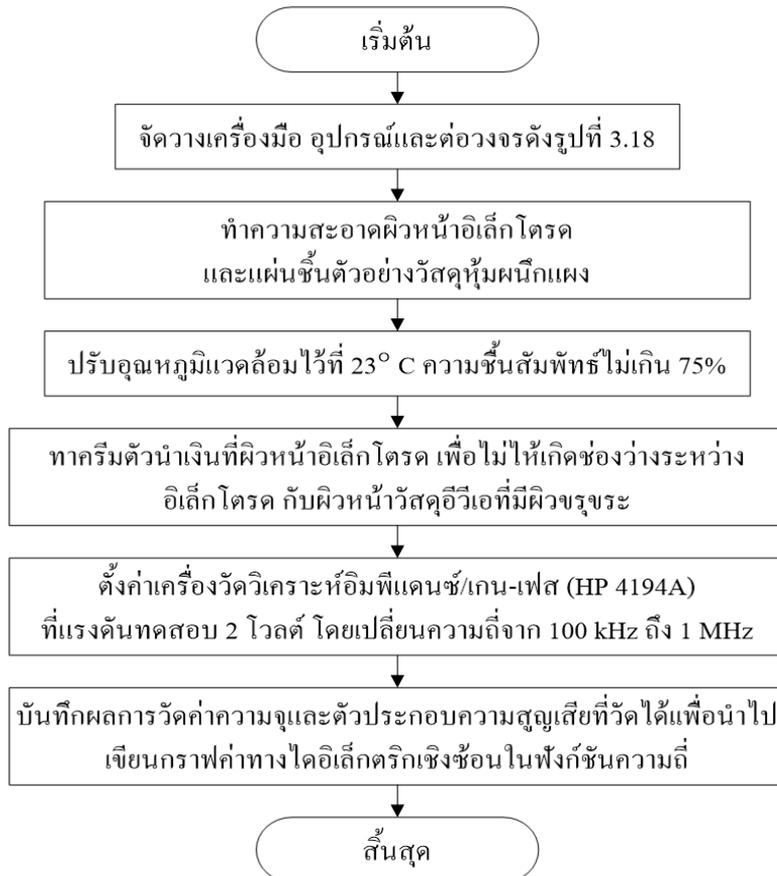
1. เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์/เกน-เฟส (HP 4194A)
2. ชุดจับยึดแผ่นไดอิเล็กตริก (HP 16451B)

3. แผ่นอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.
4. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ
5. เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์



(ก) เครื่องวิเคราะห์หือิมพีแดนซ์/เกน-เฟส (ข) ชุดจับยึดแผ่นไดอิเล็กตริก และแผ่นอิเล็กโทรดการวัด  
**รูปที่ 3.18** เครื่องวัดหาค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบความสูญเสียของอีวีเอ

**ขั้นตอนการทดลอง**



**รูปที่ 3.19** ขั้นตอนการทดสอบหาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของแผ่นอีวีเอที่เสื่อมสภาพ

### การวิเคราะห์ผลการหาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของชั้นตัวอย่างอีวีเอ

1. จากข้อมูลจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบความสูญเสียของแผ่นวัสดุอีวีเอ จากแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพ B2 ถึง B7 ที่อุณหภูมิห้อง 23°C พล็อตกราฟที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ตั้งแต่ 1 kHz-1 MHz
2. คำนวณหาค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพของแผ่นวัสดุอีวีเอที่เสื่อมสภาพจากแผง B2 ถึง B7 ระหว่างความถี่ 1 kHz-1 MHz โดยใช้สมการค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกของส่วนจริง ( $\epsilon_r$ ) ต่อไปนี้

$$\epsilon_r = \frac{tC}{A\epsilon_0} \cos(\tan^{-1}(tg \delta)) \quad (3.2)$$

ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกของส่วนจินตภาพ ( $\epsilon_r'$ )

$$\epsilon_r' = \frac{tC}{A\epsilon_0} \sin(\tan^{-1}(tg \delta)) \quad (3.3)$$

เมื่อ  $t$  คือ ความหนาของแผ่นอีวีเอ

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวัสดุอีวีเอที่ได้จากการวัด

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโตรด

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ

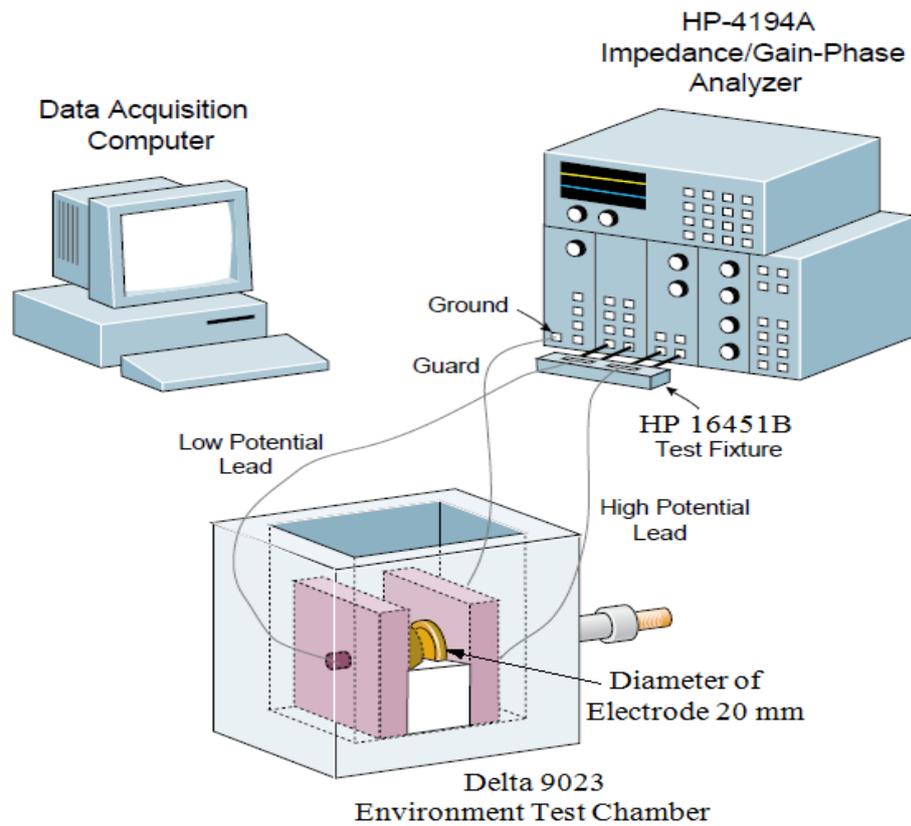
$tg \delta$  คือ ตัวประกอบความสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของแผ่นวัสดุอีวีเอที่ได้จากการวัด

3. จากข้อมูลค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ของแผ่นวัสดุอีวีเอจากแผง B2 ถึง B7 พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริก ที่เป็นฟังก์ชันความถี่ในช่วง 1 kHz – 10 MHz
4. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ของแผ่นวัสดุอีวีเอจากแผง B2 ถึง B7 ที่เป็นฟังก์ชันความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz

### 3.6.4 การวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบความสูญเสียในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิของชั้นตัวอย่างอีวีเอ

#### จุดประสงค์

การทดสอบนี้ต้องการหาค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบความสูญเสีย ในชั้นตัวอย่างอีวีเอของแผงที่อีวีเอด้านหน้าเสื่อมสภาพมากที่สุดคือ อีวีเอเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองถึงน้ำตาล และอีวีเอหลุดลอกที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์

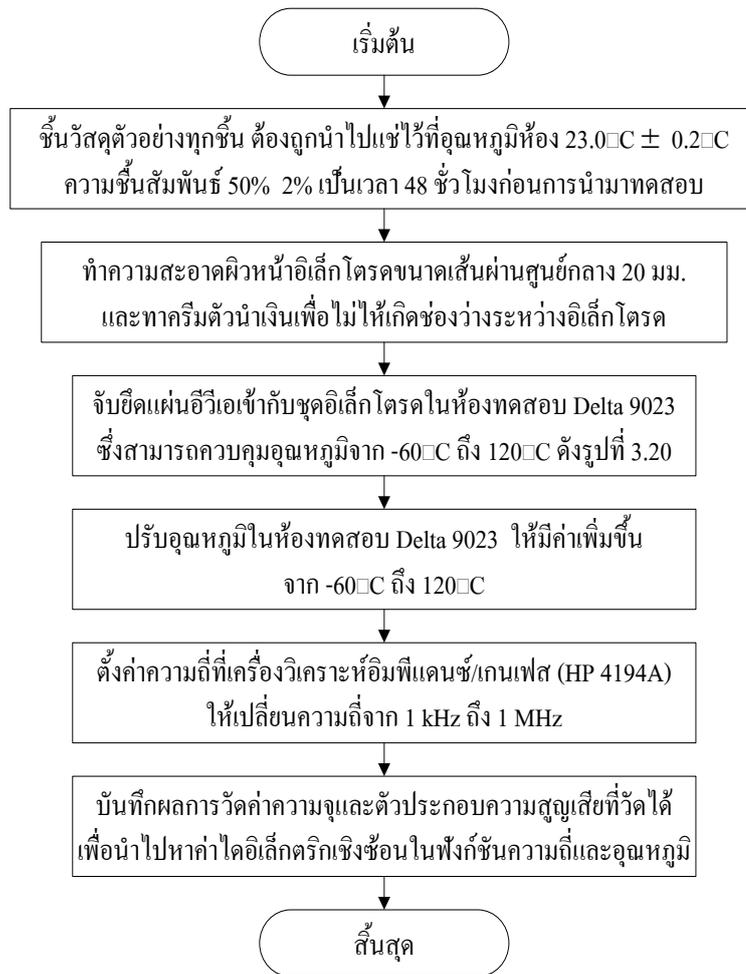


รูปที่ 3.20 แผนภาพแสดงการต่อเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับวัดค่าความจุและตัวประกอบความสูญเสียตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

### วัสดุอุปกรณ์และเครื่องวัด

1. เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์/เกน-เฟส (HP 4194A)
2. ชุดจับยึดแผ่นไดอิเล็กตริก (HP 16451B)
3. ห้องทดสอบสภาพแวดล้อม (Delta 9023) สามารถควบคุมอุณหภูมิภายใน  $-60^{\circ}\text{C}$  ถึง  $120^{\circ}\text{C}$
4. อิเล็กโตรดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.
5. ไนโตรเจนเหลว
6. ขดลวดทำความร้อน
7. ครีมตัวนำเงิน
8. คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลที่วัดได้

### ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการทดสอบแผ่นอีวีเอเพื่อหาไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ

### การวิเคราะห์ผลจากการวัดขึ้นตัวอย่างอีวีเอในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ

1. จากข้อมูลการวัดค่าความจุไฟฟ้าและตัวประกอบความสูญเสียของแผ่นวัสดุอีวีเอ ที่อุณหภูมิ  $-60^{\circ}\text{C}$  ถึง  $120^{\circ}\text{C}$  กับความถี่ 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 500 kHz และ 1 MHz กำหนดหาค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ตามสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2)
2. นำผลจากการกำหนดหาค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ของแผ่นวัสดุอีวีเอ B2 ถึง B7 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริก ที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ที่ทดสอบ
3. วิเคราะห์ผลจากกราฟที่ได้ และเปรียบเทียบกับกราฟหาค่าคงที่ของอีวีเอด้านหน้าแผง

## บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

### 4.1 บทนำ

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีวิจัยในบทที่ 3 ประกอบด้วยเนื้อหา 5 ส่วนคือ

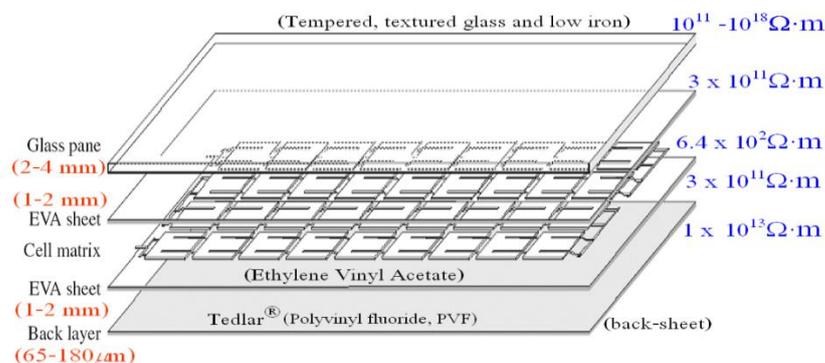
1. การตรวจสอบการเสื่อมสภาพภายนอกที่สังเกตเห็นได้ด้วยตา
2. การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผง
3. การทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวนของแผง
4. การทดสอบและการเลียนแบบด้วยแบบจำลองฉนวนและสายส่งของแผงภายใต้สนามไฟฟ้าแบบอิมพัลส์
5. การวัดสมบัติทางไดอิเล็กตริกของแผ่นวัสดุหุ้มฉนวนแผงที่มีการเสื่อมสภาพแตกต่างกัน

### 4.2 การตรวจสอบและการเสื่อมสภาพภายนอกแผงที่สังเกตเห็นได้ด้วยตา

#### 4.2.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของชั้นไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนแผง

แผงที่ใช้งานในภาคสนาม 116 แผง มีการเสื่อมสภาพต่างกัน รวบรวมแผงจาก 3 แหล่งคือ

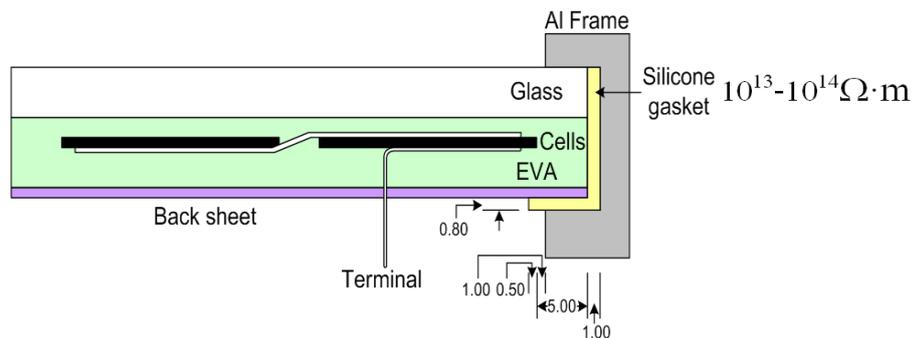
1. แผงที่ใช้งานโครงการ มจร. (ในทศวรรษ 2530) ในจังหวัดบุรีรัมย์ 35 แผง และโครงการอีสานเขียว 4 แผง ใช้งานมาไม่น้อยกว่า 15 ปี เป็นแบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon) 39 แผง
2. แผงที่ใช้งานในวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย ใช้งานมาไม่น้อยกว่า 5 ปี เป็นแบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว 37 แผง
3. แผงของ พพ. กระทรวงพลังงาน จากตำบล บ้านโสก อำเภอ ดอนสวรรค์ จังหวัด ชัยภูมิ ใช้งานมาไม่น้อยกว่า 5 ปี เป็นแบบซิลิกอนหลายผลึก (Poly-crystalline Silicon) 40 แผง



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของชั้นไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนแผง

โครงสร้างของชั้นไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากทั้ง 3 แหล่งคล้ายคลึงกันคือมี กระจก-อีวีเอ-เซลล์แสงอาทิตย์-อีวีเอ-แผ่นปิดหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 เนื่องจากฉนวนหุ้มฉนวนประกอบด้วยไดอิเล็กตริกหลายชนิด ทำให้สภาพต้านทานของฉนวนหุ้มฉนวนมีหลายค่าแตกต่างกัน การหาค่าความต้านทานรวมและแบบจำลองของฉนวนหุ้มฉนวนมีความซับซ้อน เมื่อนำไปคิดรวมกับกาวฉนวนที่อยู่ระหว่างขอบแผ่นกับโครงแผงดังรูปที่ 4.2 ยิ่งทำให้โครงสร้างการฉนวนซับซ้อนมากขึ้น จะนำไปกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.2 การฉนวนระหว่างแผงกับโครงอะลูมิเนียม

#### 4.2.2 การแบ่งแผงตามบริษัทผู้ผลิตและรุ่น

การแบ่งตามผู้ผลิตและรุ่นของแผงแสดงดังตารางที่ 4.1 ผลิตจาก 4 บริษัท และมีรายละเอียดต่อไปนี้

(1) บริษัท Solartron ประกอบด้วย

- รุ่น Model M75/S47 ใช้ในจังหวัดบุรีรัมย์ 33 แผง
- รุ่น Model M60 ใช้ในพื้นที่โครงการอีสานเขียว 3 แผง, วัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร 20 แผง
- รุ่น Model M55/S53 ใช้ในกรุงเทพมหานคร 1 แผง, วัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร 3 แผง
- รุ่น Model M75 ใช้ที่วัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร 10 แผง

(2) บริษัท Showa Arco

- รุ่น Model GL133/M75 ใช้ในกรุงเทพมหานคร 2 แผง

(3) บริษัท Crystalline Silicon Photovoltaic Module (X-Si PV China )

- รุ่น Model JDG-M จากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร และยังไม่ได้ถูกใช้งาน 4 แผง

(4) บริษัท Sharp

- รุ่น Model NE 1175E1 ใช้ในจังหวัดชัยภูมิ 40 แผง

ตารางที่ 4.1 ผู้ผลิตและรุ่นของแผงที่นำมาศึกษาเรื่องไดโอดีทรานซิสเตอร์

Solartron		Showa Arco		X-Si PV China		Sharp	
Model	จำนวนแผง	Model	จำนวนแผง	Model	จำนวนแผง	Model	จำนวนแผง
M75/S47	33	GL113/M75	2	JDG-M	4	NE 1175E1	40
M60	23						
M55/S53	4						
M75	10						
รวม	70	รวม	2	รวม	4	รวม	40
รวมแผงที่นำมาศึกษาในโครงการนี้มีทั้งสิ้น 116 แผง							

### 4.2.3 การแบ่งแผงตามรายละเอียดที่ระบุ

รายละเอียดที่ระบุของแต่ละบริษัทแสดงดังตารางที่ 4.2 ถัดออกมาจากแผ่นป้ายชื่อ (Name Plate) ด้านหลังของแผง ซึ่งประกอบด้วยกำลัง ไฟฟ้าสูงสุด (Pm), กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Im), แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Vm), กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Isc), แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) และแรงดันสูงสุดของระบบการทำงาน (Vsys) ส่วนจำนวนของเซลล์ทั้งหมดในหนึ่งแผง (Nc), พื้นที่ต่อหนึ่งเซลล์ (Ac) และพื้นที่แผง (Am) ได้จากการนับและการวัดด้วยตลับเมตรตามลำดับ

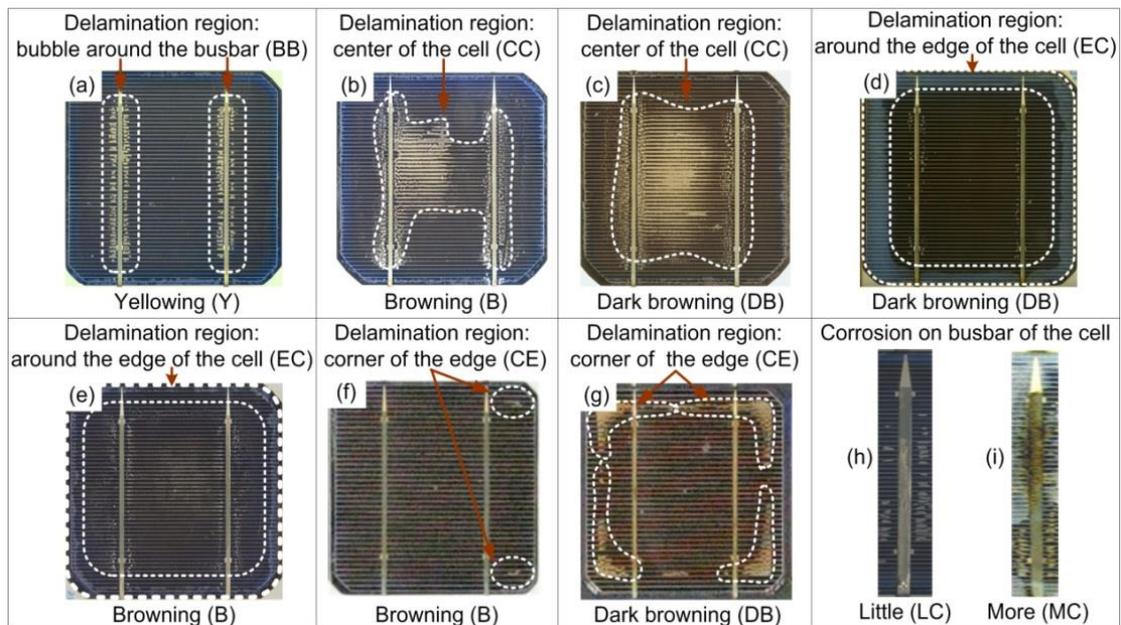
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดที่ระบุของแต่ละบริษัท

รายละเอียดที่ระบุ บริษัทผู้ผลิต/รุ่น	Pm (W)	Im (A)	Vm (V)	Isc (A)	Voc (V)	Vsys (V)	Nc (R x C)	Ac (cm x cm)	Am (cm x cm)
<b>Solartron</b>									
M75/S47	47.0	2.94	16.0	3.27	19.9	-	3 x 11	10.0 x 10.0	32.5 x 121.5
M60	60.0	3.25	18.5	3.60	22.5	-	3 x 12	10.0 x 10.0	33.0 x 129.0
M55/S53	53.0	3.05	17.4	3.27	21.8	-	3 x 12	10.2 x 10.2	33.0 x 129.0
M75	75.0	4.40	17.0	4.80	22.0	-	4 x 9	10.4 x 10.4	32.5 x 121.8
<b>Showa Arco</b>									
GL133/M75	47.0	2.94	16.0	3.27	19.9	-	3 x 11	10.2 x 10.2	32.5 x 121.5
<b>X-Si PV China</b>									
JDG-M	75.0	-	16.5	-	21.0	900	4 x 9	12.5 x 12.5	53.2 x 117.8
<b>Sharp</b>									
NE 1175E1	75.0	4.58	16.4	-	-	-	4 x 9	12.3 x 12.3	53.0 x 122.0

วงจรของเซลล์ภายในแผงทั้ง 116 แผง ต่อเซลล์แบบอนุกรม สามารถแบ่งการต่อตามจำนวนเซลล์ได้ เป็น 2 ประเภทคือ

- (1) ประเภทแรก แผงมีเซลล์ 33 เซลล์ เป็นแผง Solartron Model M75/S47 33 แผง และ Showa Arco Model GL133/M75 อีก 2 แผง รวมประเภทแรก 35 แผง
- (2) ประเภทที่สอง แผงมีเซลล์ 36 เซลล์ เป็นแผงของ Solartron รุ่น Model M60 23 แผง Model M55/S53 4 แผง และ M75 10 แผง แผงจากประเทศจีน รุ่น Model JDG-M 4 แผง และแผงของ Sharp Model NE 1175E1 40 แผง รวมประเภทสอง 81 แผง

#### 4.2.4 การจำแนกลักษณะการเสื่อมสภาพของแผง



รูปที่ 4.3 การแบ่งแผงตามลักษณะการเสื่อมสภาพที่สังเกตเห็นได้จากทางด้านหน้า

ภาพถ่ายการเสื่อมสภาพของแผงทั้งหมด 116 แผง แสดงไว้ภาคผนวก ข วิทยานิพนธ์แบ่งลักษณะของการเสื่อมสภาพที่สังเกตเห็นได้ด้วยตา ตามมาตรฐาน IEC 61215

การเสื่อมสภาพด้านหน้าแผง เกิดที่อีวีเอและบัสบาร์ แบ่งออกได้เป็นรูปแบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.3 มี 3 ลักษณะสำคัญ ประกอบด้วย

: อีวีเอเปลี่ยนสี (Discoloration, Yellowing or Browning) เป็นสีเหลือง (Yellowing - Y), สีน้ำตาล (Browning - B), สีน้ำตาลเข้ม (Dark Browning - DB)

: อีวีเอหลุดร่อนหรือลอกร่อน (Delamination) ร่อนเป็นฟองอากาศที่บัสบาร์ (Bubble around the Busbar – BB), ร่อนที่ศูนย์กลางของเซลล์ (Center of the Cell – CC), ร่อนที่รอบๆขอบเซลล์ (Around the Edge of Cell – EC), ร่อนที่มุมของขอบเซลล์ (Corner of the Edge – CE)

: การกัดกร่อน (Corrosion) บนบัสบาร์ของเซลล์และระหว่างเซลล์ ทั้งกัดกร่อนน้อย (Little Corrosion – LC), กัดกร่อนมาก (More Corrosion – MC)

การเสื่อมสภาพด้านหลัง เกิดสำคัญ 2 ส่วน ที่แผ่นปิดหลังและกาวผนึกขอบ ดังรูปที่ 4.4 ได้แก่

: แผ่นปิดหลังเกิดจุดไหม้ (Burn Spot – BS)

: แผ่นปิดหลังมีการขีดข่วนหรือฉีกขาด (Scratch – S)

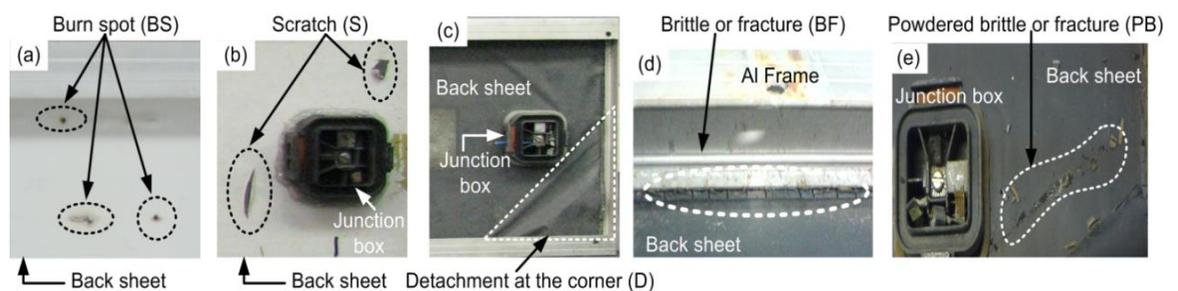
: แผ่นปิดหลังหลุดจากมุม (Detachment – D)

: กาวผนึกขอบกรอบแตกหรือเปราะเป็นผง (Powdered Brittle or Fracture – PB)

: กาวผนึกขอบกรอบแตกหรือเปราะ (Brittle or Fracture – BF)

หากไม่สามารถสังเกตเห็นการเสื่อมสภาพด้วยตาเปล่าทั้งด้านหน้าแผงหรือด้านหลังแผง ถือว่าไม่พบความบกพร่อง (No Defect - ND)

จากการแบ่งกลุ่มข้างต้น การทดลองที่จะกล่าวต่อไปก็ยังไม่สามารถระบุชัดเจนได้ว่ากลุ่มไหนจะมีสภาพค่าความต้านทานทางไดอิเล็กตริกดีกว่าหรือด้อยกว่า อย่างชัดเจน



**รูปที่ 4.4** การเสื่อมสภาพที่สังเกตเห็นได้จากทางด้านหลังแผง

ในส่วน 4.3.3 ที่จะกล่าวต่อไป ได้คัดเลือกแผง 39 แผง ที่สังเกตการเสื่อมสภาพชัดเจนทั้งทางด้านหน้าแผงและด้านหลังแผง จัดกลุ่มโดยเรียงลำดับการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงก่อนเป็นหลัก จากการเสื่อมสภาพน้อยสู่การเสื่อมสภาพที่มากขึ้น เป็นการตัดสินใจแบบอัตวิสัย (Subjective) จัดออกเป็น 8 กลุ่ม B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7/1, B7/2 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบภาพรวมลักษณะการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงและด้านหลังแผงของกลุ่ม B1 ถึง B7

กลุ่ม	รูปตัวอย่าง		การเสื่อมสภาพด้านหน้าแผง												การเสื่อมสภาพด้านหลังแผง						จำนวนแผง		
			การเปลี่ยนสี				การลอกกร่อน				การกัดกร่อน				แผ่นปิดหลัง			กาวฉนวนกบ					
			LY	Y	B	DB	ND	BB	CE	CC	EC	ND	LC	MC	ND	BS	S	D	ND	BF		PB	
B1			✓				✓						✓					✓					3
B2				✓					✓					✓					✓				1
B3					✓					✓			✓						✓		✓		10
B4						✓				✓			✓						✓		✓		13
B5						✓					✓		✓		✓						✓		2
B6					✓						✓		✓						✓			✓	6
B7/1					✓					✓			✓						✓		✓		2
B7/2						✓				✓				✓				✓			✓		2

สามารถบรรยายการเสื่อมสภาพแต่ละกลุ่มได้ดังนี้

กลุ่มแผง B1 สภาพแผงภายนอกแสดงดังรูปที่ 4.5 เปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลน้อยมาก ต้องเอียงแผงดูด้านข้างจึงจะเห็นสีเหลืองเล็กน้อย (LY, Y) ไม่เกิดการลอกกร่อน แต่เริ่มมีร่องรอยการกัดกร่อนที่บัสบาร์น้อยๆ ในแผงหนึ่ง และไม่มีจุดบกพร่องจากการกัดกร่อนเลย (ND) ในอีกสองแผง ส่วนด้านหลังแผงที่แผ่นปิดหลังมีจุดไหม้บางแห่ง (BS) กาวฉนวนกบรอบขอบแผงปกติยังไม่พบจุดบกพร่องใดๆ (ND)

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
น้อยมาก	ไม่พบ	น้อย มากๆ	มีรอยจุดไหม้	ปกติ

รูปที่ 4.5 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B1

กลุ่มแผง B2 มีเพียงหนึ่งแผง มีลักษณะโดดเด่นคือ ด้านหน้าแผง เกิดการหลุดร่อนเป็นจุดฟองอากาศ กระจายรอบๆ บัสบาร์ (BB) ดังรูปที่ 4.6 มีการเปลี่ยนสีกลายเป็นสีเหลือง (Y) ออกน้ำตาลเล็กน้อย จากการมองเข้าด้านหน้าแผงโดยตรง และเริ่มสังเกตเห็นการกัดกร่อนเกิดขึ้นเล็กน้อยที่บัสบาร์บน เซลล์ (LC) ส่วนด้านหลังแผง สภาพแผ่นปิดหลังมีรอยถลอก (S) เป็นจุดๆ ใกล้เคียงขอบบริเวณที่เจาะรู ยึดขอบแผง สภาพการฉนีกขอบด้วยกาวยังไม่พบความบกพร่องใดๆ (ND)

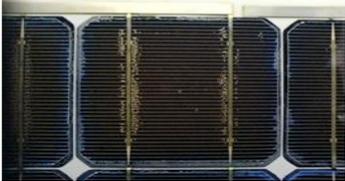


รูปที่ 4.6 สภาพแผงภายนอกของแผง B2

กลุ่มแผง B3 และ B4 มีจำนวนมากถึง 10 แผงและ 13 แผงตามลำดับ มีลักษณะสภาพแผงภายนอก แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 โดยทั่วไปมีลักษณะด้านหน้าแผงและหลังแผงคล้ายกันคือ เกิดการหลุดร่อนที่ศูนย์กลางของเซลล์มากกว่าขอบ (CC) ในบางแผงเมื่อเอียงแผงจะยิ่งสังเกตเห็นการหลุดร่อน เกิดขึ้นที่ศูนย์กลางของเซลล์ได้ชัดเจนดังรูปที่ 4.7 การกัดกร่อนเกิดขึ้นเล็กน้อยที่บัสบาร์บนเซลล์ (LC) ส่วนด้านหลังแผง สภาพแผ่นปิดหลังมีการหลุดร่อน (D) สภาพการฉนีกขอบด้วยกาวกรอบเกิด รอยแตกหรือเปราะ (BF) ในบางแผงอาจจะเกิดการฟูกร่อนของกรอบอะลูมิเนียมร่วมด้วย สิ่งที่เห็น แตกต่างได้อย่างชัดเจนระหว่างกลุ่ม B3 กับ B4 คือ กลุ่ม B3 เริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล (B) ส่วน B4 มีสี น้ำตาลเข้ม (DB) ดังรูปที่ 4.8

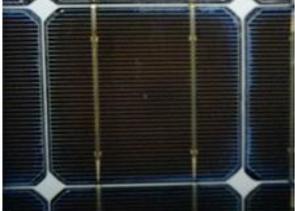


รูปที่ 4.7 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B3

สีน้ำตาล	การหลุดร่อน	การกัดกร่อน	สภาพแผ่นปิดหลัง	สภาพการฉีกขอบ
มาก	กลางเซลล์>ขอบ	น้อย	หลุดร่อนจากข้อต่อสายไป ยังขอบแผง	พบรอยแตกของกาวฉีกขอบ และขอบแผงอลูมิเนียมหลุดร่อน
				

รูปที่ 4.8 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B4

กลุ่มแผง B5 ถูกแยกออกมาจัดเป็นอีกกลุ่มหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากมีลักษณะพิเศษคือ เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลเข้ม (DB) เหมือน B4 และ B7/2 แต่ B4 เกิดการหลุดร่อนเฉพาะบริเวณรอบขอบเซลล์มากกว่ากลางเซลล์ (EC) นอกนั้นจะคล้ายคลึงกับแผงอื่นๆ คือการกัดกร่อนและแผ่นปิดหลังกาวฉีกขอบ เกิด LC และ ND ตามลำดับ สำหรับกาวฉีกขอบเริ่มสังเกตเห็นการเกิดรอยแตกหรือเปราะเป็นผง (PB) ได้ในกลุ่มนี้

สีน้ำตาล	การหลุดร่อน	การกัดกร่อน	สภาพแผ่นปิดหลัง	สภาพการฉีกขอบ
มาก	ขอบ>กลางเซลล์	น้อย	ไม่พบความผิดปกติ	กรอบและหลุดเป็นผง
				

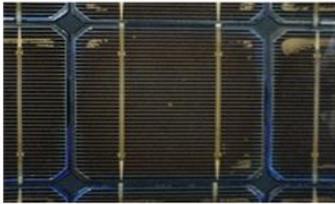
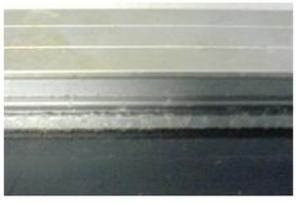
รูปที่ 4.9 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B5

กลุ่มแผง B6 มีลักษณะเฉพาะคือด้านหน้าแผงเกิดการเปลี่ยนสีจากเหลืองเข้าสู่สีน้ำตาล (B) เกิดการลอก ร่อนที่ขอบเซลล์มากกว่ากลางเซลล์ (EC) ด้านหลังแผงมีการเสื่อมสภาพมากกว่ากลุ่มแผงอื่นๆ คือมีทั้ง การหลุดร่อนของแผงปิดหลัง (D) และกาวฉีกขอบเกิดรอยแตกหรือเปราะเป็นผง (PB) ดังรูปที่ 4.10

สีน้ำตาล	การหลุดร่อน	การกัดกร่อน	สภาพแผ่นปิดหลัง	สภาพการฉีกขอบ
น้อย	ขอบ>กลางเซลล์	น้อย	หลุดร่อนที่มุมแผงหรือ ขอบแผงและมีรอยถลอก	กรอบและหลุดเป็นผง
				

รูปที่ 4.10 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B6

กลุ่มแผง B7 สาเหตุหลักที่แยกกลุ่มแผงออกมา คือมีการหลุดร่อนที่มุมแผงหรือขอบเซลล์ (CE) ดังรูปที่ 4.11 และแยกออกเป็น B7/1 และ B7/2 อีก แม้มีการแตกหรือเปราะของกาวผนึกขอบ (BF) คล้ายกัน เนื่องจากมีความแตกต่างบางส่วนคือ กลุ่ม B7/2 เปลี่ยนสีมีทั้งสีน้ำตาล (B) และน้ำตาลเข้ม (DB) และเกิดการกัดกร่อนบนบัสบาร์มากกว่าจนเห็นเป็นสีเขียว และแผ่นปิดหลังเกิดรอยถลอก (S) หรือหลุดออก (D)

สีน้ำตาล	การหลุดร่อน	การกัดกร่อน	สภาพแผ่นปิดหลัง	สภาพการผนึกขอบ
มาก	มุมแผงหรือขอบเซลล์	น้อย	ถลอกที่ขอบแผง	พบรอยแตกของกาวผนึกขอบ
				

รูปที่ 4.11 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B7

### 4.3 การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผง

#### 4.3.1 กราฟกระแส-แรงดันและพารามิเตอร์ไฟฟ้า

##### กราฟกระแส-แรงดันของ 116 แผง

แผง 116 แผงทั้งหมด ถูกทดสอบหากราฟกระแส-แรงดัน โดยใช้แสงอาทิตย์เทียมที่ระบุในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3.1 กราฟกระแส-แรงดันของทั้ง 116 แผง แสดงในภาคผนวก

##### พารามิเตอร์ไฟฟ้าของแผงที่ถูกคัดเลือก 32 แผง

บางแผงหลังจากการใช้งาน เสียหายอย่างรุนแรง ทำให้แผงเหล่านี้ไม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตออกมาได้ในขณะทำการทดสอบ อาจมีขาดตอนหรือเชื่อมสัมผัสกันไม่ดีของแถบตัวนำระหว่างแผ่นเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน หรือการขาดหรือเปิดวงจรของแถบตัวนำจากด้านหลังแผงเซลล์ในกล่องต่อสาย หลังการรื้อถอนกลับจากภาคสนาม สามารถวัดหากราฟกระแส-แรงดันกับการเสื่อมสภาพด้านหน้าได้เพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้น

จากการพิจารณาการเสื่อมสภาพด้านหน้าเป็นหลัก จัดกลุ่มแผงเป็น 8 กลุ่ม (B1-B7/1, B7/2) ได้คัดเลือกแผง 32 แผงถูกศึกษารายละเอียดต่อ แผงเหล่านี้มีกราฟกระแส-แรงดันเปลี่ยนชัดเจนจากกราฟปกติ เช่น

- : กราฟเป็นเส้นตรงแทนเส้นโค้ง
- : กระแสวงจรปิดและประสิทธิภาพต่ำกว่าปรกติ
- : กราฟมีการเปลี่ยนความโค้ง (Slope) อย่างไม่ต่อเนื่อง

จากแผงที่ถูกคัดเลือก 32 แผง งานวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมสภาพภายนอกที่ปรากฏ กับตัวแปรอื่น ดังนี้

- : รูปลักษณะกราฟเส้นโค้งกระแส-แรงดัน
- : ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าได้แก่ กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ( $V_{oc}$ ) กระแสไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{max}$ ) แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{max}$ ) กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{max}$ ) ฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor, FF) ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ )

#### 4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟกระแส-แรงดันและลักษณะการเสื่อมสภาพ

ได้จัดแบ่งแผง 32 แผง ออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

- ก) กลุ่มแผงที่มีเซลล์ต่ออนุกรมกัน 36 เซลล์
- ข) กลุ่มแผงที่กราฟกระแส-แรงดันไม่ปรกติ
- ค) กลุ่มแผงที่กราฟกระแส-แรงดันปรกติ

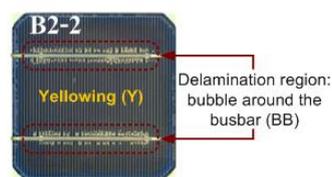
##### กลุ่มแผงที่มีเซลล์ต่ออนุกรมกัน 36 เซลล์

ยกมาศึกษาเปรียบเทียบ 3 แผงคือ B1-1, B1-3, B2-2

แผงกลุ่ม B1 และ B2 มีลักษณะทางกายภาพด้านหน้าแผงค่อนข้างดี ดังรูปที่ 4.12 (ก) จึงมีพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าอย่างเช่น  $I_{sc}$  และ  $V_{oc}$  ใกล้เคียงกับค่าที่ระบุไว้ในป้ายชื่อด้านหลังแผง แต่เนื่องจากแผง B1-1 มีรอยไหม้ด้านหลังแผงดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) ส่วนแผง B2-2 อีวีเอด้านหน้าเซลล์มีการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง (Y) และการหลุดร่อนในลักษณะเม็ดฟองอากาศรอบๆ บัสบาร์ (BB)

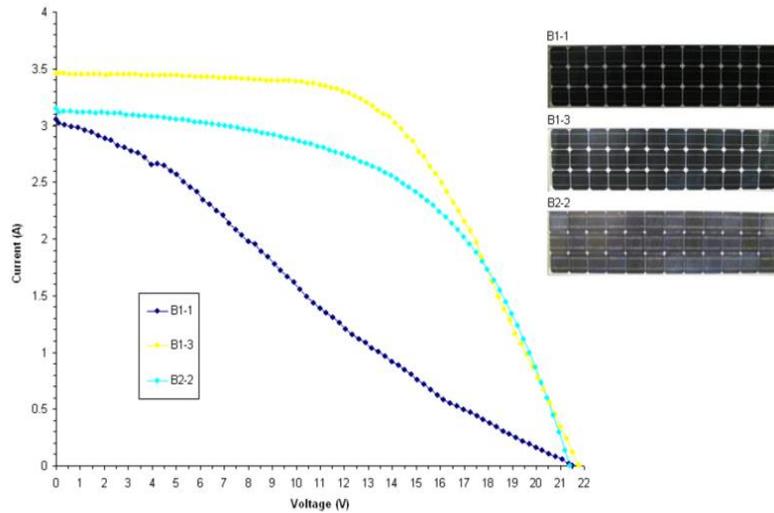


(ก) จุดไหม้หลังแผง B1-1



(ข) Y&BB ของแผง B2-2

รูปที่ 4.12 ลักษณะการเสื่อมสภาพของแผงในกลุ่มที่มีเซลล์ต่ออนุกรมกัน 36 เซลล์



รูปที่ 4.13 กราฟกระแส-แรงดันและรูปของแผง B1-1, B1-3, B2-2

ตาราง 4.4 ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าของแผง B1-1, B1-3, B2-2

แผง \ พารามิเตอร์	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$I_{max}$ (A)	$V_{max}$ (V)	$P_{max}$ (W)	FF	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )
B1-1, Solartron, Model: M60	3.05	21.5	1.84	8.8	16.2	0.25	9.2	10.99
B1-3, Solartron, Model: M60	3.46	21.8	2.97	14.4	42.75	0.57	2.2	203.21
B2-2, Solartron, Model: M55/S53	3.15	21.4	2.38	15.2	36.16	0.54	1.6	50

กราฟกระแส-แรงดันของแผงทั้ง 3 แสดงดังรูปที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเห็นได้ว่า

แผง B1-3 และ B2-2

พารามิเตอร์ไฟฟ้า  $I_{sc}$  และ  $V_{oc}$  ใกล้เคียงกับค่าที่ระบุไว้ในป้ายชื่อด้านหลังแผงคือราว 3 A ถึง 3.5 A และ 21.5 V ถึง 22 V ตามลำดับ กราฟกระแส-แรงดันไม่เปลี่ยนรูปร่างไปจากปรกติมาก แต่เนื่องจากไม่มีค่าวัดพารามิเตอร์ช่วงต้นของทั้ง 115 แผงไว้ จึงระบุไม่ได้ว่าสมบัติไฟฟ้าหลังใช้งานเปลี่ยนไปจากค่าเริ่มต้นเพียงใด

สภาพภายนอก ถ้าเทียบทั้งเฉพาสีของอีวีเอที่เปลี่ยนไป ซึ่งควรทำให้ค่าส่งผ่านแสงของอีวีเอเปลี่ยน (ลดลงถ้าเข้มมากขึ้น) แผง B2-2 มีอีวีเอเปลี่ยนสีเข้มมากกว่า B1-3 ค่าส่งผ่านแสงและ  $I_{sc}$  ควรต่ำกว่า B1-3 แต่จากการวัดไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งแสดงว่าค่า  $I_{sc}$  ที่ต่ำกว่าของ B2-2 ต้องอธิบายด้วยเหตุผลอื่น ไม่ใช่การเปลี่ยนสีอีวีเอ

แผง B1-1

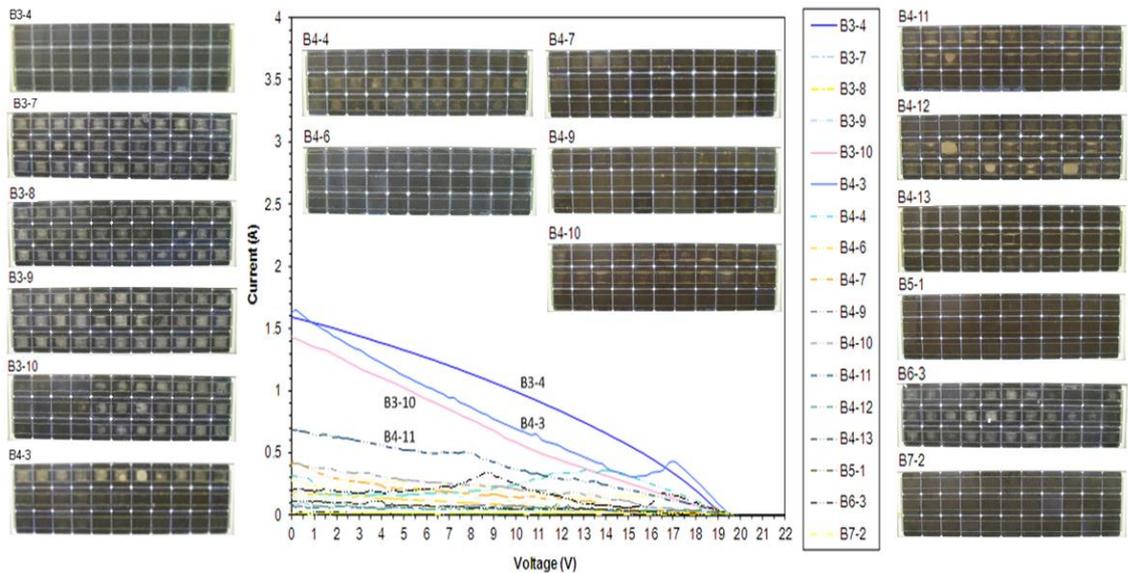
พารามิเตอร์ เปลี่ยนไปจากค่าระบุมาก เช่น  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ,  $P_{max}$ ,  $R_{sh}$  และ FF ลดลงเหลือเพียง 8.8 V, 1.84 A, 16.2 W, 10.99  $\Omega$  และ 24.7% ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกัน ความต้านทานอนุกรมสูงถึง 9.2  $\Omega$

สภาพภายนอก เกือบไม่เปลี่ยนแปลงเลย ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงมาก ต้องอธิบายด้วยการเสื่อมสภาพอื่นที่มองเห็น

**กลุ่มแผงที่กราฟกระแส-แรงดันไม่ปกติ**

เพื่อเป็นตัวอย่าง ได้ยกแผงที่มีลักษณะกราฟกระแส-แรงดันคล้ายคลึงกันมาเปรียบเทียบ 17 แผง คือ B3-4, B3-7, B3-8, B3-9, B3-10, B4-3, B4-4, B4-6, B4-7, B4-9, B4-10, B4-11, B4-12, B4-13, B5-1, B6-3 และ B7-2 แผงกลุ่มนี้มีเซลล์ต่ออนุกรม 33 เซลล์ กราฟกระแส-แรงดันไม่ปกติใน 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 4.14 คือ

- : กราฟกระแส-แรงดัน เกือบเป็นเส้นตรง
- : กราฟกระแส-แรงดัน มีการเปลี่ยนความชัน (Slope) ต่างจากปกติ



**รูปที่ 4.14** กราฟกระแส-แรงดันและรูปของแผงที่มีลักษณะไม่ปกติ

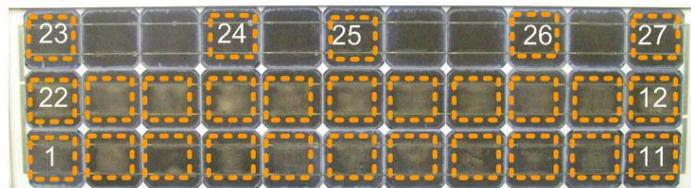
ในภาพรวม แผง 17 แผงที่กราฟกระแส-แรงดันไม่ปกติ สังเกตได้ว่า

- : อีวีเอเปลี่ยนสี และอีวีเอลอกร้อนมากกว่าแผงกลุ่มแรก
- : บัสบาร์สุกก่อน
- : จากตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญคือ
  - ค่ากระแสลัดวงจร ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และค่าฟิลแฟกเตอร์ ลดลงมาก
  - ช่วงของค่าความต้านทานอนุกรม (131.8 Ω ถึง 6.3 Ω) และช่วงค่าความต้านทานขนาน (826.5 Ω ถึง 10.3 Ω) ต่างกันมากนับสิบเท่า

ตาราง 4.5 ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าของแผง B3-4, B3-7, B3-8, B3-9, B3-10, B4-3, B4-4, B4-6, B4-7, B4-9, B4-10, B4-11, B4-12, B4-13, B5-1, B6-3 และ B7-2

แผง \ พารามิเตอร์	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$I_{max}$ (A)	$V_{max}$ (V)	$P_{max}$ (W)	FF	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )
B3-4, Solartron, Model: M75/S47	1.6	19.2	0.91	11	10.02	0.33	6.3	18.41
B3-7, Solartron, Model: M75/S47	0.14	20.4	0.19	6.7	1.28	0.45	131.8	-
B3-8, Solartron, Model: M75/S47	0.27	19.5	0.16	17.1	2.82	0.54	13.4	178.33
B3-9, Solartron, Model: M75/S47	0.1	19.5	0.07	15.1	1	0.52	56.2	126.35
B3-10, Solartron, Model: M75/S47	1.44	19.5	0.75	8.3	6.17	0.22	17.7	11.99
B4-3, Solartron, Model: M75/S47	1.62	19.5	0.43	17.1	7.3	0.23	5.3	10.3
B4-4, Solartron, Model: M75/S47	0.22	19.4	0.1	14.4	1.44	0.34	12	98.11
B4-6, Solartron, Model: M75/S47	0.18	19.7	0.09	9.1	0.8	0.22	119.4	90.9
B4-7, Solartron, Model: M75/S47	0.39	19.5	0.15	11.6	1.69	0.22	13.2	26.69
B4-9, Solartron, Model: M75/S47	0.07	19.5	0.07	10.8	0.79	0.58	30.5	-
B4-10, Solartron, Model: M75/S47	0.41	19.4	0.18	13.3	2.34	0.29	8.1	41.86
B4-11, Solartron, Model: M75/S47	0.69	19.7	0.49	8.2	3.99	0.30	22	33.01
B4-12, Solartron, Model: M75/S47	0.07	20	0.04	11.8	0.41	0.30	49.2	471.62
B4-13, Solartron, Model: M75/S47	0.02	12.1	0.01	9.8	0.1	0.40	-	628.85
B5-1, Solartron, Model: M75/S47	0.11	19.1	0.05	13.3	0.71	0.33	108.7	150.31
B6-3, Solartron, Model: M75/S47	0.2	19.6	0.1	8.7	2.95	0.22	16.2	204.07
B7-2, Solartron, Model: M75/S47	0.3	19.4	0.2	16.3	3.34	0.58	7.1	826.46

การสังเกตการเสื่อมสภาพด้วยตาต้านหน้าแผงในกลุ่มนี้ แสดงดังตารางที่ 4.6 เห็นได้ว่าหากมีการลอกร่องตรงกลางมากกว่าขอบเซลล์ (CC) แบบเต็มพื้นที่กลางเซลล์กว่า 22 เซลล์ (จาก 33 เซลล์ที่ต่ออนุกรม) ขึ้นไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.15  $I_{sc}$  มีค่าน้อยกว่า 0.5 A เป็นส่วนใหญ่

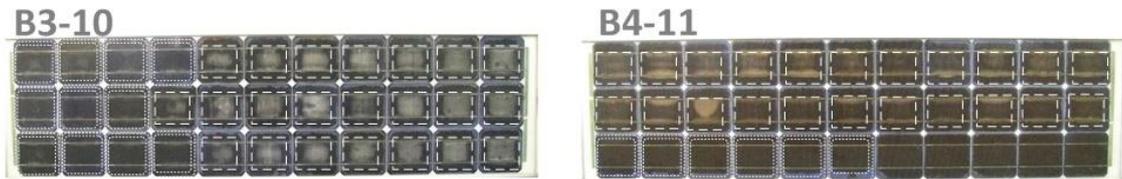


รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการลอกร่องที่ตรงกลางเซลล์มากกว่าขอบ

ในทางกลับกัน หากมีการลอกร่องตรงกลางเซลล์มากกว่าขอบ (CC) แบบเต็มพื้นที่กลางเซลล์ไม่ถึง 22 เซลล์ และหรือร่วมกับการลอกร่องที่บริเวณขอบเซลล์ในบางเซลล์ (EC) หรือที่มุมของเซลล์ (CE) ของแผงเหล่านี้ ดังตัวอย่างแผงแสดงในรูปที่ 4.16  $I_{sc}$  มีค่ามากกว่า 0.5 A แต่ไม่เกิน 2.0 A

ตารางที่ 4.6 การเชื่อมต่อของกรุปแผงที่กราฟกระแส-แรงดันไม่ปกติ

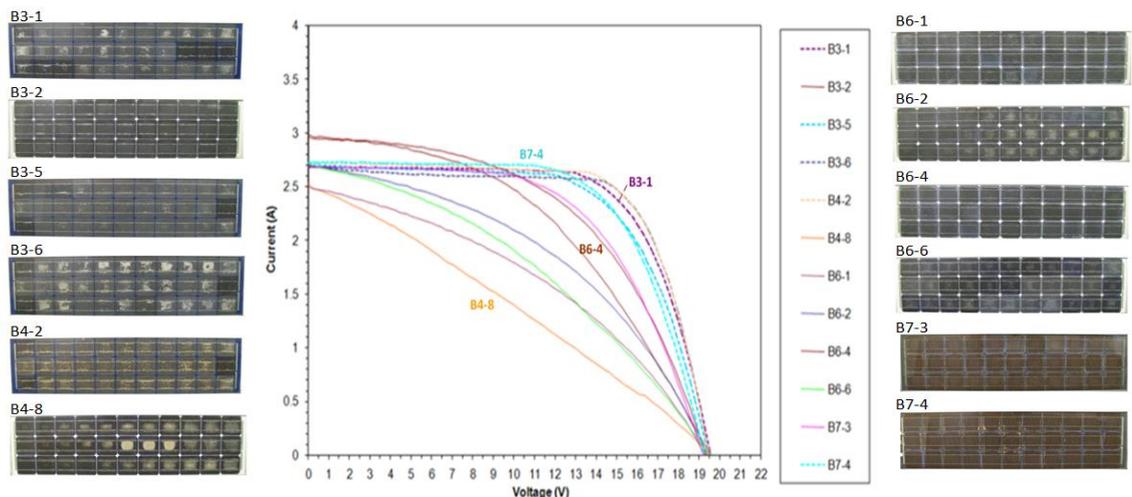
หน้าแผง	B3-4	B3-7	B3-8	B3-9	B3-10	B4-3	B4-4	B4-6	B4-7	B4-9	B4-10	B4-11	B4-12	B4-13	B5-1	B6-3	B7-2	จำนวน
เปลี่ยนสี	Y	✓																1
	B		✓	✓	✓	✓										✓		5
	DB						✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			10
ลกร่อน	CE																✓	1
	CC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				14
	EC	✓				✓	✓					✓			✓	✓		5
ตัดกร่อน	LC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		16
	MC																✓	1



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างการลกร่อนตรงกลางเซลล์มากกว่าขอบ และมีการลกร่อนแบบอื่นร่วม

กรุปแผงที่กราฟกระแส-แรงดันมีลักษณะปกติ

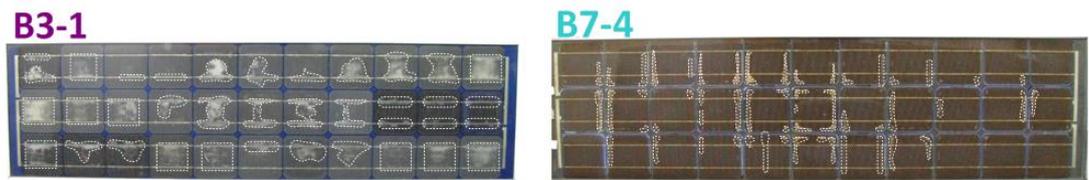
แผงในกลุ่มนี้มีเซลล์ต่อกัน 33 เซลล์ กราฟกระแส-แรงดันมีรูปร่างปกติและความชัน (Slope) ปกติแสดงดังรูปที่ 4.17 มีจำนวน 12 แผง คือ B3-1, B3-2, B3-5, B3-6, B4-2, B4-8, B6-1, B6-2, B6-4, B6-6, B7-3 และ B7-4



รูปที่ 4.17 กราฟกระแส-แรงดันและรูปของกรุปแผงที่รูปร่างกราฟและความชันกราฟปกติ

ลักษณะการเสื่อมสภาพด้านหน้าแผงโดยทั่วไป อีวีเอด้านหน้าแผงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (B) หรือน้ำตาลเข้ม (DB) รวมทั้งการเกิดการกัดกร่อน ส่วนใหญ่เป็นการกัดกร่อนเล็กน้อยบนบัสบาร์เท่านั้น แต่การเกิดลอกกร่อนของอีวีเอด้านหน้าแผงในกลุ่มนี้ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.18 นอกจากนี้มีการลอกกร่อนตรงกลางเซลล์ (CC) ทั้งแบบเต็มพื้นที่และไม่เต็มพื้นที่กลางเซลล์ในบางเซลล์ ยังมีการลอกกร่อนแบบฟอง อากาศตรงบัสบาร์ (BB) ในบางเซลล์ หรือไม่มีการลอกกร่อนเลยในบางเซลล์ แผงกลุ่ม B3 และ B4 มีการลอกกร่อนเล็กน้อยที่ขอบเซลล์ (EC) ในกลุ่ม B6 หรือมีการลอกกร่อนเฉพาะที่มุมขอบเซลล์ (CE) ในกลุ่ม B7

จากที่กล่าวมาข้างต้น ได้ตั้งข้อสังเกตทั่วไปว่า แม้การเปลี่ยนสีอาจทำให้แสงตกกระทบเซลล์ลดลง และเกิดกระแสลดลง แต่พบว่าอีวีเอมักเปลี่ยนสีเหมือนกันทั้งแผง ความเข้มแสงตกกระทบเซลล์ควรใกล้เคียงกัน แต่ความเข้มลดลง กระแสที่ได้มีค่าลดลง กราฟกระแส-แรงดันยังคงรูปได้ในลักษณะปกติ เพราะยังไม่เกิดการเสื่อมสภาพที่รุนแรงกว่า เช่น บัสบาร์ผุกร่อน ความชื้นแพร่เข้าแผง



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการลอกกร่อนตรงกลางเซลล์ ขอบเซลล์และมุมเซลล์ร่วมด้วย

ตาราง 4.7 ค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าของแผง B3-1, B3-2, B3-5, B3-6, B4-2, B4-8, B6-1, B6-2, B6-4, B6-6, B 7-3 และ B7-4

แผง \ พารามิเตอร์	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$I_{max}$ (A)	$V_{max}$ (V)	$P_{max}$ (W)	FF	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )
B3-1, Solartron, Model: M75/S47	2.68	19.5	2.42	14.8	35.87	0.69	1.2	544.98
B3-2, Solartron, Model: M75/S47	2.99	19.5	2.19	11.9	25.94	0.44	2.9	35.17
B3-5, Solartron, Model: M75/S47	2.7	19.5	2.37	14.3	33.83	0.64	1.3	145.07
B3-6, Solartron, Model: M75/S47	2.68	19.5	2.5	14.9	37.13	0.71	1.1	82.12
B4-2, Solartron, Model: M75/S47	2.72	19.5	2.51	14.8	37.17	0.70	1.1	227.55
B4-8, Solartron, Model: M75/S47	2.53	19.6	1.4	10	13.98	0.28	5.7	10.31
B6-1, Solartron, Model: M75/S47	2.52	19.3	1.55	12	18.64	0.38	3.2	17.45
B6-2, Solartron, Model: M75/S47	2.72	19.4	1.78	12.6	22.33	0.42	2.6	21.71
B6-4, Solartron, Model: M75/S47	2.97	19.3	2.22	13.1	29.14	0.51	1.9	52.74
B6-6, Solartron, Model: M75/S47	2.72	19.4	1.68	11.6	19.41	0.37	3.9	17
B7-3, Showa Arco Solar, Model: 133/M75	2.69	19.2	2.28	13.2	30.04	0.58	1.8	265.81
B7-4, Showa Arco Solar, Model: 133/M75	2.73	19.3	2.43	14.1	34.27	0.65	1.4	301.56

โดยภาพรวม

: จากตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของกลุ่มแผงอย่างเช่น ค่ากระแสลัดวงจร ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และค่าฟิลแฟกเตอร์ สูงกว่าแผงกลุ่มที่ 2 ที่กล่าวมาแล้ว

: กระแสลัดวงจรไม่ต่ำกว่า 75% จากที่ระบุไว้บนป้ายด้านหลัง

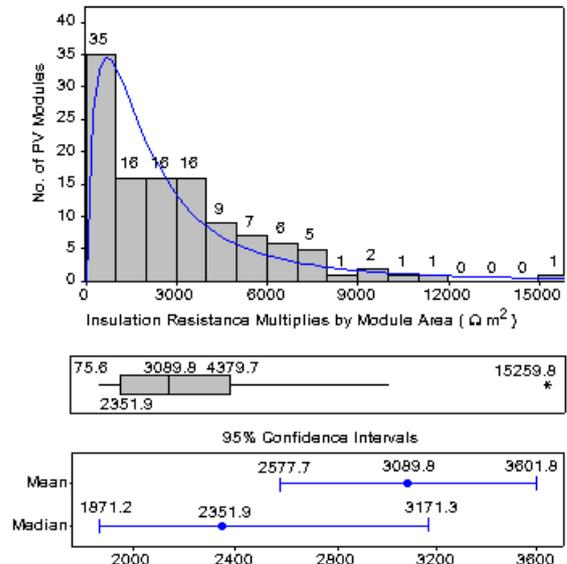
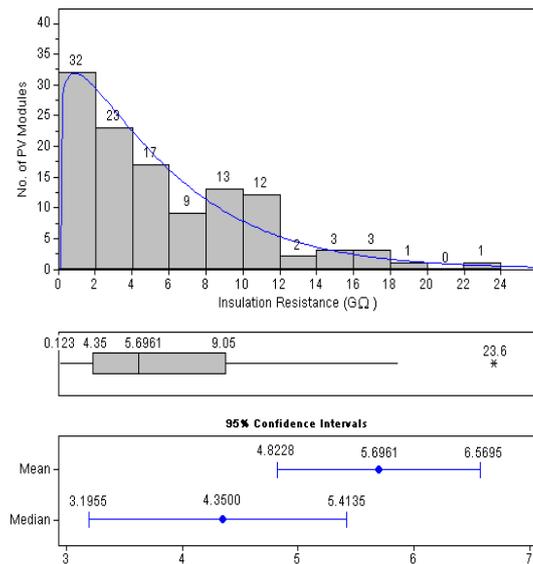
: ค่าความต้านทานอนุกรมยังต่ำ (สูงสุด 5.7 Ω และต่ำสุด 1.1 Ω) ทำให้กราฟกระแส-แรงดันมีลักษณะปรกติ เทียบกับกลุ่มที่สองที่ค่าความต้านทานอนุกรมสูงมาก (131.8 Ω ถึง 6.3 Ω) ทำให้กราฟกระแส-แรงดันเกือบเป็นเส้นตรง นอกจากนี้ค่าความต้านทานอนุกรมไม่แตกต่างกันมากนักสืบท่า เหมือนกลุ่มที่สอง

: ส่วนความต้านทานขนาน ยังมีค่าสูงสุด (544.98 Ω ถึง 10.31 Ω)

### 4.4 การทดสอบฉนวนหุ้มฉนวนแผงด้วยการประยุกต์สนามไฟฟ้ากระแสตรง

#### 4.4.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของแผง

ได้ทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนหุ้มฉนวนเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 116 แผงตามแนวทางการทดสอบในมาตรฐาน IEC 61215 ที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 สำหรับค่าทางสถิติโดยการใช้โปรแกรม MINITAB ได้กราฟของค่าความต้านทานฉนวนของแผงที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) และค่าความต้านทานฉนวนของแผงที่วัดได้คูณกับพื้นที่แผงที่ถูกวัดของแผงนั้นๆ แสดงดังรูปที่ 4.19 (ข)



(ก) ค่าความต้านทานฉนวนของแผง

(ข) ค่าความต้านทานฉนวนของแผงคูณกับพื้นที่แผง

รูปที่ 4.19 ค่าสถิติความต้านทานฉนวนหุ้มฉนวนเซลล์แสงอาทิตย์ของแผง 116 แผง

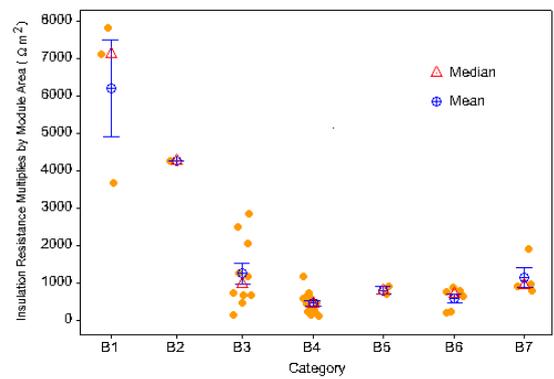
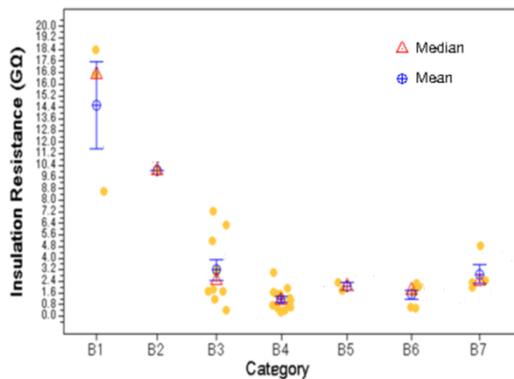
การวิเคราะห์จะพิจารณาตามกลุ่มแผงจากสถานที่ใช้งานสามกลุ่มตามส่วนที่ 4.2.1 แผงที่ใช้งานสถานที่เดียวกัน จะเป็นแผงจากผู้ผลิตเดียวกัน โมเดลเดียวกัน สมบัติทางไฟฟ้าเริ่มต้นใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบการเสื่อมสภาพจึงทำได้

**แผงที่ใช้งานโครงการ มจร. และโครงการอีสานเขียว 39 แผง**

กลุ่ม B1 มี 3 แผง กลุ่ม B2 มี 1 แผง กลุ่ม B3 มี 10 แผง กลุ่ม B4 มี 13 แผง กลุ่ม B5 มี 2 แผง กลุ่ม B6 มี 6 แผง และกลุ่ม B7 มี 4 แผง ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของแผงทั้งหมดในกลุ่มนี้ แสดงดังตารางที่ 4.8 ค่าทางสถิติสำหรับความต้านทานฉนวนของแผงแสดงรูปที่ 4.20 (ก) และค่าความต้านทานฉนวนของแผงที่วัดได้คู่กับพื้นที่ที่แผงที่ถูกวัดของแผงนั้นๆ แสดงดังรูปที่ 4.20 (ข)

**ตารางที่ 4.8** ค่าความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงโครงการ มจร. และ โครงการอีสานเขียว

หมายเลขแผง	ค่าความต้านทานฉนวนของแผง (GΩ)						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	8.60	10.00	7.20	1.18	1.76	1.62	4.80
2	18.40	-	3.20	3.00	2.28	2.22	2.29
3	16.70	-	1.69	1.07	-	0.57	2.44
4	-	-	0.36	0.69	-	1.89	1.97
5	-	-	6.30	0.68	-	2.00	-
6	-	-	5.20	0.26	-	0.50	-
7	-	-	1.83	0.37	-	-	-
8	-	-	1.14	0.50	-	-	-
9	-	-	3.00	0.58	-	-	-
10	-	-	1.67	1.48	-	-	-
11	-	-	-	1.48	-	-	-
12	-	-	-	1.88	-	-	-
13	-	-	-	1.48	-	-	-



(ก) ค่าความต้านทานฉนวนของแผง

(ข) ค่าความต้านทานฉนวนของแผงคูณกับพื้นที่แผง

**รูปที่ 4.20** ค่าสถิติของกลุ่มแผงโครงการ มจร. และ โครงการอีสานเขียว

พิจารณาลักษณะการเสื่อมสภาพภายนอกด้านหน้าและด้านหลังของแผงทั้ง 7 กลุ่มย่อยนี้ พบว่า

(ก) แผงที่มีค่าความต้านทานแผงสูง (8.6 GΩ - 18.4 GΩ)

ได้แก่แผง B1-1, แผง 1-2, แผง 1-3, แผง B2-3, แผง B3-1 มีสภาพฉนวนของขบคืออยู่ ไม่พบรอยแตกของกาวฉนวนขบและขบแผงอะลูมิเนียมสุกร่อน และไม่พบการหลุดร่อนของ Backsheet ที่มุมหรือขบแผง หรือถ้ามี ก็เป็นเพียงจุดรอยไหม้หรือเกิดการถลอกเป็นจุดพื้นที่ขนาดเล็กเท่านั้น

(ข) แผงที่มีค่าความต้านทานแผงน้อยมาก (0.26 GΩ - 0.37 GΩ)

ได้แก่แผง B4-6, แผง B4-7, แผง B3-4 สภาพด้านหน้าแผงที่สังเกตได้ มีลักษณะแตกต่างกันด้านการ Browning แต่มีการเสื่อมสภาพที่เหมือนกันคือ (i) Backsheet หลุดร่อน (ii) มีรอยแตกของกาวฉนวนขบ และ (iii) ขบแผงอะลูมิเนียมสุกร่อน

(ค) แผงที่มีค่าความต้านทานฉนวนส่วนใหญ่ใกล้กับค่ามาตรฐานและเกิดขึ้นมากที่สุดในการทดสอบนี้ (0.26 GΩ - 1.97 GΩ)

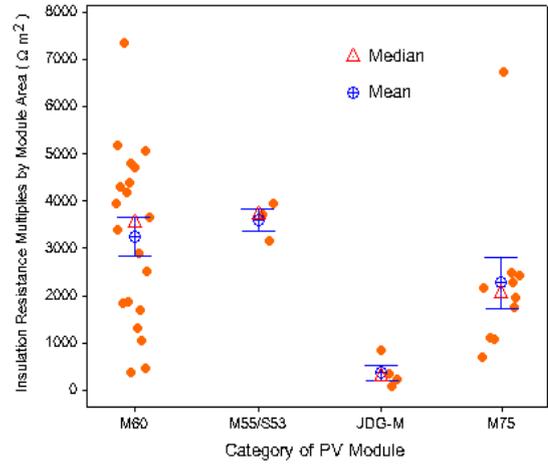
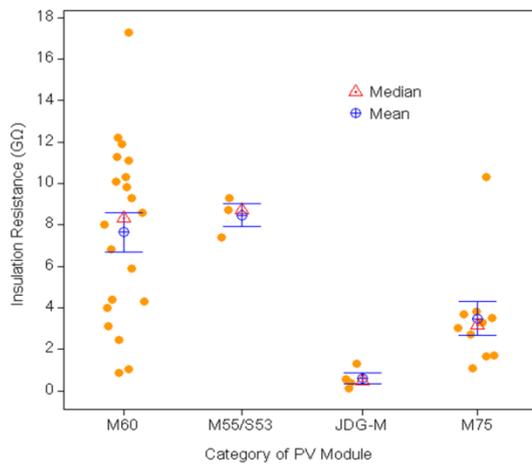
ประกอบด้วยกลุ่ม B3 5 แผง (B3-3, B3-4, B3-7, B3-8, B3-10), กลุ่ม B4 12 แผง (B4-1, B4-3, B4-4, B4-5, B4-6, B4-7, B4-8, B4-9, B4-10, B4-11, B4-12, B4-13) กลุ่ม B5 1 แผง (B5-2), กลุ่ม B6 4 แผง (B6-1, B6-3, B6-4, B6-6) และกลุ่ม B7 1 แผง (B7-5) โดยรวมเป็นแผง Solartron Model M75/S47 มี Browning แตกต่างกัน เกิด Delamination ที่ขบและกึ่งกลางเซลล์ เกิดการสุกร่อนน้อย ยกเว้น Model GL133/M75 Showa Arco Solar กลุ่ม B7 เกิดสุกร่อนมากกว่ากลุ่มอื่นๆ สภาพ Backsheet เกิดการหลุดร่อนและรอยถลอก กาวฉนวนขบส่วนใหญ่มีรอยแตก

แผงที่ใช้งานวัดป่าเกิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย จำนวน 37 แผง

ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของแผงทั้งหมดในกลุ่มนี้แสดงดังตารางที่ 4.9 และค่าสถิติแสดงรูปที่ 4.21 แผงกลุ่มนี้มีสองแบบ แบบแรกมีกำลังไม่เกิน 60W คล้ายกับแผงที่มาจาก จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นแผง Solartron Model M60 20 แผง Model M55/S53 จำนวน 3 แผง รวมทั้งสิ้น 23 แผง แบบที่สองขนาด 75W ประกอบด้วยแผงผลิตในประเทศจีน Model JDG-M 4 แผง และแผง Solartron Model M75 10 แผง

ตารางที่ 4.9 ค่าของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงที่มาจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร

M60		M55/S53		JDG-M		M75	
หมายเลขแผง	ค่าความต้านทาน (GΩ)						
5144PV001	8.60	5144PV019	9.30	5144PV024	0.36	5144PV028	3.50
5144PV002	4.40	5144PV022	7.40	5144PV025	0.54	5144PV029	3.00
5144PV003	5.90	5144PV023	8.70	5144PV026	1.32	5144PV030	10.30
5144PV004	10.30			5144PV027	0.12	5144PV031	2.70
5144PV005	10.10					5144PV032	3.70
5144PV006	2.44					5144PV033	1.08
5144PV007	6.80					5144PV034	3.80
5144PV008	9.30					5144PV035	3.30
5144PV009	8.00					5144PV036	1.68
5144PV010	11.10					5144PV037	1.66
5144PV011	11.90						
5144PV012	0.86						
5144PV013	1.05						
5144PV014	3.10						
5144PV015	4.30						
5144PV016	9.80						
5144PV017	11.30						
5144PV018	17.30						
5144PV020	4.00						
5144PV021	12.20						



(ก) ค่าความต้านทานฉนวนของแผง

(ข) ค่าความต้านทานฉนวนของแผงคูณกับพื้นที่แผง

รูปที่ 4.21 ค่าสถิติของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร

จากรูปที่ 4.21 และการสังเกตพบว่า

ก) ค่าความต้านทานฉนวนกับผู้ผลิต

แผงผลิตจากประเทศจีนแม้ลักษณะค่อนข้างใหม่ แต่ทุกแผงมีค่าความต้านทานฉนวนต่ำกว่าแผง Solartron ทั้งสามโมเดล แผงที่ค่าความต้านทานฉนวนน้อยที่สุด (0.12 GΩ) ก็เป็นแผงที่ผลิตจาก

ประเทศจีน เมื่อสังเกตด้วยตาพบว่า บัสบาร์ที่เชื่อมต่อระหว่างแถว โย้เข้าหาขอบแผงหรืออยู่ชิดกับขอบแผงมาก ดังนั้นค่าความต้านทานฉนวนที่ต่ำมากจึงไม่น่าเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องจากการใช้งาน แต่เป็นการด้อยคุณภาพในการประกอบและการควบคุมคุณภาพ

**ข) ค่าความต้านทานฉนวนกับสภาพ Browning และ Corrosion**

เกือบทุกแผง เกิด Browning และ Corrosion คล้ายคลึงกัน

**ค) ค่าความต้านทานฉนวนกับแผ่นปิดหลัง**

แผง M60 ที่วัดค่าความต้านทานฉนวนได้ค่าน้อย พบว่าแผ่นปิดหลังเกิดการบวมและมีสิ่งสกปรกแทรกอยู่ในขอบแผง ส่วนแผงที่มีค่าความต้านทานฉนวนใกล้เคียงกับค่ากลางพบว่า แผ่นปิดหลังมีรอยไหม้ และแผงที่มีค่าความต้านทานฉนวนมาก พบว่าแผ่นปิดหลังอยู่ในสภาพดี

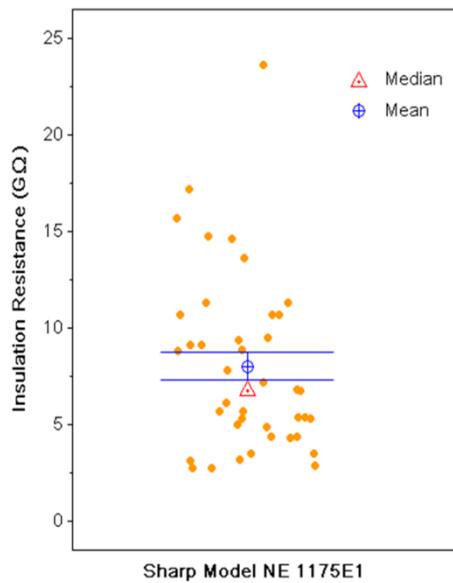
แผงที่มีค่าความต้านทานฉนวนสูงกว่าค่าเฉลี่ย 7.64 GΩ ขึ้นไป แผ่นปิดหลังอยู่ในสภาพดี กาวฉนึกขอบสมบูรณ์ ไม่แตกกรอบหรือหลุดเป็นผง แผงที่มีค่าความต้านทานฉนวนต่ำกว่า ค่าเฉลี่ย 7.64 GΩ แผ่นปิดหลังมีรอยไหม้และฉีกขาด มีสิ่งสกปรกแทรกตัวที่ขอบแผงในช่องว่างระหว่างด้านหน้าของแผงกับขอบโครงของแผง

**แผงที่ใช้งานโครงการจังหวัดชัยภูมิ 40 แผง**

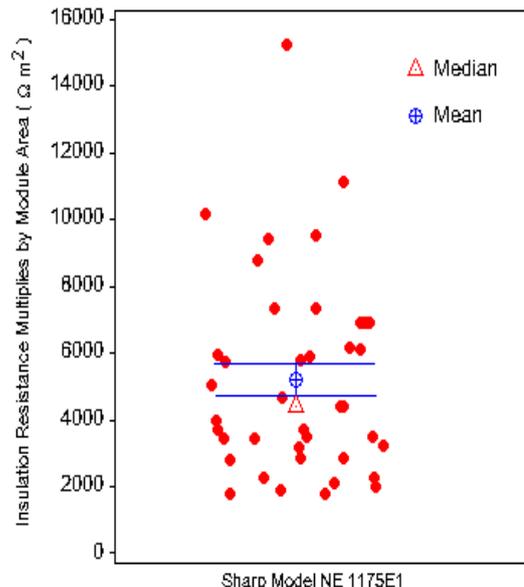
เป็นแผง Sharp Model NE 1175E1 40 แผง ไม่พบการ Browning, Delamination และ Corrosion ส่วนด้านหลังแผง สภาพของแผ่นปิดหลังและกาวฉนึกขอบอยู่ในสภาพดี ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนของแผงทั้งหมดในกลุ่มนี้แสดงดังตารางที่ 4.10 และค่าสถิติแสดงรูปที่ 4.22

**ตารางที่ 4.10 ค่าของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงที่มาจาก จังหวัดชัยภูมิ**

หมายเลขแผง	ค่าความต้านทาน (GΩ)						
5119PV001	23.6	5119PV011	6.75	5119PV021	14.73	5119PV031	7.8
5119PV002	17.2	5119PV012	11.3	5119PV022	13.6	5119PV032	3.1
5119PV003	10.7	5119PV013	9.5	5119PV023	11.3	5119PV033	2.75
5119PV004	6.1	5119PV014	9.1	5119PV024	5.4	5119PV034	4.4
5119PV005	6.8	5119PV015	10.7	5119PV025	8.83	5119PV035	3.5
5119PV006	14.6	5119PV016	2.9	5119PV026	9.15	5119PV036	4.4
5119PV007	8.9	5119PV017	15.7	5119PV027	7.2	5119PV037	3.5
5119PV008	5.7	5119PV018	4.9	5119PV028	2.72	5119PV038	4.3
5119PV009	5.3	5119PV019	9.4	5119PV029	5.7	5119PV039	5.4
5119PV010	5.3	5119PV020	10.7	5119PV030	5	5119PV040	3.2



(ก) ค่าความต้านทานฉนวนของแผง



(ข) ค่าความต้านทานฉนวนของแผงคูณกับพื้นที่แผง

**รูปที่ 4.22** ค่าสถิติของความต้านทานฉนวนกลุ่มแผงจาก จังหวัดชัยภูมิ

ภาพโดยรวมแสดงว่า หลังจากใช้งานจริงในภาคสนามตามสภาพแวดล้อมจริงของประเทศไทยไม่น้อยกว่า 5 ปี

- : ค่าความต้านทานฉนวนของแผงมีค่าต่ำที่สุด 2.72 GΩ และสูงสุด 23.6 GΩ
- : ค่าความต้านทานของแผงช่วง 2-8 GΩ มีมากที่สุดถึง 23 แผงหรือประมาณ 58%
- : ค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยของความต้านทานฉนวนของแผงทั้ง 40 แผง มีค่าเท่ากับ 6.77 GΩ และ 8.03 GΩ ตามลำดับ

#### 4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉนวนกับการเสื่อมสภาพของแผง

เมื่อเปรียบเทียบการสังเกตการเสื่อมสภาพกับการทดสอบค่าฉนวนของแผงที่ผ่านการใช้งานจริง ของแผงจากโครงการ มจร. โครงการอีสานเขียว และวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย มีแนวโน้มชัดเจนว่า

: ถ้าไดโอดเล็กริกที่สังเกตได้ด้วยตาว่ามีการเสื่อมสภาพมากทั้งด้านหน้าแผงและด้านหลังแผง ค่าความต้านทานทางไดโอดเล็กริกของแผงมีแนวโน้มที่ลดลง

: ถ้าหากไดโอดเล็กริกมีการเสื่อมสภาพน้อยทั้งด้านหน้าแผงและด้านหลังแผง ค่าความต้านทานทางไดโอดเล็กริกของแผงจะยังคงมีค่าสูง

ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางไดอิเล็กตริกของแผงกับการเสื่อมสภาพ  
ด้านหน้าแผง

Insulation Resistance (GΩ)	Discoloration				Delamination					Corrosion			
	No	Light Yellow	Yellow	Brown	No	Spotted	Corner / Edge	Center > Edge	Edge > Center	No	Least	Little	Great
0 - 1.9		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓
2 - 3.9		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓
4 - 5.9		✓	✓	✓		✓	✓	✓				✓	
6 - 7.9		✓	✓	✓		✓	✓	✓				✓	
8 - 9.9	✓	✓	✓	✓		✓	✓				✓	✓	
10 - 11.9	✓	✓	✓			✓					✓		
> 12	✓	✓			✓					✓	✓		

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางไดอิเล็กตริกกับการเสื่อมสภาพด้านหลังแผง

Insulation Resistance (GΩ)	Back Sheet					Edge Seal		
	Good	Burnt Spot	Bubble	Scratch	Peeling	Good	Brittle	Powdered
0 - 1.9			✓	✓	✓		✓	✓
2 - 3.9				✓	✓		✓	✓
4 - 5.9				✓		✓	✓	
6 - 7.9				✓		✓		
8 - 9.9	✓	✓				✓		
> 10	✓					✓		

แม้แผงใช้งานกว่า 15 ปี มีการเสื่อมสภาพภายนอกที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาอย่างมาก เมื่อวัดค่าความต้านทานจนวนได้ค่าน้อยที่สุดคือ 0.26 GΩ เมื่อคำนึงถึงพื้นที่ของแผงนี้ (102.67 MΩ·m<sup>2</sup>) แล้วเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ค่าที่ได้ก็ยังคงได้สูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (40 MΩ·m<sup>2</sup>)

การผืนกแผงที่ไม่ได้คุณภาพเช่นแผงจากประเทศจีน บัสบาร์เชื่อมต่อระหว่างเซลล์เอียงไปชิดกับขอบแผงมากเกินไป ทำให้ค่าความต้านทานลดลงน้อยกว่าที่ควรจะเป็นคือ 0.12 GΩ แม้ว่าจะเป็นแผงใหม่ก็ตาม แต่เมื่อคำนึงถึงพื้นที่ของแผงนี้ (75.6 MΩ·m<sup>2</sup>) แล้วเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ค่าที่ได้ก็ยังคงสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (40 MΩ·m<sup>2</sup>)

#### 4.4.3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและแบบจำลองค่าความต้านทานที่ขอบแผง

โครงสร้างชั้นไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนที่นำมาศึกษาในที่นี้มีความซับซ้อน กล่าวคือ

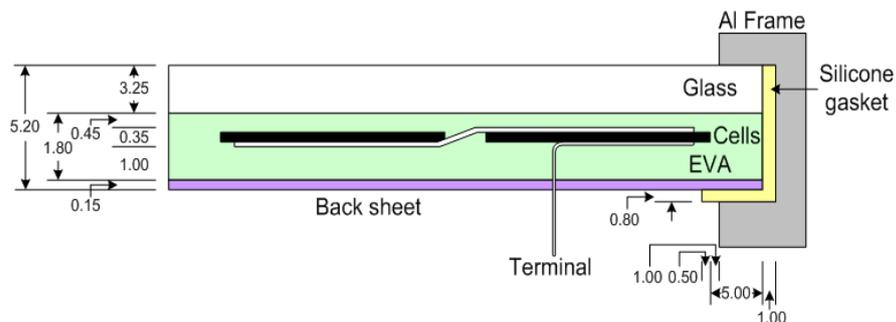
: ประกอบด้วย กระจก อีวีเอ เซลล์แสงอาทิตย์ อีวีเอ และแผ่นปิดหลัง ฉนวนเข้าเป็นแผ่นเดียวกัน ถือได้ว่าโครงสร้างไดอิเล็กตริกเป็นแบบหลายชั้น

: นอกจากนั้น ระหว่างขอบข้างของเซลล์แสงอาทิตย์กับขอบโครงแผง ยังมียางซิลิโคน ปิดผนึกขอบขอบแผงอยู่ในร่องของโครงแผง ไม่ให้ความชื้นแทรกซึมเข้าแผงได้

ในหัวข้อนี้เป็นผลการจำลองเพื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง ซึ่งมีความต่างศักย์มากกว่าจุดอื่น และได้ทำการเขียนแบบจำลองชั้นไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนหลายชั้น เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับค่าความต้านทานของฉนวนที่วัดค่าได้จากการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### ความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง

วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้หุ้มฉนวน มีหน้าที่สำคัญคือ ป้องกันไม่ให้กระแสรั่วไหลลงดิน ในขณะที่สนามไฟฟ้าที่ฉนวนได้รับ จะอยู่ในสภาพที่สูงตามค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งาน และองค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อกระแสรั่วไหลคือ ธรรมชาติของคลื่นแรงดันไฟฟ้า ลักษณะของสนามไฟฟ้า ความชื้น ความกดดันอากาศ และอุณหภูมิ และสถานะผิวของอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.23 รูปร่างลักษณะและมิติ (มม.) ของแผง Solartron กำลังไม่เกิน 60 W

ลักษณะของสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนหรือไดอิเล็กตริก รูปร่างลักษณะของอิเล็กโทรด ในกรณีที่เป็แผงไฟฟ้า ไดอิเล็กตริกจะอยู่ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ต้องพิจารณาถึงสภาพต้านทานทางไดอิเล็กตริกด้วย ดังนั้นก่อนหาความเข้มสนามไฟฟ้า จะต้องทราบชนิดและสภาพต้านทานของวัสดุไดอิเล็กตริก ความหนา พื้นที่ รูปร่างลักษณะ และระยะห่างระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงขอบแผง

ในการจำลองที่รายงานในส่วนนี้ ได้ใช้รูปร่างลักษณะและมิติของแผง Solartron ที่มีกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 60W (โมเดล M75/S47 กำลัง 47W โมเดล M55/S53 กำลังไฟฟ้า 53 W) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 เนื่องจากแผงในกลุ่มนี้ เสื่อมสภาพเห็นได้ชัดหลายแบบ และมีค่าความต้านทานฉนวนของแผงน้อยที่สุด (ค่าความต้านทานเฉลี่ยของ Solartron M60, M75/S47, M 55/S53 และของ Sharp NE 1175E1 มีค่าเท่ากับ 7.64 GΩ, 3.47 GΩ, 8.47 GΩ และ 8.03 GΩ ตามลำดับ)

เพื่อให้ง่ายต่อการทำนายการกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าภายในแผง งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Maxwell ของบริษัท Ansoft Cooperation มาช่วยในการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณต่างๆ

ในการจำลองความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง มีสมมติฐานดังต่อไปนี้คือ

- : การผิ๊งแผงและขอบแผงไม่มีช่องว่างอากาศภายในระบบฉนวนนี้
- : ระหว่างชั้นฉนวนและขอบโครงแผงมีการเชื่อมต่อแบบอุดมคติ
- : กระแสรั่วไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของประจุตามเวลา
- : ความเข้มของสนามไฟฟ้าสามารถถูกประมาณได้ด้วยระบบหนึ่งมิติ (One-dimensional)

เนื่องจากประจุไหลในทิศทางทิศทางเดียว จากขั้วบวกไปยังกราวด์

- : ค่าความนำทางไฟฟ้าต่างๆ มีค่าคงที่
- : มิติต่างๆรวมถึงความหนาของไดอิเล็กตริก สอดคล้องกับค่าที่แสดงในรูปที่ 4.19
- : ไดอิเล็กตริกโดยรอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์กำหนดให้เป็นอากาศในทางไฟฟ้า (หรือมีค่านำเท่ากับศูนย์) จากสมมติฐานดังกล่าว

จากสมมติฐานดังกล่าว

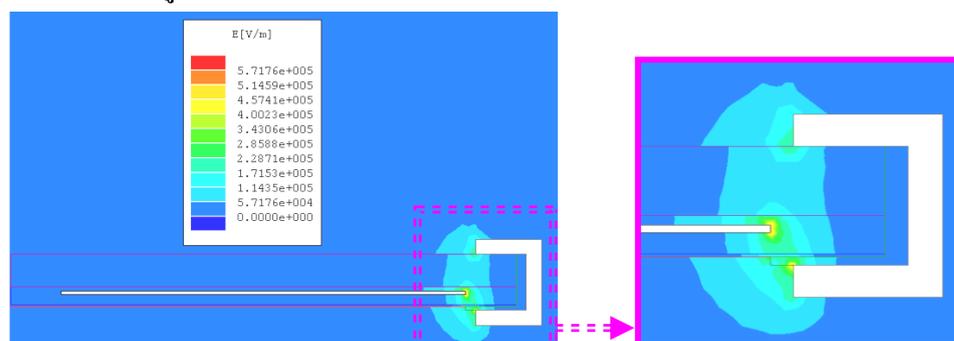
- : แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์และโครงแผงกำหนดให้เป็นอิเล็กโตรดตัวนำมีค่าความนำทางไฟฟ้า

เท่ากับ  $7 \times 10^6$  s/m และ  $3.8 \times 10^7$  s/m ตามลำดับ

- : กระจก อีวีเอ แผ่นปิดด้านหลัง และยางซิลิโคน มีค่าความนำทางไฟฟ้า เป็น  $1 \times 10^{-14}$  s/m,

$1 \times 10^{-12}$  s/m,  $1 \times 10^{-13}$  s/m และ  $1 \times 10^{-13}$  s/m ตามลำดับ

ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.24

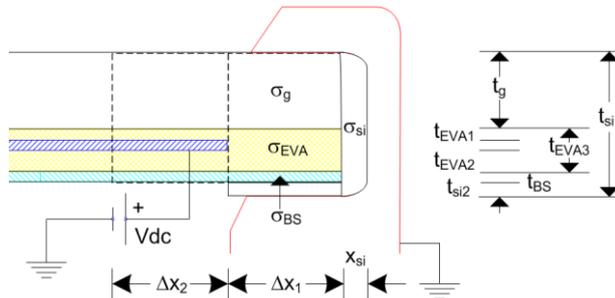


รูปที่ 4.24 ความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผงและภาพขยาย

จากผลการจำลองเห็นได้ว่า บริเวณความเข้มสนามไฟฟ้าที่เชื่อมโยกันและมีค่าสูง จะอยู่ระหว่างปลายขอบเซลล์แสงอาทิตย์ด้านในกับขอบแผงอะลูมิเนียมด้านล่าง

**แบบจำลองสภาพค่าความต้านทานระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง**

เนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์แสงอาทิตย์ด้านในกับขอบอะลูมิเนียมมีค่าสูง โดยกำหนดให้แผ่นเซลล์และโครงแผงเป็นอิเล็กโทรดตัวนำมีค่าความนำทางไฟฟ้าที่ดี มีศักย์สูงอยู่ที่แผ่นเซลล์และโครงแผงเป็นกราวด์ ดังนั้นการเขียนแบบจำลองจึงมุ่งเน้นเฉพาะสภาพค่าความต้านทานระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง แสดงดังรูปที่ 4.25



**รูปที่ 4.25** โครงสร้างแบบจำลองระหว่างขอบเซลล์กับโครงแผง

กำหนดให้

: ความยาวขอบแผงด้านหนึ่งเท่ากับ  $l$  เมตร

: กระจก ค่าความนำไฟฟ้า ( $\sigma_g$ ) น้อยกว่าไดอิเล็กตริกชนิดอื่น ความหนาของกระจก ( $t_g$ ) มากกว่าวัสดุชนิดอื่นมากๆ กระจกไม่เสื่อมสภาพที่สามารถสังเกตเห็นได้ เหมือนการเสื่อมสภาพของอีวีเอ แผ่นปิดหลัง และยางซิลิโคน เพื่อลดความซับซ้อนที่ไม่จำเป็น จึงไม่นำกระจกมาพิจารณาในแบบจำลองนี้

ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ที่นำมาพิจารณามีดังต่อไปนี้

: ค่าความนำไฟฟ้าของอีวีเอ  $\sigma_{EVA}$  แผ่นปิดหลัง  $\sigma_{BS}$  และยางซิลิโคน  $\sigma_{si}$

: ความหนาอีวีเอแบ่งเป็นสามส่วน ความหนาอีวีเออยู่ระหว่างกระจกกับแผ่นเซลล์  $t_{EVA1}$ , ความหนาอีวีเออยู่ระหว่างแผ่นเซลล์กับแผ่นปิดหลัง  $t_{EVA2}$  และความหนาอีวีเออยู่ระหว่างขอบแผ่นเซลล์กับขอบแผง  $t_{EVA3}$

: ความหนาของซิลิโคนระหว่างขอบแผงกับโครงแผงด้านข้าง  $t_{si1}$ , ความหนาของยางซิลิโคนระหว่างแผ่นปิดหลังกับโครงแผงด้านล่าง  $t_{si2}$  และความหนาของแผ่นปิดหลัง  $t_{BS}$

: ความกว้างแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ความกว้างของยางซิลิโคนระหว่างขอบแผ่นเซลล์กับขอบแผง  $x_{si}$ , ความกว้างของยางซิลิโคนระหว่างขอบแผงถึงขอบเซลล์  $\Delta x_1$  และความกว้างของยางซิลิโคนระหว่างขอบแผงถึงขอบเซลล์  $\Delta x_2$

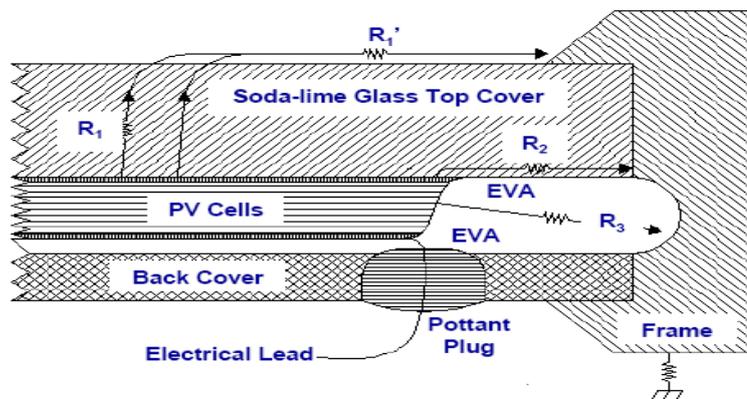
สามารถเขียนสมการหาค่าประมาณของความต้านทานของแผง ( $R_m$ ) ได้จาก

$$R_m \approx \left[ \left( \frac{t_{EVA3}}{\sigma_{EVA} \Delta X_1 \ell} \right) + \left( \frac{t_{si1}}{\sigma_{si} X_{si} \ell} \right) \right] // \left[ \left( \frac{t_{EVA2}}{\sigma_{EVA} \Delta X_2 \ell} \right) + \left( \frac{t_{BS}}{\sigma_{BS} \Delta X_1 \ell} \right) + \left( \frac{t_{si2}}{\sigma_{si} \Delta X_1 \ell} \right) \right] \quad (4.1)$$

### การวิเคราะห์ค่าความต้านทานของแผงที่เกิดการเสื่อมสภาพ

ค่าความต้านทานในทางอุดมคติของแผงควรมีค่าเป็นอนันต์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสรั่วไหลจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือทำให้แผงเกิดความเสียหายขึ้นได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ มีกระแสรั่วไหลผ่านค่าความต้านทานที่ไม่เป็นอนันต์ของเนื้อฉนวนส่วนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านหน้าของแผง มีโอกาสเสื่อมสภาพได้มากกว่าด้านอื่นๆ เนื่องจากความร้อนและรังสีต่างๆ จากดวงอาทิตย์

ในหัวข้อนี้ กำหนดให้กระแสรั่วไหลผ่านฉนวนในส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กระแสรั่วไหลผ่านค่าความต้านทานของเนื้อฉนวนในส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.26 กระแสรั่วไหลผ่านค่าความต้านทานของเนื้อฉนวนในส่วนต่างๆ ประกอบด้วย

1. กระแสรั่วไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านความต้านทานฉนวนอีวีเอ ( $R_3$ ) ไปยังโครงขอบแผง
2. กระแสรั่วไหลผ่าน  $R_3$  และผ่านความต้านทานกระจกด้านข้าง ไปยังโครงขอบแผง ( $R_2$ )
3. กระแสรั่วไหลผ่าน  $R_3$  และผ่านความต้านทานกระจกด้านบน ( $R_1$ ) และผ่านผิวหน้ากระจก ไปยังโครงขอบแผง ( $R_1'$ )
4. กระแสรั่วไหลผ่าน  $R_3$  และผ่านความต้านทานของแผงปิดหลัง ( $R_{bs}$ )

จากรูปที่ 4.26

: กระแสที่รั่วไหลทั้งสามมีทิศทางไหลออกจากเซลล์ไปยังโครงผ่านเนื้อฉนวนชั้นต่างๆ โดยกระแสรั่วไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านความต้านทานฉนวนอีวีเอ ( $R_3$ ) ไปยังโครงขอบแผงจะไหลขนานไปกับกระแสรั่วไหลผ่าน  $R_3$  และผ่านความต้านทานกระจกด้านข้างไปยังโครงขอบแผง ( $R_2$ )

: ค่าความต้านทาน  $R_2$  และ  $R_3$  ทั้งสองอนุกรมกัน นั่นคือ  $(R_2 + R_3)$  และกระแสที่ไหลผ่านยังไหลขนานไปกับกระแสรั่วไหลผ่าน  $R_3$  และผ่านความต้านทานกระจกด้านบน ( $R_1$ ) และผ่านผิวหน้ากระจกไปยังโครงขอบแผง ( $R_1'$ ) จึงถือว่าค่าความต้านทานทั้งสามอนุกรมกัน นั่นคือ  $(R_1 + R_3 + R_1')$

ในทำนองเดียวกัน ทางด้านหลังของแผงก็มีกระแสรั่วไหลผ่าน  $R_3$  และผ่านความต้านทานของแผงปิดหลัง ( $R_{bs}$ ) เช่นเดียวกัน จึงกำหนดให้ค่าความต้านทานทั้งสองอนุกรมกัน นั่นคือ  $(R_3 + R_{bs})$  ดังนั้นค่าความต้านทานรวมระหว่างขอบแผงกับขอบโครงก็คือ

$$R_T = (R_3 + R_1 + R_1') // (R_3 + R_2) // R_3 // (R_3 + R_{bs}) \quad (4.2)$$

และเขียนสมการได้เป็น

$$R_T = \frac{R_3(R_3 + R_1 + R_1')(R_3 + R_2)(R_3 + R_{bs})}{R_3(R_3 + R_2)(R_3 + R_{bs}) + R_3(R_3 + R_1 + R_1')(R_3 + R_{bs}) + (R_3 + R_1 + R_1')(R_3 + R_2)(R_3 + R_{bs}) + R_3(R_3 + R_1 + R_1')(R_3 + R_2)} \quad (4.3)$$

จากสมการข้างบน ค่าความต้านทานรวมของแผงมีโอกาสที่จะแปรตามค่าของความต้านทานฉนวนอีวีเอ  $R_3$  ได้มากที่สุด

## 4.5 การทดสอบและเลียนแบบแผงด้วยแบบจำลองฉนวนและสายส่งภายใต้แรงดันอิมพัลส์

### 4.5.1 การตรวจสอบสภาพภายนอกของแผงสำหรับการทดสอบอิมพัลส์

ลักษณะด้านหน้าแผงที่นำมาทดสอบ มีหลายลักษณะได้แก่

: แผง B1-3 ไม่มีการหลุดลอกของอีวีเอ

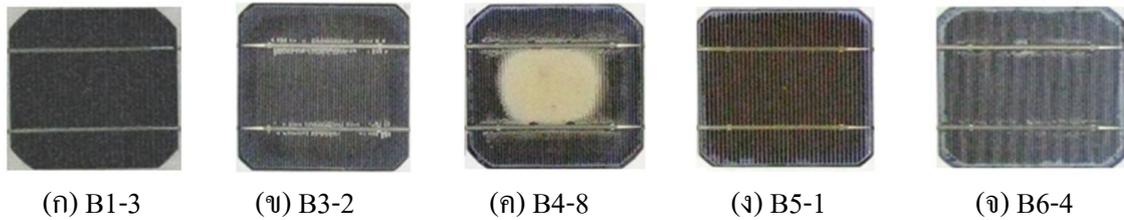
: แผง B3-2 มีการหลุดลอกของอีวีเอเป็นจุดใกล้บัสบาร์และอีวีเอเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

: แผง B4-8 มีการหลุดลอกของอีวีเอเต็มพื้นที่กึ่งกลางเซลล์และอีวีเอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

: แผง B5-1 มีการหลุดร่อนของอีวีเอที่รอบๆ ขอบเซลล์และอีวีเอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม

: แผง B6-4 มีการหลุดร่อนของอีวีเอที่รอบๆ ขอบเซลล์และอีวีเอเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาล

ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ลักษณะด้านหน้าแผงที่นำมาทดสอบอิมพัลส์

ส่วนสภาพด้านหลังแผงแสดงในรูปที่ 4.28 คือ

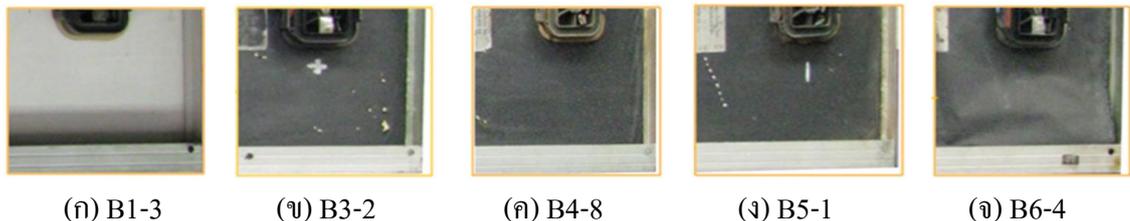
: แผง B1-3 แผ่นปิดหลังไม่หลุดลอก และกาวฉนวนกอบอยู่ในสภาพปกติคือเหนียวและยึดหยุ่นได้

: แผง B3-2 แผ่นปิดหลังบางส่วนหลุดลอกและมีรอยถลอกหรือฉีกขาด และกาวฉนวนกอบมีลักษณะกรอบแตกเป็นผง

: แผง B4-8 แผ่นปิดหลังมีการหลุดลอกเล็กน้อยและกาวฉนวนกอบมีลักษณะ แตกเป็นลาย

: แผง B5-1 แผ่นปิดหลังไม่มีการหลุดลอก แต่กาวฉนวนกอบอยู่ในสภาพกรอบแตก

: แผง B6-4 แผ่นปิดหลังหลุดลอกและมีรอยถลอกมากที่สุด และกาวฉนวนกอบแตกกรอบหลุดผงตลอดแนวรอบขอบแผงกับโครง



รูปที่ 4.28 ลักษณะด้านหลังและขอบแผงที่นำมาทดสอบอิมพัลส์

#### 4.5.2 การบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ที่สังเกตเห็นได้ด้วยออสซิลโลสโคป

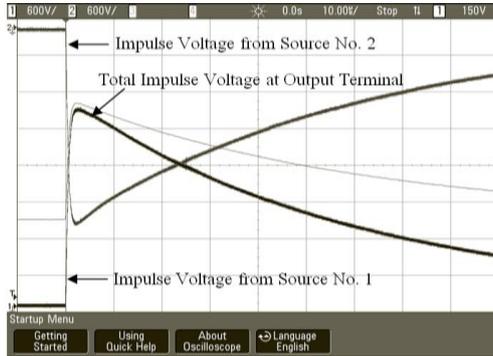
ได้ทดสอบแผงโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์จาก 1 kV ถึง 8 kV เข้าด้านหน้าแผงที่มีแผ่นอะลูมิเนียมติดอยู่บนกระจก ตามวิธีทดสอบที่ระบุในส่วน 3.5.1 ผลการบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ในแต่ละแผงที่มีรูปคลื่นเหมือนกันแสดงในภาคผนวก จ ในที่นี้ ขอกกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่รูปคลื่นไม่เหมือนกันคือ

: แรงดันอิมพัลส์ก่อนต่อเข้ากับแผง มีลักษณะดังรูปที่ 4.29 (ก)

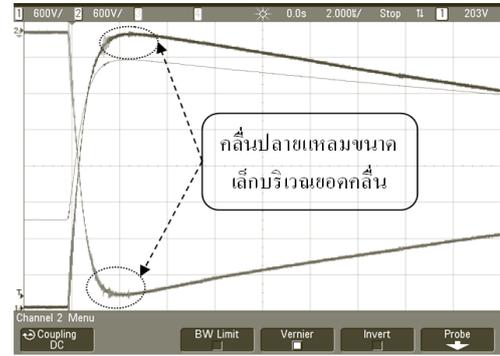
: เมื่อต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายต่อเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียมบาง และขั้วลบของแหล่งจ่ายต่อเข้าขั้วต่อสายของแผงที่ถูกลัดวงจร วัตรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบพบว่า

: แผง B1-3 ให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เหมือนกันกับขณะที่ไม่ต่อเข้ากับแผง นั่นหมายความว่าแผงนี้ไม่เกิดการเสียหายฉนวนของฉนวนแผงระหว่างกระจกกับกับเซลล์

: แผลง B4-8 พบว่าเกิดยอดคลื่นปลายแหลมขนาดเล็กบริเวณยอดคลื่นแรงดันอิมพัลส์ดังแสดง  
 ในรูปที่ 4.29 (ข)



(ก) ก่อนจ่ายเข้าแผลง



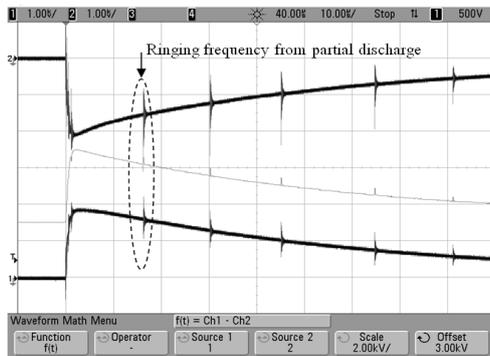
(ข) หลังจ่ายเข้าแผลง B4-8

รูปที่ 4.29 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 8 kV

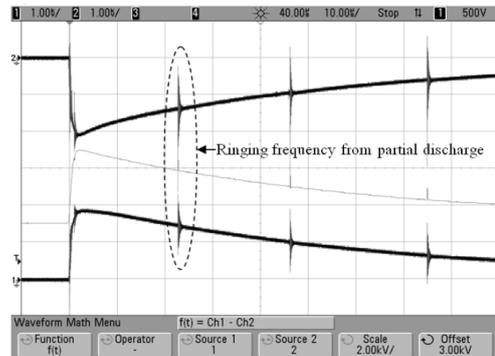
การทดสอบอีกกรณีหนึ่งเป็นการทดสอบจนวนของแผลง โดยการจ่ายแรงดันอิมพัลส์เข้าระหว่างโครง  
 ขอบแผลงกับขั้วต่อสายเอาต์พุตที่ถูกลัดวงจรของแผลง เพิ่มแรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจาก 1 kV ถึงแรงดัน  
 ค่ายอด 4 kV

: ในขณะที่ไม่มีการต่อเข้าสายป้อนแรงดันให้กับแผลง ลักษณะรูปคลื่นแรงดันจากแหล่งกำเนิด  
 อิมพัลส์ยังมีรูปคลื่นปกติ สอดคล้องกับมาตรฐานรูปคลื่นฟ้าผ่าที่กำหนด

: เมื่อแรงดันอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับแรงดันค่ายอด 4 kV พบว่าเกิดยอดคลื่นปลายแหลม  
 ขนาดเล็กหลายลูกคลื่น ในแผลง B3-2 และ แผลง B6-4 ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) B3-2



(ข) B6-4

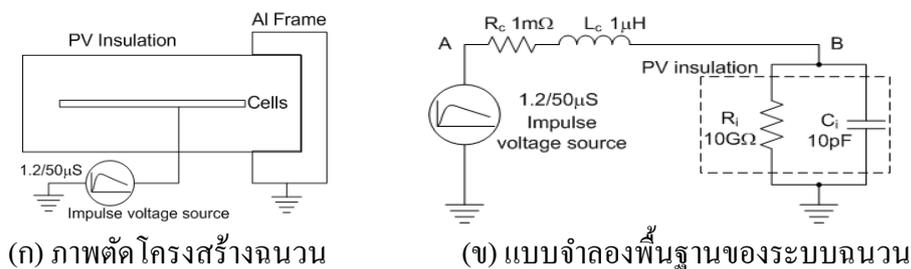
รูปที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s หลังจ่ายเข้าแผลงที่ระดับแรงดัน 4 kV

คลื่นยอดแหลมเล็กหลายลูกคลื่นในรูปที่ 4.30 (ก) และ (ข) ซ้อนอยู่กับแรงดันอิมพัลส์ มีลักษณะ  
 เฉพาะที่เรียกว่า “ความถี่วงสัญญาณ (Ringing Frequency)” ตามที่กล่าวไว้แล้วในส่วนที่ 2.6.3 เกิดที่  
 ความถี่หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์ เกิดขึ้นเป็นห้วงๆ คล้ายกับการปล่อยประจุบางส่วนในโพรงจนวน  
 ของแข็ง อย่างไรก็ตามการปล่อยประจุบางส่วนจากคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะในระบบจนวน  
 แผลงยังไม่ค่อยมีการทดลองมากนัก ดังนั้นเพื่อทำความเข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงได้โมเดลลิ่งหรือ

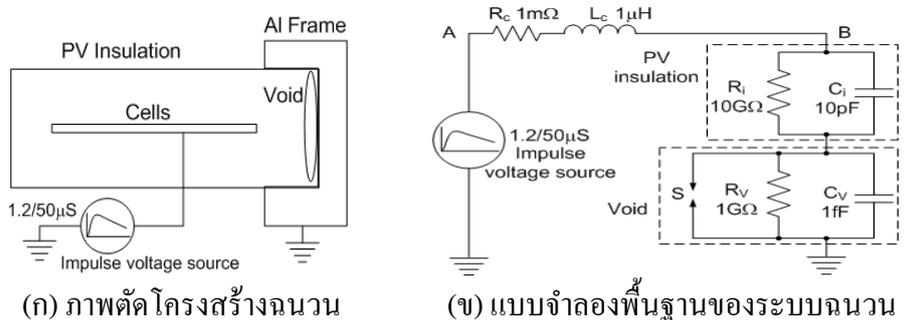
เลียนแบบการปล่อยประจุบางส่วนจากคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ด้วยโปรแกรมสถานะชั่วคราวทางสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก (Electromagnetic Transients Program, EMTP) ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

**4.5.3 การเลียนแบบแบบแ่งด้วยแบบจำลองจนวนและสายส่งภายใต้แรงดันอิมพัลส์**

ในกรณีที่ไม่เกิดโพรจนวนบริเวณขอบแ่งกับโครงแ่ง แบบจำลองจนวนจะถูกแทนด้วยตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทาน แต่ถ้าเกิดโพรจนวนบริเวณขอบแ่งกับโครงแ่ง จากทฤษฎีแบบจำลองโพรจนวนของแ่งและการปล่อยประจุบางส่วนในโพรจนวนนั้น โพรจนวนถูกแทนด้วยวงจรมานของ ตัวเก็บประจุ  $C_v$  ตัวต้านทาน  $R_v$  และช่องว่างประกายข้าม  $s$



**รูปที่ 4.31** แบบจำลองของจนวนขอบแ่งในกรณีไม่มีโพรจนวน



**รูปที่ 4.32** แบบจำลองของจนวนขอบแ่งในกรณีมีโพรจนวน

ดังนั้นในการจำลองจนวนขอบแ่ง ภายใต้เงื่อนไขการป้อนแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจึงแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ

- : กรณีแรกเป็นแบบจำลองจนวนขอบแ่ง เมื่อไม่มีโพรจนวนดังแสดงในรูปที่ 4.31
- : กรณีที่สองเป็นแบบจำลองของจนวนที่ขอบแ่ง เมื่อมีโพรจนวนที่บริเวณขอบแ่ง ดังแสดงรูปที่ 4.32

ใช้โปรแกรมสถานะชั่วคราวทางสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก EMTP ศึกษาแบบจำลองทั้งสอง โปรแกรมนี้มีแบบจำลองครบถ้วนคือ (i) แบบจำลองของแหล่งกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า และ (ii) แบบจำลองของช่องว่างประกายข้ามที่แทนการปล่อยประจุในโพรจนวน ซึ่งแทนด้วยสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า

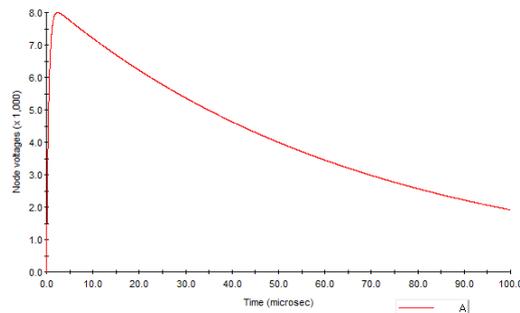
```

*
* - - - - - Case identification card
Impulse to Good PU Module (Sim9.DAT)
*
* - - - - - Time card
0.01e-6 100e-6 1 1 0 1e-12 0 0001 0 0
*
* - - - - - Lumped RLC branch
A B 0.001 1E-3 3
B 10e9 3
B 10e-6 3
$ = = End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = =
$ = = End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = =
*
* - - - - - Surge function
15 A 3 8e3 1.2e-6 50e-6 0 100e-6
$ = = End of level 3: Sources = = = = =
1 **** All voltages will be printed ****
$ = = Level 5: End of data case = = = = =
    
```

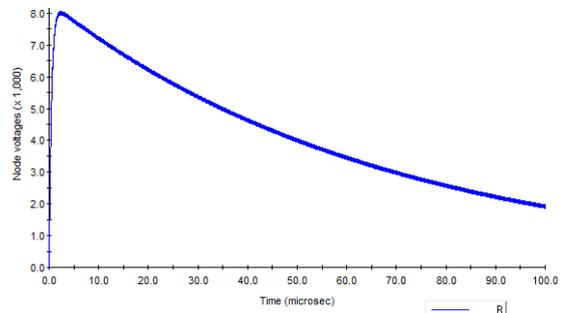
รูปที่ 4.33 ลำดับการกรอกข้อมูลให้กับโปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.26

แหล่งกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าในโปรแกรม EMTP มีชื่อเรียกว่าเสิร์จฟังก์ชัน (Surge Function) คือ ITYPE = 15 ซึ่งอยู่ในบรรทัดที่ 17 ของรูปที่ 4.33 และถูกกำหนดให้เป็นโนด A หมายเลข 3 หมายถึงให้คำนวณหาทั้งค่าแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดันค่ายอด 8 kV รวมทั้งเวลาน้ำคลื่น 1.2  $\mu$ s และเวลาหางคลื่น 50  $\mu$ s จุดเวลาเริ่มต้นอยู่ที่ 0  $\mu$ s และเวลาสิ้นสุด 100  $\mu$ s

ส่วนค่า Lumped RLC Branch ในโนดต่างๆ สามารถกำหนดโนดและค่าได้โดยตรงเช่น จากรูปที่ 4.31 ระหว่างโนด A และโนด B มีตัวต้านทาน 1 m $\Omega$  ต่ออนุกรมกับความเหนี่ยวนำ 1  $\mu$ H เมื่อป้อนในโปรแกรม EMTP คือบรรทัดที่ 9 โหนดแรกคือโนด A และอีกโนดหนึ่งคือ B ค่าความต้านทานคือ 0.001  $\Omega$  ต่ออนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำ 1E-3 mH เนื่องจากโปรแกรมกำหนดหน่วยเป็น mH นั้นเอง และที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ ถ้าหากมีการกำหนดโนดแรก แต่โนดถัดไปไม่กำหนดหรือเว้นว่างไว้ โปรแกรมจะตีความหมายว่าเป็นโนดอ้างอิงลงกราวด์โดยปริยาย ยกตัวอย่างเช่น บรรทัดที่ 11 ในรูปที่ 4.33 โหนดแรกคือโนด B และโนดถัดไปไม่กำหนด ส่วนค่า 10e-6 ก็คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $10 \times 10^{-6}$  แต่ในโปรแกรมถูกกำหนดหน่วยไปเป็น  $\mu$ F ดังนั้นค่าจริงก็คือ 10 pF ซึ่งก็คือค่าความจุของฉนวนหุ้มแผง (C) ที่ต่ออยู่ที่โนด B โดยมีปลายอีกด้านหนึ่งต่อลงกราวด์นั่นเอง



(ก) แรงดันที่โนด A



(ข) แรงดันที่โนด B

รูปที่ 4.34 การเขียนแบบแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.32

ผลการเขียนแบบหาแรงดันแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าที่โนด A ดังแสดงในรูปที่ 4.34 (ก) สำหรับแรงดันตกคร่อมระหว่างเซลล์กับขอบแผงหรือแรงดันที่โนด B เทียบกับกราวด์แสดงดังรูปที่ 4.34 (ข)

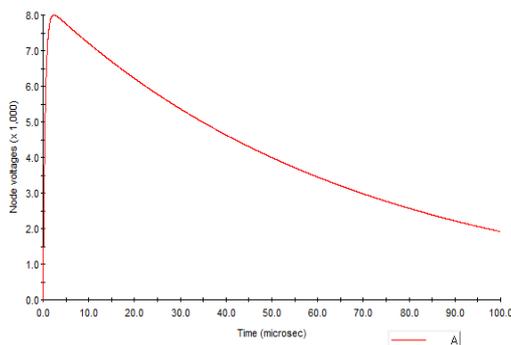
เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.34 (ก) พบว่ามีลักษณะที่เหมือนกัน นั่นคือไม่เกิดการเสียหายยับยั้งระหว่างฉนวนที่กั้นระหว่างขอบเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงขอบแผงนั่นเอง

```

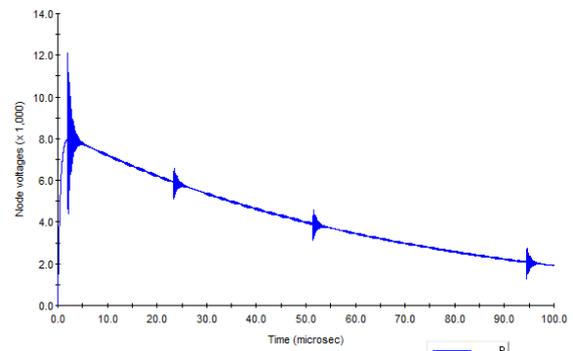
*
* - - - - - Case identification card
* Impulse to Good PV Module (Sim3 7.DAT)
*
* - - - - - Time card
* 0.001e-6 100e-6 1 1 0 1e-12 0 0001 0 0
*
* - - - - - Lumped RLC branch
* A B C 0.001 1E-3 3
* B C 10e9 3
* C 10e-6 3
* C 1e9 1e-9 3
$ = = End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = =
*
* C 2e-6 6e-6 0 1.5e3 10 3
$ = = End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = =
*
* - - - - - Surge function
15 A 3 8e3 1.2e-6 50e-6 0 100e-6
$ = = End of level 3: Sources = = = = =
$ 1 **** All voltages will be printed ****
$ = = Level 5: End of data case = = = = =
    
```

รูปที่ 4.35 ลำดับการกรอกข้อมูลให้กับโปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.32

สำหรับแบบจำลองแทนการปล่อยประจุในโพรงฉนวน S ดังแสดงไว้ในแบบจำลองของฉนวนขอบแผงในกรณีมีโพรงฉนวนรูปที่ 4.32 ซึ่งถูกแทนด้วยสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าในโปรแกรม EMTP ด้วยการกรอกข้อมูลในบรรทัดที่ 16 ในรูปที่ 4.35 โดยกำหนดโนด C ไม่มีการสับสวิตช์เกิดขึ้นก่อนเวลา 2  $\mu$ s และยังมีเงื่อนไขอีกว่าจะปิดวงจรได้ต่อเมื่อ ค่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่ามากกว่าแรงดันเสียหายยับยั้ง ตัวเลขตัวถัดมาคือ 6  $\mu$ s เป็นเวลาหน่วงเพื่อให้การการปล่อยประจุบางส่วนสิ้นสุดไปก่อน โดยไม่สับสวิตช์ปิดวงจรซ้ำในช่วงเวลานี้ ส่วนเลข 0 คือ Current Margin เท่ากับ 0 เป็นตัวกำหนดการปล่อยประจุต้องเท่ากับศูนย์ จึงถือว่าสวิตช์ปิดวงจรอย่างสมบูรณ์ ตัวเลข 1.5e3 คือแรงดันเสียหายยับยั้งระหว่างขั้วหน้าสัมผัสของสวิตช์มีหน่วยเป็นโวลต์ ถัดไปคือค่าเลข 10 หมายถึงค่าความต้านทานภายในของสวิตช์มีค่าเท่ากับ 10  $\Omega$  สำหรับเลขตัวท้ายสุดทางขวามือคือเลข 3 หมายถึงให้คำนวณหาทั้งค่า แรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าของสวิตช์นี้



(ก) แรงดันที่โนด A



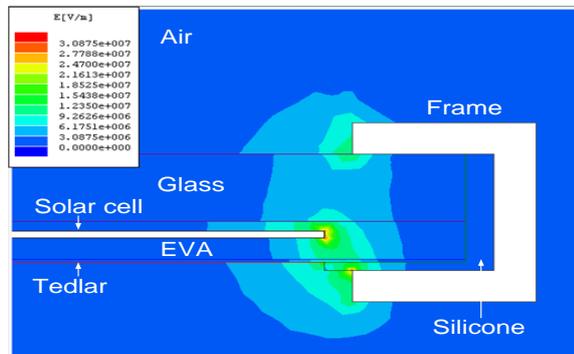
(ข) แรงดันที่โนด B

รูปที่ 4.36 การเขียนแบบแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.35

ผลการเขียนแบบหาแรงดันแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าที่กำเนิดขึ้น โนด A ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (ก) เทียบกับแรงดันตกคร่อมระหว่างเซลล์กับขอบแผง ก็คือแรงดันที่โนด B เทียบกับกราฟแสดงดังรูป

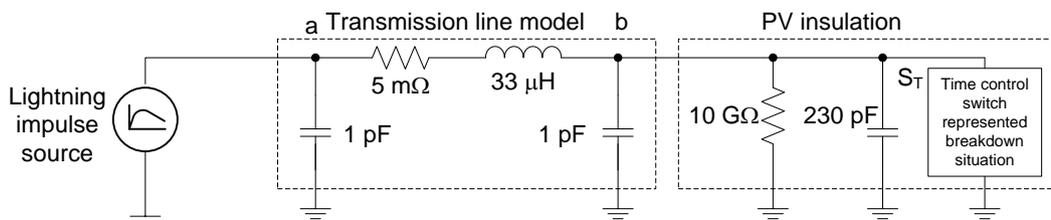
ที่ 4.36 (ข) จะเห็นว่าการเลียนแบบเกิดความถี่สัญญาณคล้ายกับการทดลองจริงที่จ่ายแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu\text{s}$  เข้าแผงจากการทดลอง โดยที่ขอบแผงเหล่านั้นมีการหลุดลอกและมีรอยถลอกหรือฉีกขาดของแผ่นปิดหลัง และกาวฉนวนขอบแตกกรอบหลุดผงบบริเวณเนวรอบขอบแผงกับโครง

กรณีที่ต้องการทราบว่า ฉนวนขอบแผงน่าจะมีโอกาสเกิดการเสียหายฉนวนที่แรงดันระดับใดนั้น จำเป็นต้องทราบความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) บริเวณขอบฉนวนของแผงกับโครงที่เกินกว่าความคงทนทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ของวัสดุฉนวนหุ้มฉนวนแผงเสียก่อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างการหุ้มฉนวนบริเวณแผงประกอบด้วย กระจก อีวีเอ แผ่นปิดหลัง และกาวฉนวนขอบ ในขณะที่ปลายขอบข้างเซลล์แสงอาทิตย์มีความบางราว 0.3 มม. จึงไม่ง่ายถ้าต้องการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยสูตรคำนวณ จำใช้โปรแกรม Ansoft ช่วยคำนวณหาการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับขอบโครงแผง ดังแสดงในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับขอบโครงแผงที่แรงดัน 27 kV

รูปที่ 4.37 เป็นภาพแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขอบเซลล์กับขอบโครงแผงที่แรงดัน 27 kV มีความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขอบเซลล์สูงถึง 30 MV/m หรือ 30 kV/mm ซึ่งเท่ากับค่าความคงทนทางไดอิเล็กตริกของอีวีเอที่หุ้มฉนวนเซลล์ไว้ ดังนั้นหากป้อนแรงดันสูงกว่า 27 kV ขึ้นไปย่อมมีโอกาสเกิดการปล่อยประจุทำลาย โดยการเจาะทะลุฉนวนระหว่างขอบเซลล์กับขอบแผงได้



รูปที่ 4.38 แบบจำลองแผงสำหรับเลียนแบบการเกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนของแข็ง

แบบจำลองการเสียหายฉนวนที่แรงดัน 27 kV ของฉนวนหุ้มฉนวนเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4.38 ประกอบด้วย

: แหล่งกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า ถูกกำหนดให้มีขนาดแรงดันค่ายอด 27 kV รวมทั้งเวลาหน้าคลื่น 1.2  $\mu$ s และเวลาหางคลื่น 50  $\mu$ s

: แบบจำลองสายส่ง ซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานของตัวนำ 5 m $\Omega$  ค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำ 33  $\mu$ H และค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน 1 pF

ส่วนแบบจำลองฉนวนระหว่างขบเซลล์กับขบโครงแบ่งประกอบด้วย ค่าความต้านทานของฉนวน 10 G $\Omega$  และค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน 230 pF และมีส่วนของการแทนการเสียดสภาพล้นของเนื้อฉนวนขณะเกิดการลัดวงจรเนื่องจากเกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนของแข็งด้วย Time-controlled Switch ( $S_T$ )

```
*
* PV module with transmission line under impulse test 0 0
*
* 0.01e-6 100e-6 1 1 0 Time card 0001 0 0
*
* . . . . . Lumped RLC branch
* a b 1e-6 3
* a b 1e-6 3
* b 0.005 33e-3 3
* b 10e9 3
* $ = = End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = =
*
* . b . . . 10e-6 . Time-controlled switch 0 3
* $ = = End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = =
*
* . a 3 . 27e3 . 1.2e-6 50e-6 . Surge function 0 100e-6
* $ = = End of level 3: Sources = = = = =
* 1 **** All voltages will be printed ****
* $ = = Level 5: End of data case = = = = =
```

รูปที่ 4.39 ลำดับการกรอกข้อมูลให้กับโปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.30

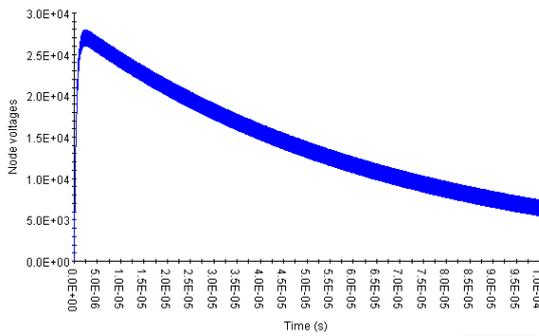
เมื่อนำแบบจำลองแฉงจากรูปที่ 4.38 กรอกข้อมูลลงในโปรแกรม EMTP มีลำดับการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.39

: ค่า Lumped RLC Branch ตั้งแต่บรรทัดที่ 9 ถึง 13 ประกอบด้วย ค่าตัวเก็บประจุของสายส่งที่โนด a และ b มีค่าเท่ากับ 1e-6  $\mu$ F หรือ 1 pF ระหว่างโนด a และโนด b มีค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งเท่ากับ 0.005  $\Omega$  และ 33e-3 mH หรือ 33  $\mu$ H ตามลำดับ

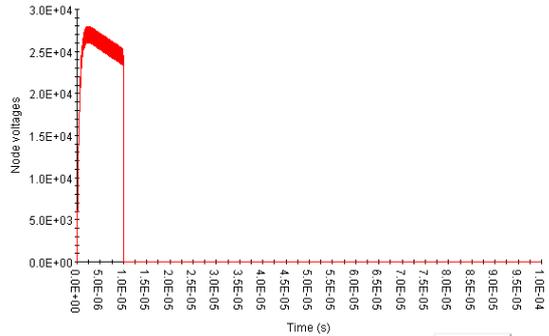
: สำหรับแบบจำลองฉนวนกำหนดให้เป็นตัวต้านทาน 10 G $\Omega$  ขนานกับตัวเก็บประจุ 230 pF อยู่ที่โนด b

: ส่วน Time-controlled Switch เป็นตัวกำหนดเวลาการเกิดการเสียดสภาพล้นของฉนวนที่เวลา 10  $\mu$ s และ

: บรรทัดที่ 22 คือแหล่งกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าอยู่ใน Surge Function ที่ 15 ของรูปที่ 4.39 และถูกกำหนดให้เป็นโนด a มีขนาดแรงดันค่ายอด 27 kV เวลาหน้าคลื่น 1.2  $\mu$ s และเวลาหางคลื่น 50  $\mu$ s จุดเวลาเริ่มต้นอยู่ที่ 0  $\mu$ s และเวลาสิ้นสุด 100  $\mu$ s



(ก) แรงดันที่ โหนด a



(ข) แรงดันที่ โหนด b

**รูปที่ 4.40** การเขียนแบบแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม EMTP สำหรับวงจรดังรูปที่ 4.38

ผลการการเขียนแบบกรณีที่เกิดการเสียดสภาพฉนวนในฉนวนบริเวณขอบแผง โดยป้อนแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าซึ่งมีค่ายอดอยู่ที่ 27 kV ที่ โหนด a ดังรูปที่ 4.40 (ก) ผ่านแบบจำลองสายส่งไปยังแบบจำลองฉนวนที่เกิดการเสียดสภาพฉนวน จะทำให้แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าลดลงสู่ศูนย์ เนื่องจากเกิดการปล่อยประจุหลายฉนวนกลายเป็นส่วนที่นำไฟฟ้าได้

กรณีการทดสอบแผงโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ 2 kV ถึง 8 kV เข้าด้านหน้าแผงที่มีแผ่นอะลูมิเนียมติดอยู่บนกระจก ไม่ได้มีจุดประสงค์เพื่อทำให้เกิดการเสียดสภาพฉนวนกระจก แต่ต้องการดูผลการสนองต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของการล่อร่อนของอีวีเอด้านหน้าแผง ซึ่งมีเพียงแผง B4-8 เท่านั้นที่พบว่า มีแนวโน้มเริ่มเกิดการตอบสนองต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ยอดคลื่นเกิดขึ้นได้บ้างเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.40 (ข) หากมีเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีขนาดแรงดันสูงกว่า อาจจะได้เห็นผลการตอบสนองต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ดีกว่านี้ อย่างไรก็ตาม การทดสอบแผงโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ระหว่างโครงขอบแผงกับเซลล์ที่ถูกห่อหุ้มโดยอีวีเอ จะเห็นผลการตอบสนองที่ชัดเจน เนื่องจากอีวีเอมีค่าความคงทนต่อแรงดันน้อยกว่ากระจก

#### 4.6 สมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นหุ้มฉนวนที่มีการเสื่อมสภาพต่างกัน

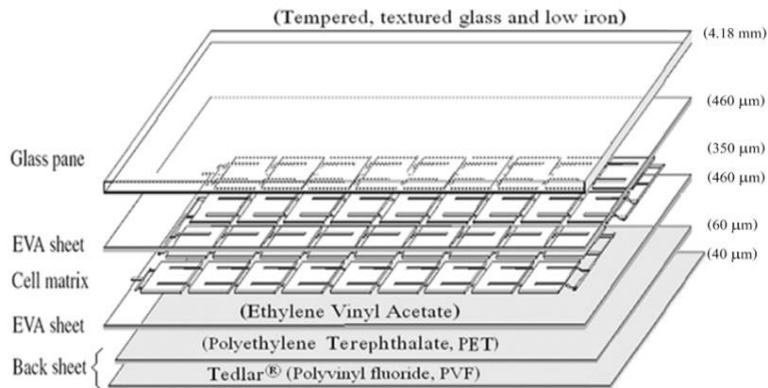
##### 4.6.1 การตรวจสอบสภาพภายนอกด้วยชิ้นตัวอย่างวัสดุจากแผงที่เสื่อมสภาพ

ชิ้นตัวอย่างวัสดุที่นำมาจากแผงเซลล์ที่เสื่อมสภาพ เป็นแผงเซลล์กลุ่ม B2-1 ถึง B7-1 โดยมีการสุ่มเลือกชิ้นตัวอย่างวัสดุจากแผงเซลล์ที่เกิดการเสื่อมสภาพ ยกเว้นอีวีเอที่อยู่ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่สามารถลอกอีวีเอออกมาเป็นแผ่น เพื่อนำไปวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุได้ สำหรับชิ้นตัวอย่างวัสดุที่พอจะรวบรวมได้มีดังต่อไปนี้คือ

**แผงเซลล์กลุ่ม B2-1**

โครงสร้างของแผงกลุ่ม B2-1 มีชั้นไดอิเล็กตริกต่างชนิด หนาต่างกัน วางซ้อนกันดังรูปที่ 4.41 ประกอบด้วย กระจก (หนา 4.18 มม.) อีวีเอ (460 ไมครอน) แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ (350 ไมครอน) อีวีเอ (460 ไมครอน) แผ่นปิดหลังพีอีที (60 ไมครอน) และพีวีเอฟ (40 ไมครอน)

ชิ้นตัวอย่างอีวีเอแผ่นปิดหลังแผง B2-1 ที่เลือกเป็นชิ้นงานตัวอย่างมีขนาด 10 ซม. x 10 ซม. แสดงดังรูปที่ 4.42 แผ่นอีวีเอมีลักษณะค่อนข้างใสออกเหลืองเพียงเล็กน้อย ถัดมาเป็นแผ่นพีอีทีที่ออกเป็นสีน้ำตาล ส่วนแผ่นปิดหลังสุดด้านที่ติดอยู่กับแผ่นพีอีทีก็มีสีเหลืองด้วย แต่ด้านหลังออกสีเทาขาวขุ่น



รูปที่ 4.41 โครงสร้างของแผงกลุ่ม B2-1

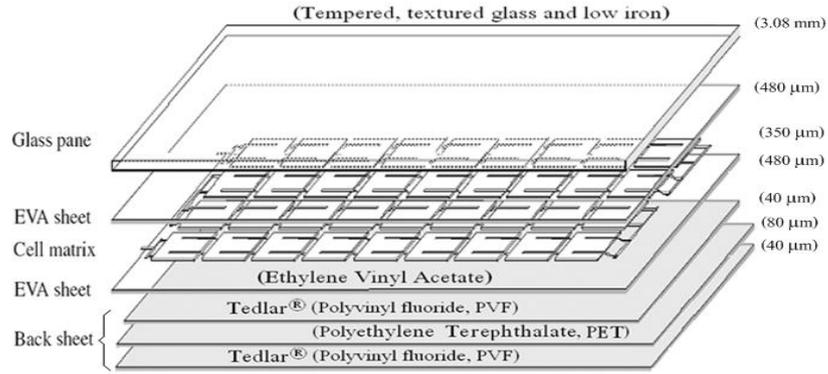


(ก) อีวีเอ (ข) แผ่นพีอีที (ใส) (ค) ด้านหน้าแผ่นเทดลาร์ (ง) ด้านหลังแผ่นเทดลาร์

รูปที่ 4.42 ชิ้นตัวอย่างแผ่นอีวีเอ แผ่นพีอีที และแผ่นเทดลาร์ของแผง B2-1

**แผงเซลล์กลุ่ม B3-4**

โครงสร้างชั้นไดอิเล็กตริกวางซ้อนกันของแผงกลุ่ม B3-4 แสดงดังรูปที่ 4.43 ประกอบด้วย กระจก นีรภัยโลหะดำ (3.08 มม.) อีวีเอ (480 ไมครอน) แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ (350 ไมครอน) อีวีเอ (480 ไมครอน) แผ่นปิดหลังพีวีเอฟ (40 ไมครอน) พีอีที (80 ไมครอน) และ พีวีเอฟ (40 ไมครอน)



รูปที่ 4.43 โครงสร้างของแผง B3-4

ชิ้นตัวอย่างอีวีเอแผ่นปิดหลังมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.44 ขนาด 10 ซม. x 10 ซม. จะเห็นได้ว่า แผ่นอีวีเอของแผงกลุ่ม B3-4 มีลักษณะค่อนข้างใสออกเหลืองน้ำตาล ถัดมาเป็นแผ่นพีอีทีที่มีลักษณะขาวใส ส่วนแผ่นปิดหลังที่ติดกับอีวีเอเป็นแผ่นพีวีเอฟ มีลักษณะขาวออกเหลืองเล็กน้อย ส่วนพีวีเอฟแผ่นนอกสุดมีลักษณะเป็นสีดำขุ่น



(ก) อีวีเอ (ข) แผ่นพีอีที (ใส) (ค) แผ่นเทดลาร์ที่ติดกับอีวีเอ (ง) แผ่นเทดลาร์ด้านหลังสุด

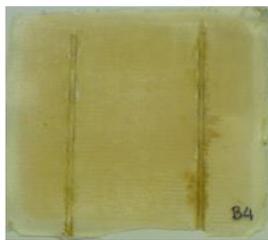
รูปที่ 4.44 ชิ้นตัวอย่างแผ่นอีวีเอ แผ่นพีอีที และแผ่นเทดลาร์ ของแผง B3-4

**แผงเซลล์ B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1**

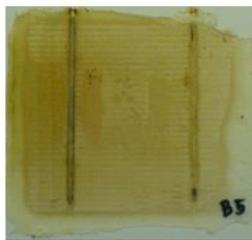
แผงในกลุ่มนี้เป็นแผงยี่ห้อและรุ่นเดียวกัน แต่แผงมีลักษณะเสื่อมสภาพที่แตกต่างกันทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผง มีโครงสร้างการจัดชั้นไดโอดอิเล็กทรอนิกส์เหมือนกัน และเหมือนกันกับแผง B3-4 แต่มีความหนาของวัสดุไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่างกัน สรุปเป็นตารางที่ 4.13 แสดงว่าแผ่นเซลล์และพีวีเอฟมีขนาดเท่ากันทั้งสี่กลุ่ม สำหรับภาพเปรียบเทียบสีของแผ่นอีวีเอ แผ่นปิดหลังพีวีเอฟที่ติดกับอีวีเอ แผ่นปิดหลังพีอีที และแผ่นปิดหลังพีวีเอฟด้านนอกสุดของแผง แสดงดังรูปที่ 4.45 ถึง 4.48 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ความหนาของไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนแผงกลุ่ม B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1

ชั้นวัสดุ (ความหนา)	กระจก (มม.)	อีวีเอ (ไมครอน)	เซลล์ (ไมครอน)	อีวีเอ (ไมครอน)	พีวีเอฟ (ไมครอน)	พีอีที (ไมครอน)	พีวีเอฟ (ไมครอน)
B4-12	3.06	440	350	440	40	80	40
B5-2	3.14	460	350	460	40	100	50
B6-3	3.12	460	350	460	40	80	50
B7-1	3.15	530	350	530	40	80	40



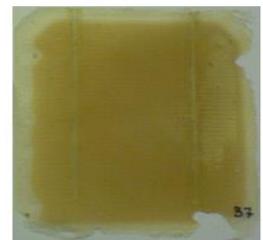
(ก) B4-12



(ข) B5-2



(ค) B6-3



(ง) B7-1

รูปที่ 4.45 อีวีเอหุ้มฉนวนด้านหน้าแผงกลุ่ม B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1

จากรูปที่ 4.42 (ก) รูปที่ 4.44 (ก) และรูปที่ 4.45 (ค) พบว่าอีวีเอ B2-1, B3-4 และ B6-3 มีลักษณะใสหรือออกเหลือง ส่วนอีวีเอ B4-12, B5-2 และ B7-1 มีลักษณะขุ่นออกสีน้ำตาล โดยเฉพาะ B7-1 มีสีน้ำตาลเข้มจัดมาก



(ก) B4-12



(ข) B5-2



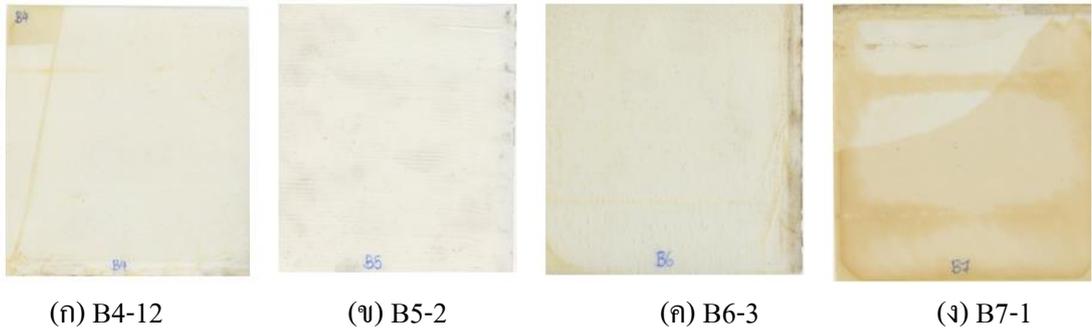
(ค) B6-3



(ง) B7-1

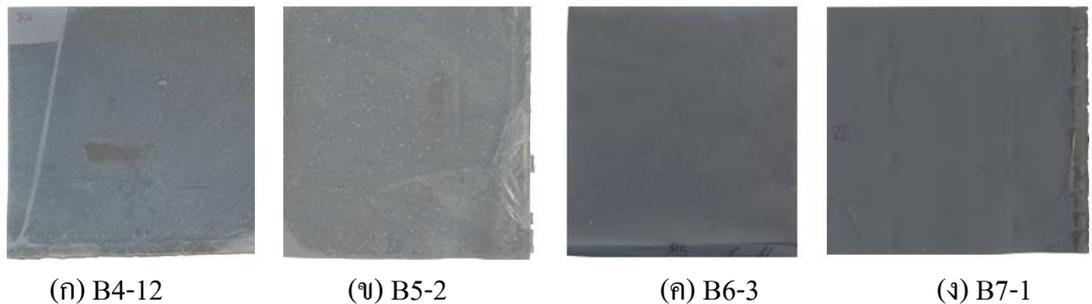
รูปที่ 4.46 แผ่นปิดหลังพีวีเอฟที่ติดกับอีวีเอ

แผ่นปิดหลังพีวีเอฟที่ติดกับอีวีเอทั้งสี่กลุ่มคือ กลุ่ม B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1 ดังรูปที่ 4.46 นอกจากมีความหนาเท่ากัน ยังมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลคล้ายกัน มีการยึดติดกับอีวีเอเป็นอย่างดี ไม่เกิดการลอกร่อนเหมือนกับสภาพที่สังเกตด้วยตาของแผ่นปิดหลังพีอีทีและแผ่นปิดหลังพีวีเอฟด้านนอกสุดของแผง



รูปที่ 4.47 แผ่นปิดหลังฟิอิตี

แผ่นปิดหลังชั้นถัดจากแผ่นปิดหลังพีวีเอฟที่ติดกับอีวีเอ ถูกเรียกตามชื่อวัสดุว่าแผ่นปิดหลังฟิอิตี ดังแสดงในรูปที่ 4.47 สำหรับ B4-12 และ B6-3 ฟิอิตีเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเพียงเล็กน้อย ส่วน B5-2 ฟิอิตีไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่สังเกตเห็นได้ด้วยตา และติดประสานกับแผ่นพีวีเอฟที่ติดแน่นอยู่กับอีวีเอ ยกเว้นแผ่นปิดหลังฟิอิตีที่กลายเป็นสีน้ำตาลมากที่สุดเป็นชั้นตัวอย่างที่มาจากแผง B7-1 และไม่ติดประสานกับแผ่นพีวีเอฟที่ติดแน่นอยู่กับอีวีเอเลย

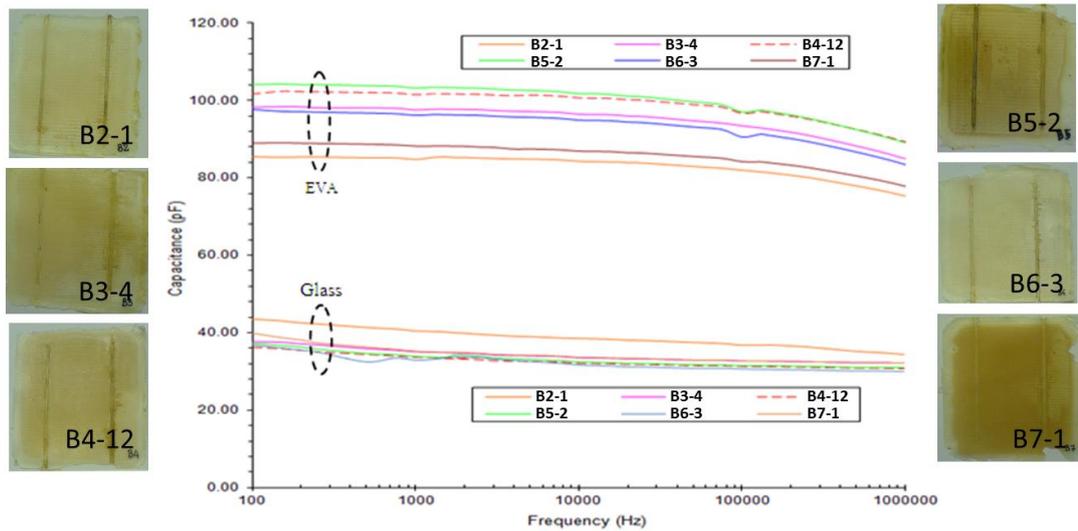


รูปที่ 4.48 แผ่นปิดหลังพีวีเอฟด้านนอกสุดของแผง

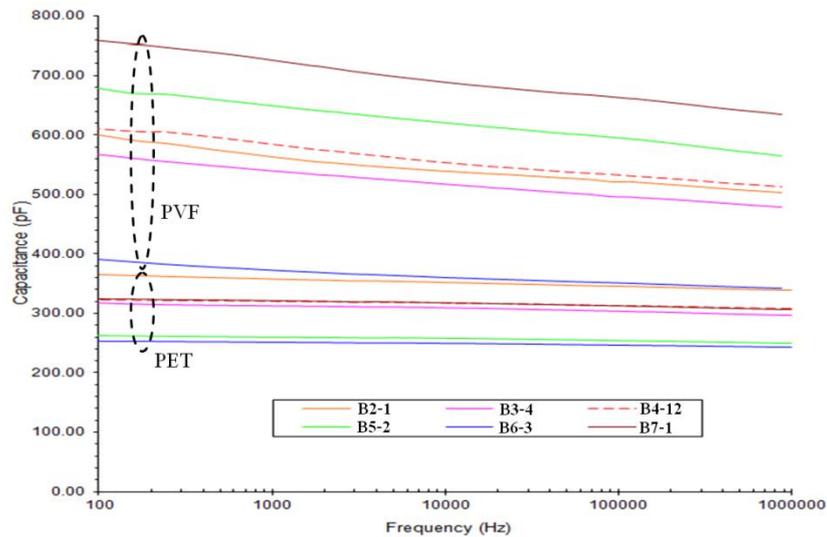
ลำดับสุดท้ายคือแผ่นปิดหลังพีวีเอฟด้านนอกสุดของแผง เป็นพีวีเอฟเหมือนกันกับที่ติดแน่นอยู่กับอีวีเอทางด้านหลัง เพียงแต่มีสีเป็นสีน้ำตาลดังแสดงในรูปที่ 4.48 พีวีเอฟด้านนอกสุดของแผงนี้ ยังยึดติดประสานอยู่กับฟิอิตีได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะกลุ่ม B4-12, B5-2, B6-3 ยกเว้น B7-1 แผ่นปิดหลังพีวีเอฟด้านนอกสุดของแผงไม่ติดประสานกับแผ่นฟิอิตีเลย

#### 4.6.2 ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวัสดุหุ้มฉนวนแผง (กระจก อีวีเอ พีวีเอฟ และ ฟิอิตี) ที่เกิดการเสื่อมสภาพ

ค่าความจุไฟฟ้าของกระจก อีวีเอ พีวีเอฟ และ ฟิอิตี จากแผงเสื่อมสภาพกลุ่มแผง B2-1, B3-4, B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1 ในช่วงความถี่ 100 Hz - 1 MHz ของ แสดงดังรูปที่ 4.49 ถึง 4.50



รูปที่ 4.49 ค่าความจุไฟฟ้าของอีวีเอและกระจกจากแผงเซลล์ที่เชื่อมสภาพในฟังก์ชันความถี่



รูปที่ 4.50 ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นปิดหลังพีวีเอฟและพีอีทีของแผงที่เชื่อมสภาพในฟังก์ชันความถี่

จากการวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของแผ่นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ผนังแผง และผ่านการใช้งานกลางแจ้งมาเป็นเวลานาน ได้ผลสำคัญดังนี้

1) ค่าความจุทางไฟฟ้าของกระจก มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นกระจกของ B2-1 มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เมื่อพิจารณาความหนากระจก พบว่ากระจกมีความหนาต่างกันคือ B2-1 (4.18 mm ), B3-4 (3.08 mm ), B4-12 (3.06 mm ), B5-2 (3.14 mm), B6-3 (3.12 mm ) และ B7-1 (3.15 mm )

จึงคำนวณค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกที่ 1 kHz เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ระบุไว้ที่ 1 kHz ของกระจกชนิดต่างๆ การคำนวณหาค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกของกระจกใช้สูตร  $\epsilon_{rg} = (C \cdot d) / (\epsilon_0 \cdot A)$  เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ที่ความถี่ 1 kHz เมื่อ d คือความหนากระจก และ A คือพื้นที่หน้าตัดของ

อิเล็กโตรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm มีค่าเท่ากับ  $1,256.64 \text{ mm}^2$  จะได้ค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกของ B2-1, B3-4, B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1 คือ 15.03, 9.69, 9.08, 9.53, 8.97 และ 9.91

เมื่อนำไปเทียบกับค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกที่ระบุไว้เท่าที่พบคือ กระจกสำหรับหน้าต่างหรืองานถ่ายภาพอยู่ที่ประมาณ 8 และกระจกสำหรับงานด้านไฟฟ้าอาจมีค่าสูงได้ถึง 14.5 จึงคิดว่ากระจก B2-1 ถึง B7-1 ควรเป็นกระจกที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน และมีค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกในเกณฑ์ ทั้งนี้กระจก B2-1 มีค่าคงตัวสูงกว่ากระจกแผงอื่นประมาณ 30% และมีความหนามากกว่า 30% เช่นกัน

2) ค่าความจุทางไฟฟ้าของอีวีเอ พบว่าถ้ายังมีการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลมากขึ้น ส่วนใหญ่ค่าความจุทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.41 ทั้งที่ความหนาของอีวีเอ ( $T_{EVA}$ ) มีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 0.5 mm

จากทฤษฎีอีวีเอที่มีส่วนผสมอีเอราว 7.5% ถึง 28% จะมีค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกของอีวีเอ ( $\epsilon_{r,EVA}$ ) อยู่ที่ประมาณ 2.5-3.0 [27] ด้วยชุดอิเล็กโตรดทดสอบเดียวกันกับการทดสอบค่าความจุทางไฟฟ้าของกระจก ควรมีค่าความจุทางไฟฟ้าของอีวีเอคือ  $C_{EVA} = \epsilon_0 \epsilon_{r,EVA} A / T_{EVA}$  หรือประมาณ 55.6 pF - 66.8 pF แต่ค่าความจุทางไฟฟ้าของอีวีเอที่วัดได้ของ B2-1 ถึง B7-1 มีค่าประมาณ 84 pF-104 pF สูงกว่าค่าที่ควรเป็น 60-80% จึงนำอีวีเอเหล่านี้ไปวัดสมบัติอื่นเพิ่มเติมคือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า กระแสตรง และค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3) แผ่นปิดหลังพีอีทีและแผ่นพีวีเอฟ จากรูปที่ 4.42 พบว่า แผ่นพีอีทีมีค่าความจุไฟฟ้าน้อยกว่าพีวีเอฟทุกกรณี ค่าความจุทางไฟฟ้าลดลงค่อนข้างเป็นเชิงเส้นกับความถี่ที่เพิ่มขึ้น ต่างกับอีวีเอที่ค่าลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้น แผ่นพีวีเอฟด้านนอกสุดของแผงที่มีค่าความจุทางไฟฟ้าน้อยกว่าแผ่นอื่นและมาจากแผงที่มีความชื้นซึมเข้าบริเวณขอบแผงและขอบเซลล์

ถ้าค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริกของแผ่นพีอีทีและแผ่นพีวีเอฟมีค่า 2.2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าความจุทางไฟฟ้าภายใต้ชุดอิเล็กโตรดที่กล่าวมาข้างต้นได้ผลว่า (i) ที่ความหนาของแผ่นพีวีเอฟ B2-1, B3-4, B4-12 และ B7-1 เท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  ได้ค่าความจุทางไฟฟ้า 834.47 pF (ii) ที่ความหนาของแผ่นพีวีเอฟ B5-2, B6-3 เท่ากับ 50  $\mu\text{m}$  ได้ค่าความจุทางไฟฟ้า 667.58 pF (iii) ส่วนแผ่นพีอีทีหนา 60  $\mu\text{m}$  ในแผง B2-1, B3-4, B4-12 และ B7-1 ได้ค่าความจุทางไฟฟ้าเท่ากับ 407.96 pF ในแผง B5-2 และ B6-3 ซึ่งแผ่นพีอีทีหนา 100  $\mu\text{m}$  และ 80  $\mu\text{m}$  ได้ค่าความจุเท่ากับ 244.78 pF และ 305.97 pF ตามลำดับ

เมื่อนำค่าคำนวณไปเทียบกับค่าวัดในรูปที่ 4.42 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน จึงคิดว่าทั้งพีอีทีและแผ่นพีวีเอพียงไม่เสื่อมสภาพมากนัก จึงไม่นำไปทดสอบต่อไป

#### 4.6.3 ค่าสภาพความต้านทานของแผ่นวัสดุไดอิเล็กตริกอีวีเอ

ได้วัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของชิ้นตัวอย่างอีวีเอ 6 ตัวอย่าง โดยนำชิ้นตัวอย่างไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง  $23^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงทำการวัดความหนาของชิ้นวัสดุด้วยไมโครมิเตอร์อย่างน้อย 5 แห่งในหนึ่งชิ้น และวัดค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตรภายใต้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้น ผลการวัดแสดงไว้ในตารางที่ 4.14 พบว่าอีวีเอแต่ละชั้นมีความหนาไม่เท่ากัน ค่าความหนาของอีวีเอสูงสุด (แผง B2-1) และต่ำสุด (แผง B4-12) ต่างกันประมาณ 20% ค่าสภาพต้านทานเชิงปริมาตรอีวีเอสูงสุด (แผง B4-12) และต่ำสุด (แผง B3-4) ต่างกัน 5.8 เท่า

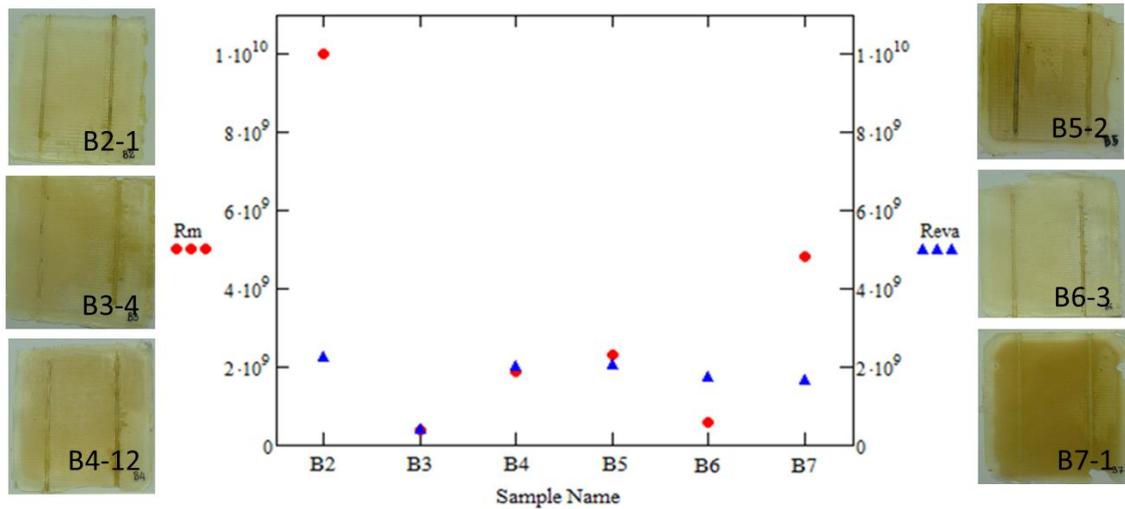
ตารางที่ 4.14 ความหนาของชิ้นงานอีวีเอตัวอย่างและค่าสภาพความต้านทานเชิงปริมาตร

ชิ้นตัวอย่าง	ความหนา $\pm$ SD (cm)	สภาพความต้านทานเชิงปริมาตร $\pm$ SD ( $\Omega\text{-cm}$ )
B2-1	$0.0543 \pm 0.0033$	$(1.04 \pm 0.09) \times 10^{15}$
B3-4	$0.0518 \pm 0.0004$	$(2.04 \pm 0.26) \times 10^{14}$
B4-12	$0.0431 \pm 0.0016$	$(1.18 \pm 0.04) \times 10^{15}$
B5-2	$0.0457 \pm 0.0039$	$(1.12 \pm 0.11) \times 10^{15}$
B6-3	$0.0502 \pm 0.0010$	$(8.63 \pm 0.56) \times 10^{14}$
B7-1	$0.0534 \pm 0.0012$	$(7.73 \pm 0.58) \times 10^{14}$

SD = Standard Deviation

ขั้นต่อไป เราเปรียบเทียบค่าความต้านทานแผงที่วัดได้ตามมาตรฐาน IEC 61215 และความต้านทานเชิงปริมาตรของอีวีเอ โดยกำหนดให้พื้นที่ของแผ่นอีวีเอของทุกแผงมีพื้นที่เท่ากันคือ  $2.5 \text{ m}^2$  และคำนวณหาค่าความต้านทานของแผ่นอีวีเอ  $R_{\text{eva}}$

ได้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผงที่วัดได้ กับค่าความต้านทานแผ่นอีวีเอที่คำนวณ แสดงในรูปที่ 4.51 พบว่าค่าความต้านทานของแผงกับค่าความต้านทานแผ่นอีวีเอที่คำนวณมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปทิศทางเดียวกันชัดเจน ยกเว้นแผง B7-1 ค่าความต้านทานของแผง B7-1 มีค่าสูง ขณะที่ความต้านทานของแผ่นอีวีเอ B7-1 มีค่าต่ำ



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแวง กับค่าความต้านทานของแผ่นอีวีเอ

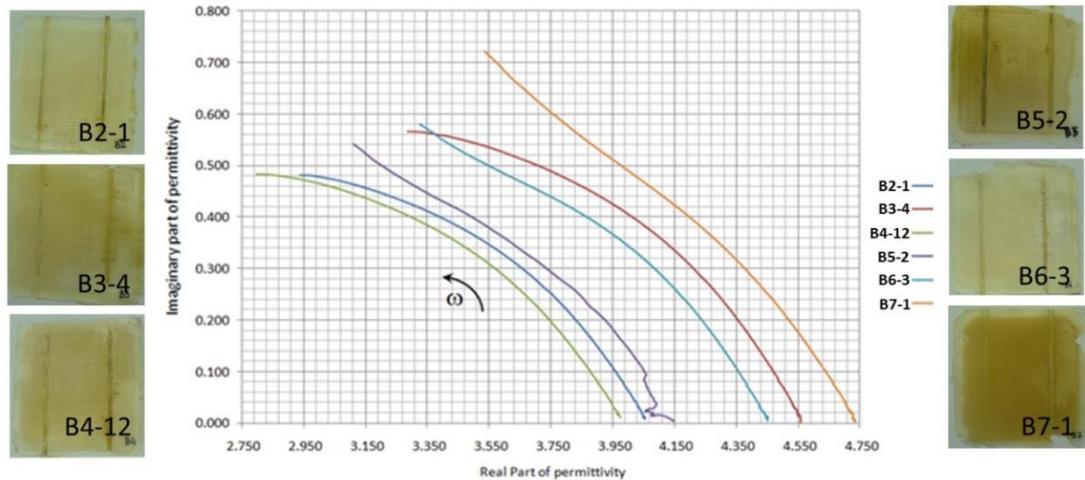
จากความแตกต่างของสภาพภายนอกแวงของ B2-1 ถึง B7-1 ที่แสดงในภาคผนวก จ เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่าภายนอกแวงของ B7-1 โดยเฉพาะแผ่นปิดหลังและกาวฉนวนกอบแวง มีสภาพค่อนข้างดีกว่าแวง B3-4, B4-12, B5-2 และ B6-3 คือมีการลอกของแผ่นปิดหลังที่ขอบแวงและพบรอยแตกของกาวฉนวนกอบเท่านั้น ดังนั้นค่าความต้านทานของแวง B7-1 ที่วัดจึงมีค่าสูง นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นว่าค่าความต้านทานของแวงที่วัดได้กับค่าความต้านทานของแผ่นอีวีเอ มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปทางเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด B3-4, B4-12, B5-2 และ B6-3 ดังแสดงในรูปที่ 4.51

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสภาพแวง B3-4, B4-12, B5-2 และ B6-3 พบว่าแวงปิดหลังแวงเกิดการหลุดร่อนที่ขอบหรือมุมแวง ส่วนสภาพของกาวฉนวนกอบเกิดการกรอบแตกหรือบางแวงก็หลุดสะเก็ดออกมาเป็นผงได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความต้านทานของแวงจะแปรตามสภาพความต้านทานของอีวีเอได้ หากกาวฉนวนกอบและแผ่นปิดหลังแวงเสื่อมสภาพหรือหลุดร่อนออกไป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ กาวฉนวนกอบและแผ่นปิดหลังแวงที่มีสภาพทนทานที่ดี ก็เป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่ทำให้ค่าความต้านทานของแวงสูงขึ้นได้ เนื่องจากแผ่นปิดหลังและกาวฉนวนกอบโดยโครงสร้างแล้ว ถือว่าเป็นฉนวนกันหรืออนุกรมระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับ โครงขอบแวงนั่นเอง

#### 4.6.4 ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของแผ่นอีวีเอที่เสื่อมสภาพ

จากอีวีเอ 6 ตัวอย่างที่วัดค่าสภาพต้านทานเชิงบริมาตรในส่วนที่ 4.6.3 ได้วัดหาค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ค่าความจุไฟฟ้า และตัวประกอบความสูญเสียที่ความถี่ต่างๆ ของชิ้นตัวอย่างอีวีเอภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน (อุณหภูมิห้อง 23°C และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50%) โดยใช้วิธีวัดที่กล่าวในส่วนที่ 3.6.3 ดังแสดงในภาคผนวก ช

นำค่าความจุและตัวประกอบความสูญเสียที่ได้ มาคำนวณด้วยวิธีที่กล่าวในส่วนที่ 3.6.3 หาค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ซึ่งประกอบด้วยค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและความสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพที่คำนวณ ในช่วงความถี่ 1 kHz - 10 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพของอีวีเอที่เชื่อมสภาพ

จากรูปที่ 4.52 พบว่า

ก) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกในส่วนจริงมีค่าลดลง แต่หากเป็นค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกในส่วนจินตภาพมีค่าเพิ่ม ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

ข) มีการแบ่งกลุ่มอย่างชัดเจนสองกลุ่มคือ อีวีเอของกลุ่ม B4-12, B2-1 และ B5-2 ทางด้านซ้ายมือ และอีกกลุ่มมีค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกที่เป็นส่วนจริงสูงกว่าอีวีเอกลุ่ม B6-3, B3-4 และ B7-1 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าอีวีเอที่ใช้ประกอบแผงและนำมาทดสอบนี้ มีโอกาสที่จะมีส่วนผสมของไวโนลอะซีเตทไม่เท่ากัน จึงทำให้ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกไม่เท่ากัน

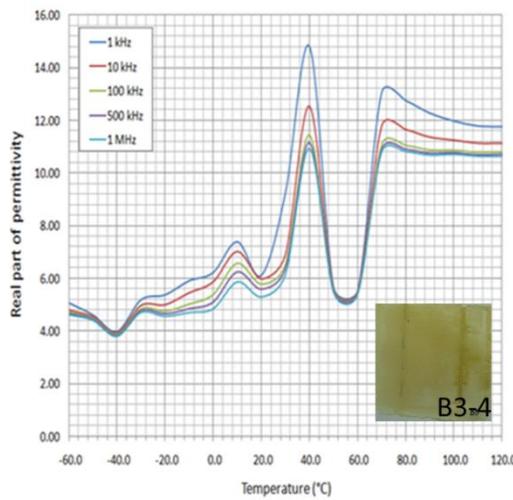
ค) นอกจากนี้อีวีเอกลุ่ม B5-2, B6-3, และ B7-1 มีส่วนจินตภาพที่ค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ความสูญเสียทางไดอิเล็กตริก เนื่องจากการแยกขั้วซึ่งมาพร้อมกับการเสียดสี และการจัดตำแหน่งทิศทางของไดโพลทางไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นกว่าอีวีเอตัวอื่นๆ

#### 4.6.5 ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของอีวีเอที่เป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ

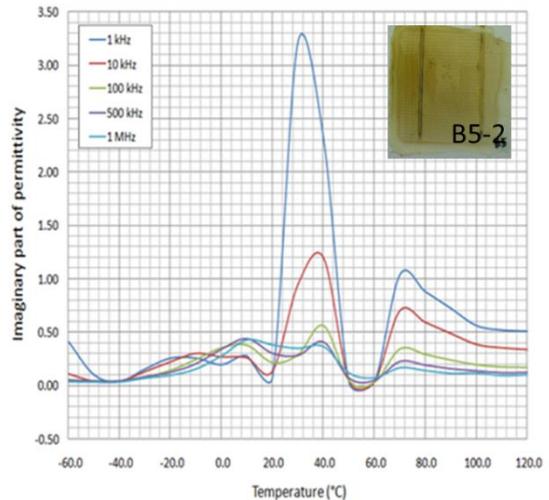
วัดค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของอีวีเอ B3-4 ถึง B7-1 ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ตั้งแต่ 1 kHz - 1MHz ภายใต้ห้องควบคุม Delta 9023 ปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -60°C ถึง 120°C โดยใช้เทคนิคที่ระบุในส่วน 3.6.4 จากค่าความเก็บประจุและค่าตัวประกอบความสูญเสียของชิ้นตัวอย่างอีวีเอจากการวัด แสดงไว้ในภาคผนวก ข ได้คำนวณหาค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนสองส่วนหลักคือ ส่วนองค์ประกอบส่วนจริงและส่วนจินตภาพ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**ค่าส่วนจริงของไดอิเล็กตริกที่เป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ**

เขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.53 (ก) ถึงรูปที่ 4.55 (ก) ซึ่งมีผลการหาค่าส่วนจริงของไดอิเล็กตริกความ คล้ายคลึงกันกับค่าความจุไฟฟ้าของชิ้นตัวอย่างอีวีเอ B3-4 ถึง B7-1 แสดงไว้แล้วในภาคผนวก ฃ องค์กรประกอบส่วนจริงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแปรผกผันกลับกับความถี่ ตามทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วใน ส่วนที่ 2.7.5 แต่ตำแหน่งค่ายอดขององค์กรประกอบส่วนจริงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างกัน เนื่องจากชิ้นตัวอย่างอีวีเอจากแต่ละแผง มีจุดเปลี่ยนสภาพความยืดหยุ่นของอีวีเอตามอุณหภูมิที่ แตกต่างกัน



(ก) องค์กรประกอบส่วนจริง

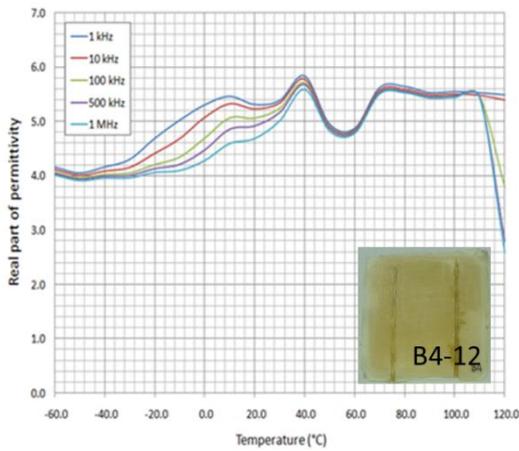


(ข) องค์กรประกอบส่วนจินตภาพ

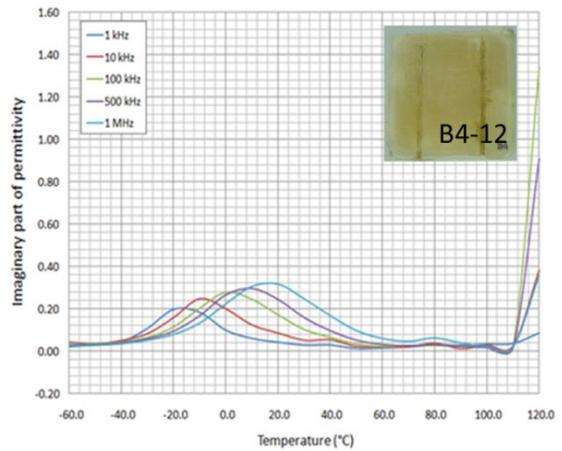
รูปที่ 4.53 ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของชิ้นตัวอย่างอีวีเอ B3-4 หรือ B5-2 ที่ -60°C ถึง 120°C

ค่าองค์กรประกอบส่วนจินตภาพเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.53 (ข) ถึงรูปที่ 4.55 (ข) ซึ่งคำนวณจาก ค่าตัวประกอบความสูญเสียของชิ้นตัวอย่างอีวีเอที่วัดได้ แสดงไว้ในภาคผนวก ฃ เมื่อนำค่า องค์กรประกอบส่วนจินตภาพที่คำนวณได้ มาเขียนกราฟในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C ความถี่ตั้งแต่ 1 kHz – 1 MHz พบว่าค่าองค์กรประกอบส่วนจินตภาพของชิ้นตัวอย่างอีวีเอเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่สูงขึ้น และค่ายอดจะเลื่อนไปทางขวาตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบลักษณะกราฟค่าองค์กรประกอบส่วนจริงและค่าจินตภาพของอีวีเอ B3-4 และ B5-2 มีจุดยอดที่คล้ายคลึงกัน ในทำนองเดียวกัน ค่าองค์กรประกอบส่วนจริงของอีวีเอ B6-3 และ B7-1 ค่า องค์กรประกอบส่วนจริงและค่าจินตภาพของอีวีเอ มีลักษณะค่ายอดของรูปกราฟ ฃ อุณหภูมิต่างๆ ที่ คล้ายคลึง ส่วน B4-12 มีจุดที่น่าสังเกตคือที่อุณหภูมิ 110°C มีค่าองค์กรประกอบส่วนจริงลดลงอย่าง รวดเร็ว แต่ค่าองค์กรประกอบส่วนจินตภาพจะพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นไปได้ตามทฤษฎีคืออีวีเอ เกิดหลอมละลายและเกิดการเคลื่อนตัวของสายโซ่โมเลกุลของอีวีเอเกิดขึ้น

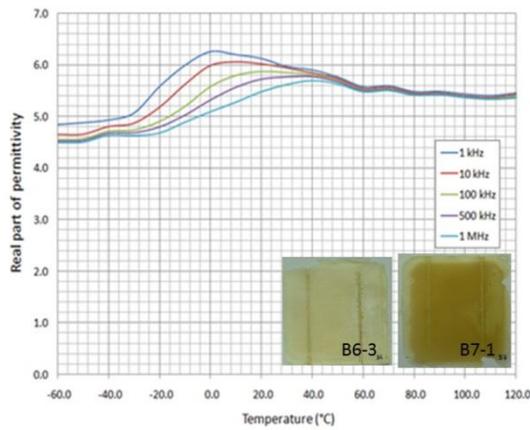


(ก) องค์ประกอบส่วนจริง

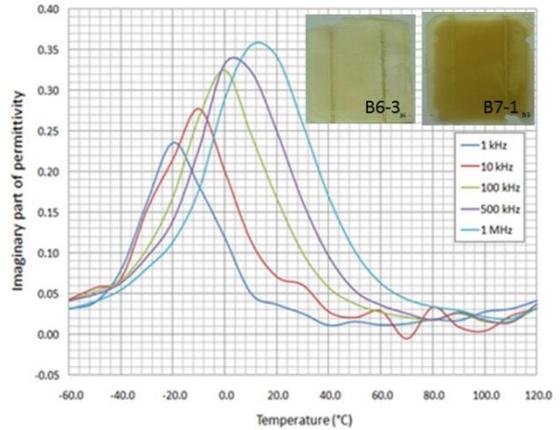


(ข) องค์ประกอบส่วนจินตภาพ

รูปที่ 4.54 ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของชั้นตัวอย่างอีวีเอ B4-12 ที่ -60°C ถึง 120°C



(ก) องค์ประกอบส่วนจริง



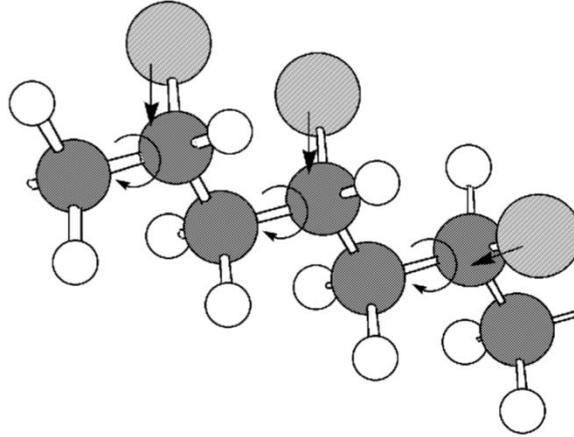
(ข) องค์ประกอบส่วนจินตภาพ

รูปที่ 4.55 ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของชั้นตัวอย่างอีวีเอ B6-3 หรือ B7-1 ที่ -60°C ถึง 120°C

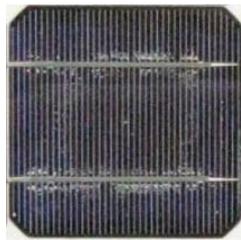
ความสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่คำนวณได้ มีสาเหตุหลักจากการเคลื่อนที่ของ Small Kinetic Units ของส่วนหลักหรือสายโซ่ข้างๆ (Side Chains) ดังรูปที่ 4.56 ซึ่งประกอบด้วยลำดับของอะตอมคาร์บอนหลายๆ ตัว ไปจนถึงการหมุนเพลลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft Rotation) ของแกนที่จับยึดกันกับโมเลกุล ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) ซึ่งเป็นส่วนหลักที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวของกลุ่มข้างเคียง (Side Group) ซึ่งเป็นกลุ่มหนึ่งของโมเลกุลที่ติดกับสายโซ่กระดูกสันหลังของสายโมเลกุลยาวหรือหน่วยเล็กๆของสายโซ่หลัก

ความแข็งแรงสัมพัทธ์ (Relative Strength) รวมถึงการพลิกทางรูปทรงโครงสร้าง (Conformational Flip) ของหน่วยหมุนเวียนหนึ่ง เกี่ยวข้องกับจุดเปลี่ยนจากรูปแบบสายโซ่หนึ่งไปเป็นอีกแบบหนึ่ง การกลับทิศทางสลับไปมาของการสับเปลี่ยนทางไดโพล รวมถึงการเคลื่อนที่เฉพาะบริเวณของส่วน

ย่อยของสายโซ่หลัก เนื่องจากส่วนย่อยเล็กๆ ของสายโซ่ สามารถมีการเคลื่อนไหวเช่นนั้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับสายโซ่ที่เหลือ



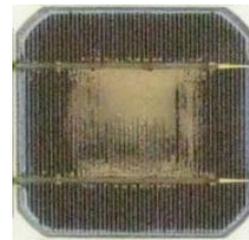
รูปที่ 4.56 ภาพตัวอย่างของสายโมเลกุลยาวที่เกิดการเคลื่อนที่ของส่วนหลักหรือสายโซ่ข้างๆ [66]



(ก) B2-1



(ข) B6-3



(ค) B7-1

รูปที่ 4.57 การหลุดลอกของอีวีเอตรงกลางเซลล์แสงอาทิตย์รอบๆ บัสบาร์มากกว่าขอบของเซลล์

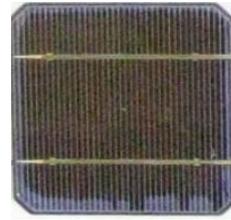
เมื่อนำภาพถ่ายด้านหน้าของแผง B2-1, B6-3 และ B7-1 มาพิจารณาพบว่า เกิดการหลุดลอกของอีวีเอตรงกลางเซลล์แสงอาทิตย์รอบๆ บัสบาร์มากกว่าขอบของเซลล์ดังรูปที่ 4.57 ซึ่งเป็นผลของการสะสมความร้อนจากการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณตรงกลางเซลล์ กอปรกับการวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็กตริกพบอีกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้วมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการหลุดร่อนรอบๆ บัสบาร์หรือตรงกลางเซลล์มากกว่าบริเวณอื่น

ในส่วนของชิ้นตัวอย่างอีวีเอ B3-4 และ B5-2 ลักษณะกราฟที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ ค่ายอดของส่วนจินตภาพยอดแรกเริ่มต้นที่อุณหภูมิในช่วง  $-40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $20^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นก็มียอดที่สองตามมา โดยมีจุดยอดอยู่ที่ราว  $40^{\circ}\text{C}$  และยอดที่สามซึ่งเป็นยอดสุดท้ายทางขวามืออยู่ที่ราว  $70^{\circ}\text{C}$  นั้นหมายความว่า การผ่อนคลายส่วนย่อยไดโพลาร์สอดคล้องกับการผ่อนคลายที่อุณหภูมิสูง ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มหลักของการเคลื่อนไหวแบบไมโคร-บราวเนียนของสายโซ่ทั้งหมด (การเคลื่อนไหวใน

ส่วนย่อย) และค่ายอดความสูญเสียทางไดอิเล็กตริกในย่านของการผ่อนคลายเนื่องจากการเคลื่อนไหวของกลุ่มข้างเคียง หรือหน่วยเล็กๆของสายโซ่หลัก ส่วนความแข็งแรงสัมพัทธ์ของการผ่อนคลายทางไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับระดับการปรับทิศทางของกลุ่มไดโพล



(ก) B3-4



(ข) B5-2

**รูปที่ 4.58** การหลุดลอกของอีวีเอรอบๆ ขอบเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายด้านหน้าของแผง B3-4 และ B5-2 พบว่าเกิดการหลุดลอกของอีวีเอบริเวณรอบขอบของเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 4.58 เพราะความชื้นค่อยๆ ซึมเข้ามา โดยเริ่มซึมเข้าบริเวณรอบขอบของเซลล์ก่อน ก่อปรกกับการวินิจฉัยสมบัติทางไดอิเล็กตริกพบอีกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้วมีค่าค่อนข้างสูง จึงไม่เกิดการหลุดร่อนตรงกลางเซลล์เหมือนกับแผง B2-1, B6-3 และ B7-1 ซึ่งมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้วมีค่าค่อนข้างต่ำ

ลำดับสุดท้ายคือชิ้นตัวอย่างอีวีเอ B4-12 ดังรูปที่ 4.59 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า ลักษณะเส้นกราฟของอีวีเอ B4-12 ในรูปที่ 4.54 (ข) คล้ายคลึงกันกับรูปที่ 4.55 (ข) ซึ่งเป็นส่วนจินตภาพของไดอิเล็กตริกที่เป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างอีวีเอ B6-3 หรือ B7-1 คือ ในช่วงอุณหภูมิตดลประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$  ค่ายอดของทุกเส้นความถี่จะเริ่มไต่ระดับขึ้นสูงค่ายอด โดยค่ายอดมีการเลื่อนออกไปทางขวาและมีขนาดของยอดที่เพิ่มสูงขึ้นตามค่าของความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่ายอดความสูญเสียทางไดอิเล็กตริกในช่วงนี้ ยังเป็นย่านที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ



**รูปที่ 4.59** การหลุดลอกของอีวีเอตรงกลางเซลล์แสงอาทิตย์

อย่างไรก็ตาม กราฟของ B4-12 มีลักษณะพิเศษกว่าคือ ที่อุณหภูมิราวหนึ่งร้อยองศาเซลเซียสขึ้นไป ค่าจินตภาพของไดอิเล็กตริก มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อสังเกตด้านหน้าแผงพบว่าเกิดการหลุดร่อนของอีวีเอและกลายเป็นสีน้ำตาลตรงกลางเซลล์อย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.59

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าค่าความต้านทานของแผงที่วัดสัมพันธ์กับการค่าความต้านทานของแผ่นอีวีเอ และจากการวัดค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกของอีวีเอในส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้ค่าแตกต่างกัน เนื่องจากไดอิเล็กตริกมีการเชื่อมสภาพที่ต่างกัน โดยเฉพาะกรณีของการลอกร่อง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าสภาพความต้านทานและค่าทางไดอิเล็กตริกที่วัดนี้ ยังไม่สามารถเชื่อมโยงหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนสีของอีวีเอได้

## บทที่ 5 รูปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 รูป

การวิจัยในวิทยานิพนธ์เรื่องสมบัติทางไดอิเล็กตริกโดยการประยุกต์สนามไฟฟ้าสำหรับการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีผลสำคัญสรุปได้ดังนี้

#### 1) ด้านการเสื่อมสภาพภายนอกของแผงที่สังเกตด้วยตา

ได้ศึกษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 116 แผงจากผู้ผลิตสามบริษัท (จากประเทศไทย จีน และญี่ปุ่น) ขนาดกำลังไฟฟ้า 45-75 W มีเซลล์ 33 หรือ 36 เซลล์ต่อแผง แผงทั้งหมดใช้งานในภาคสนามของประเทศไทยเป็นเวลา 5-15 ปีในช่วงทศวรรษ 2530 และ 2540 ขึ้นต้นได้ตรวจสอบและการเสื่อมสภาพภายนอกของวัสดุไดอิเล็กตริกหุ้มฉนวนที่สังเกตเห็นด้วยตา และคัดเลือกแผงที่มีลักษณะการเสื่อมสภาพเห็นได้ชัดเจนจำนวน 39 แผงมาจัดกลุ่ม พบว่าการเสื่อมสภาพที่สำคัญของอีวีเอด้านหน้าแผง คืออีวีเอเปลี่ยนสีจากเหลือง น้ำตาล ถึงน้ำตาลเข้ม อีวีเอลอกร่องนบริเวณกลางเซลล์มากกว่าขอบ เกิดการกัดกร่อนเล็กน้อยบนบัสบาร์ของเซลล์และระหว่างเซลล์ และมีการหลุดของแผ่นปิดหลัง และกาวฉนวนขอบกรอบแตกหรือเปราะมากถึง 59% จากจำนวน 39 แผงที่จัดกลุ่มไว้

#### 2) ด้านการหาสมรรถนะและพารามิเตอร์ไฟฟ้า

วัดกราฟกระแส-แรงดันของทั้ง 116 แผงภายใต้สภาวะมาตรฐานด้วยแสงอาทิตย์เทียม และคำนวณพารามิเตอร์ไฟฟ้า 8 ตัวของ 39 แผง (คือกระแสลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด กระแสไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด กำลังไฟฟ้าสูงสุด ฟิลแฟกเตอร์ ความต้านทานอนุกรม ความต้านทานขนาน พบว่าแผงที่ยังมีลักษณะดีคือ อีวีเอไม่เปลี่ยนสี ไม่มีการลอกร่อง และไม่มีการกัดกร่อน พารามิเตอร์ไฟฟ้า 4 ตัว (กระแสลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด กำลังไฟฟ้าสูงสุด ฟิลแฟกเตอร์) ยังมีค่าใกล้เคียงกับที่ระบุบนป้ายของแผง ส่วนแผงที่มีกราฟกระแส-แรงดันลักษณะปรกติและมีฟิลแฟกเตอร์สูง แผงด้านหน้ามีอีวีเอเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง มีการลอกร่องน้อยของอีวีเอด้านหน้าแผง เกิดบริเวณรอบบัสบาร์คล้ายฟองอากาศ หรือลอกร่องตรงกลางเซลล์ ขอบเซลล์หรือมุมเซลล์เพียงเล็กน้อย แต่แผงที่เสื่อมสภาพมากคือ อีวีเอร่องตรงกลางเซลล์มากกว่าขอบแบบเต็มพื้นที่กลางเซลล์ตั้งแต่ 22 เซลล์ขึ้นไป กราฟกระแส-แรงดันเกือบเป็นเส้นตรง แม้แรงดันเอาต์พุตใกล้เคียงกับที่ระบุบนแผ่นป้าย แต่กระแสลัดวงจรต่ำกว่าค่าที่ระบุหลายเท่าตัว

3) การทดสอบฉนวนของทั้ง 116 แผงด้วยการประยุกต์สนามไฟฟ้ากระแสตรง

ใช้เครื่องทดสอบฉนวนวัดค่าความต้านทานฉนวนของแผง สรุปได้ว่าถ้าไดอิเล็กตริกหลังแผงมีการเสื่อมสภาพที่เห็นชัดได้ด้วยตา ค่าความต้านทานฉนวนทางของแผงมีแนวโน้มที่ลดลง

4) ความคงทนทางไดอิเล็กตริกต่อแรงดันอิมพัลส์

คัดเลือกแผง 5 แผงเพื่อทดสอบ สรุปได้ว่าในกรณีการป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าด้านทางหน้ากระจก ไม่พบการเสียหายฉนวนบนทางไดอิเล็กตริกหรือไม่พบร่องรอยการร้าวไฟตามผิวของแผง ในการทดสอบฉนวนระหว่างโครงขอบแผงกับขั้วต่อสายเอาต์พุตที่ถูกลัดวงจรของแผง เมื่อเพิ่มแรงดันค่ายอดถึงค่า 4kV พบการเกิด Ringing Frequency หลายลูกซ้อนทับกับแรงดันอิมพัลส์ เมื่อทำแบบจำลองไดอิเล็กตริกแผง ให้มีโพรงฉนวนแทนการปล่อยประจุบางส่วนอยู่ระหว่างขอบแผงกับโครงและแทนตัวนำในระบบด้วยแบบจำลองสายส่ง พบการเกิด Ringing Frequency คล้ายคลึงกัน และจากการเลียนแบบฉนวนของแผงด้วยโปรแกรม Ansoft เพื่อหาการกระจายของสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบเซลล์กับโครงแผงบริเวณที่มีระยะห่างกันน้อยที่สุด พบว่าที่แรงดัน 27 kV ขึ้นไปมีโอกาสดังกล่าวเกิดการเสียหายฉนวนบนของฉนวนได้

6) การวิจัยสมบัติทางไดอิเล็กตริกของแผ่นวัสดุหุ้มฉนวนที่มีการเสื่อมสภาพทั้ง กระจก อีวีเอ และ แผ่นปิดหลัง

ใช้เครื่องวัดค่าความจุทางไฟฟ้าที่ความถี่ 100 Hz - 1 MHz กับชุดอิเล็กโตรดที่ออกแบบไว้ พบว่าอีวีเอมีค่าความจุทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำแผ่นอีวีเอไปหาค่าสมบัติทางไดอิเล็กตริกอีก 3 ค่าคือ (1) ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง สรุปได้ว่าค่าความต้านทานของแผงแปรตรงกับค่าความต้านทานของอีวีเอ (2) ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของแผ่นอีวีเอที่เกิดการเสื่อมสภาพ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์/เกน-เฟส (HP 4194A) วัดค่าความจุทางไฟฟ้าและค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กตริก และคำนวณหาค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 kHz - 10 MHz พบว่าได้ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกในส่วนจินตภาพเพิ่มขึ้นตามความถี่ อีวีเอที่มีลักษณะการเสื่อมสภาพไม่เหมือนกัน จะมีค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกและความสูญเสียทางไดอิเล็กตริกไม่เท่ากัน (3) ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของอีวีเอที่เป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ ในสภาพควบคุมอุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C พบว่าค่าจริงและค่าจินตภาพของไดอิเล็กตริกมีค่ายอดที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ -40°C ถึง 10°C เมื่อเทียบกับลักษณะการหลุดลอกของอีวีเอด้านหน้าแผง พบว่า อีวีเอที่มีค่ายอดของค่าจินตภาพของไดอิเล็กตริกสูง จะมีการหลุดลอกของอีวีเอที่บัสบาร์และบริเวณกลางเซลล์ แต่หากมีค่ายอดของค่าจินตภาพของไดอิเล็กตริกสูง ในย่านอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ การหลุดลอกของอีวีเอจะอยู่บริเวณรอบๆ ขอบเซลล์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แม้ได้ดำเนินการครบถ้วนตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ แต่ควรพัฒนาต่อ  
 ขอดงานวิจัยในประเด็นต่างๆ ดังนี้

1. ควรศึกษาการเสื่อมสภาพของฉนวนหุ้มฉนวนในแผงชนิดอื่นๆ ที่นำเข้ามาใช้งานในประเทศไทย  
 หรือจะนำเข้ามาใช้งานในประเทศไทย เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบฉนวน  
 หุ้มฉนวนในรูปแบบใหม่ๆ สำหรับเซลล์ชนิดใหม่เช่น เซลล์แบบฟิล์มบางซึ่งมีทั้งแบบหุ้มด้วยพอลิ  
 เมอร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง และแบบที่เป็นกระจกทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เป็นต้น

2. ควรศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบ เพื่อหาอัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนหุ้ม  
 ฉนวนของแผง รวมทั้งการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้สภาวะแวดล้อมการใช้งานกลางแจ้ง  
 จริงของประเทศไทยในระยะยาว นับตั้งแต่เริ่มต้นติดตั้งใช้งานจนกระทั่งหมดอายุการรับประกันแผง  
 เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในปัจจุบันอาจจะมีการรับประกันอายุการใช้งานไว้ถึง 20 ปี

3. ควรมีการเฝ้าตรวจและศึกษาถึงผลของความชื้นซึมเข้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ ใน  
 สภาวะร้อนชื้นในประเทศไทย เนื่องจากในวิทยานิพนธ์พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งมี  
 ลักษณะการหลุดร่อนคล้ายความชื้นซึมเข้าแผง แต่ยังไม่ได้ศึกษาอย่างละเอียด

4. ควรมีการพัฒนาออกแบบและสร้างชุดทดสอบ เพื่อวินิจฉัยสภาพไดโอดีเล็กตริกโดยการ  
 ประยุกต์สนามไฟฟ้าสำหรับทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่ทำลาย สำหรับตรวจสอบและ  
 ควบคุมคุณภาพการหุ้มฉนวนแผงจากโรงงาน เนื่องจากผลการวิจัยพบว่า การหลุดลอกของอีวีเอแต่ละ  
 แบบ สามารถทำนายได้ด้วยการวัดค่าจริงและค่าจินตภาพของไดโอดีเล็กตริกได้

5. ควรมีการวินิจฉัยสภาพไดโอดีเล็กตริกเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาวิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์  
 แบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น การใช้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าความถี่สูง  
 ในการตรวจสอบในระดับอะตอม เพื่อให้สามารถบ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพในระดับโครงสร้างเชิง  
 โมเลกุลได้ หรือการใช้สนามไฟฟ้าความถี่ต่ำมากๆ เพื่อการทดสอบการประสานเชื่อมต่อระหว่าง  
 ผิวหน้าของวัสดุพอลิเมอร์ต่างชนิดกันในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

6. ยังมีประเด็นที่น่าจะทำการศึกษาต่อไปอีกคือ ควรรวบรวมข้อมูลให้เพียงพอที่จะสรุปว่า  
 ค่าความต้านทานฉนวนของแผงที่มีการเสื่อมสภาพทั้งด้านหน้าและด้านหลังนี้ มีผลอย่างไรต่อ  
 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอยู่ภายใต้ฉนวนที่มีการเสื่อมสภาพนี้ และสภาพค่าความ  
 ต้านทานมีกลไกการเสื่อมสภาพมากที่สุด เกิดจากตัวแปรใดในสภาพแวดล้อมจริงในประเทศไทย  
 รวมทั้งสมบัติไฟฟ้าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

7. ควรมีการวินิจฉัยสภาพไดโอดีเล็กตริกเพิ่มเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับไดโอดีเล็กตริกของแผง  
 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานหลายๆ ยี่ห้อ แล้วเกิดการเสื่อมสภาพน้อยที่สุด ว่า มี  
 โครงสร้างการฉนวน การเลือกใช้วัสดุ รวมทั้งส่วนผสมของการทำวัสดุหุ้มฉนวนที่เหมาะสมกับการ

ใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมในประเทศไทยนั้น ควรประกอบไปด้วยวิธีการหุ้มฉนวนแบบใด เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการช่วยปรับปรุงให้เกิดความเชื่อถือได้ ต่อการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานในประเทศไทย และลดต้นทุนของแผงเซลล์ และเพิ่มความเชื่อมั่นต่อผู้ลงทุนให้เพิ่มมากยิ่งขึ้นต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

1. Arnulf Jager-Waldau, July 2011, **PV Status Report 2011: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics**, European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit, Ispra (VA), Italia, pp. 2-20.
2. Stefan Nowak, **Global PV Markets and Policies** [Online], Available: [http://www.iea-pvps.org/index.php?id=3&eID=dam\\_frontend\\_push&docID=859](http://www.iea-pvps.org/index.php?id=3&eID=dam_frontend_push&docID=859) [2011, September 9].
3. International Energy Agency (IEA), August 2011, **TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2010**, Report IEA-PVPS T1-20:2011, IEA Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), pp. 3-41.
4. สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์, 2553, **สถานะการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยตั้งแต่อดีตถึงปี พ.ศ. 2553**, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรุงเทพฯ.
5. Wohlgemuth, J. H., Cunningham, D. W., Nguyen A. M. and J. Miller, 2006, “Long Term Reliability OF PV Modules”, **BP Solar International**, Maryland, USA, pp. 1-6.
6. Artur Skoczek, **Long-term Performance of Photovoltaic Modules** [Online], Available: <http://www.solar-santral.com/menus/Long%20Term%20Performance%20of%20PV%20Systems030226.pdf> [2009, February 19].
7. Michael Kempe, D., 2006, “Modeling of Rates of Moisture Ingress into Photovoltaic Modules”, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 90, pp.2720-2738.
8. Oreski, G., and Wallner, G.M., 2005, “Delamination Behavior of Multi-layer Films of PV Encapsulation”, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 89, pp. 139-151.
9. Mon, G.R., et al., 1989, “Reliability Studies of Photovoltaic Module Insulation Systems”, **Proc. of the 21<sup>st</sup> IEEE PV Specialists Conference**, pp. 324-329.
10. Agroui, K., et al., 2007, “Quality Control of EVA Encapsulant in Photovoltaic Module Process and Outdoor Exposure”, **Desalination**, Vol. 209, pp. 1-9.
11. Pern, F.J., and Czanderma, A.W., 1992, “Charterization of Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Encapsulant; Effects of Thermal Processing and Weathering Degradation on Its Discoloration”, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 25, pp.3-23.
12. George Hadi Santoso, 2010, “Driving Sustainable. Growth: DuPont in Indonesia”, **CSR Indonesian Summit 2010**, pp. 15-17.

13. Parretta, A., et al., R., 2005, "Optical Degradation of Long-Term Field-Aged C-Si Photovoltaic Modules", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 86, pp. 349-364.
14. Czanderma, A.W., and Pern, F.J., 1996, "Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate as a Pottant: a Critical Review", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 43, pp.101-181.
15. Evan, D., et al., 2005, "20 Years of Life and More: Where Is The End of Life of a PV Module?", **IEEE PV Specialists Conference**, pp. 1593-1596.
16. Jorgensen, G.J., et al., 2006, "Moisture Transport, Adhesion, and Corrosion Protection of PV Module Packaging Materials", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 90, pp. 2739-2775.
17. Paula Sanchez-Friera, September 2011, "Analysis of Degradation Mechanisms of Crystalline Silicon PV Modules after 12 years of Operation in Southern Europe", **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Vol. 19, Issue 6, pp. 658-666.
18. Antonella Realini, June 2003, **Mean Time before Failure of Photovoltaic Modules**, **Laboratory of Energy**, Ecology and Economy LEEE-TISO, Canobbio, Switzerland.
19. เขาวณี แสงพงสานนท์, 2549, การศึกษาการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ โดยอาศัยตามมาตรฐาน IEC 61215, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 55.
20. John Perlin, August 2004, "The Silicon Solar Cell Turns 50", **National Renewable Energy Laboratory**, pp. 1-4.
21. Kanha Solar Power Co., Ltd., ส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [Online], Available: <http://www.kanhasolar.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539484257&Ntype=4> [2012, October].
22. Sala, S.A., Campaniello, M. and Bailini, A., June 2009, "Experimental Study of Polymers as Encapsulating Materials for Photovoltaic Modules", **Microelectronics and Packaging Conference, 2009**, EMPC 2009 European, 15-18 June 2009, Rimini, Italy, pp. 1-7.
23. Amrani, A. El, Mahrane, A., Moussa, F. Y., and Boukennous, Y., 2007, "Solar Module Fabrication", **International Journal of Photoenergy**, Volume 2007, pp. 1-5.
24. Wayne Beaty, H., 1990, **Electrical Engineering Materials References Guide**, McGraw-Hill Publishing Company, New York, pp. 11-23.

25. Michael De Bergalis, 2004, "Fluoropolymer Films in the Photovoltaic Industry", **Journal of fluorine Chemistry**, Vol. 125, pp. 1255-1257.
26. Kazimierz Drabczyk, Piotr Panek, 2012, A Comparative Study of EVA With and without Thermal History for Different Lamination Process Parameters, **Materials Science and Engineering: B**, Volume 177, Issue 15, pp. 1378–1383.
27. Alex Henderson, M., 1993, Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Copolymers: A General Review, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol. 9, No. 1.
28. Charles A. Harper and Edward M. Petrie, 2003, **Plastics Materials and Processes: A concise Encyclopedia**, John Willy & Sons, Inc., Canada, pp. 146-147.
29. Ross, R., 1983, "Flat-Plate Solar Array", **Proceedings of the Flat-Plate Solar Array Project**, June, DOE/JPL-1012-89, pp. 3–13.
30. Antonio Luque and Steven Hegedus, 2003, **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**, John Willy & Sons, Ltd., England, pp. 293-294.
31. Naidu, M.S. and Kamaraju, V., 2009, **High Voltage Engineering**, 4<sup>th</sup> ed., Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, India, pp. 111-113.
32. Vodermayr, C., et al., 2008, "First Results - Correlation Between IR Images and Electrical Behavior and Energy Yield of PV Modules", **23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, September 2008, Valencia, Spain, pp.1-4.
33. Buerhop, Cl., et al., 2012, "Reliability of IR-imaging of PV-plants under Operating Conditions", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 107, pp. 154–164.
34. David Berman, Sergey Biryukov, and David Faiman, 1995, "EVA Laminate Browning after 5 Years in a Grid-Connected, Mirror-Assisted, Photovoltaic System in the Negev Desert: Effect on Module Effect on Module Efficiency", **Solar Energy Material & Solar Cells**, Vol. 36, pp.421-432.
35. Van Dyk, E.E., Chamel, J.B., and Gxasheka, A.R., 2005, "Investigation of Delamination in an Edge-defined Film-fed Growth Photovoltaic Module", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 88, pp. 403-411.
36. Gxasheka, A.R., van Dyk, E.E., and Meyerb, E.L., 2005, "Evaluation of Performance Parameters of PV Modules Deployed Outdoors", **Renewable Energy**, Vol. 30, pp. 611–620.
37. Max Chen, 2012, "Engineering Polymer Solutions for PV Applications", **DuPont Performance Polymer**, p. 14.

38. Czanderna, A.W., and Jorgensen, G.J., 1999, "Accelerated Life Testing and Service Lifetime Prediction for PV Technologies in the Twenty-First Century", **Photovoltaics for the 21<sup>st</sup> Century**, May 1999, Seattle, Washington, pp. 5-8.
39. Holley, W.H., 1993, "Advanced Development of PV Encapsulants", **National Renewable Energy Laboratory**, p. 27.
40. Brauman, S.K., MacBlane, D.B., and Mayo, F.R., 1983, "Reactivity of Polymers with Mirror Materials", **American Chemical Society Symposium Series 220**, Washington, pp. 125-141.
41. Willis, P.B., 1986, "Investigation of Materials and Processes for Solar Cell Encapsulation", **Final Report for Jet Propulsion Laboratory: Module Encapsulation**, Vol. 7, Pasadena, California, USA.
42. Michael D. Kempe, 2010, "Ultraviolet Light Test and Evaluation Methods for Encapsulants of Photovoltaic Modules", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 94, pp. 246-253.
43. Michael, Kempe, D., 2006, "Modeling of Rates of Moisture Ingress into Photovoltaic Modules", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 90, pp.2720-2738.
44. McMahan, T.J., and Jorgensen, G.J., 2001, "Electrical Currents and Adhesion of Edge-Delete Regions of EVA-to-Glass Module Packaging", **the NCPV Program Review Meeting**, 14-17 October 2001, pp. 1-4.
45. Vladimir, Michal Ruiinsk, Juraj Packa and Paolo Redi, 2002, "Examination of Solar Cells and Encapsulations of Small Experimental Photovoltaic Modules", **IEEE Polytronic 2002 Conference**, pp. 137-141.
46. Paoletti, G.J., 2001, "Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium Voltage Electrical Equipment", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 37, pp. 90-103.
47. Clement Miquel, 2011, **Frequency Studies Applied to Photovoltaic Modules**, Master Thesis, Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, pp. 53-59.
48. International Electrotechnical Commission, 2005, **Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules—Design Qualification and Type Approval**, Geneva, Switzerland.
49. PASAN SA, 2001, **Pasan Sun Simulator III: Operating Manual**, Edition July 2001, Neuchâtel, Switzerland.

50. International Electrotechnical Commission, 2004, **PV Module Safety Qualification—Part 2: Requirements for Testing**, IEC Std. 61730-2, Geneva, Switzerland.
51. International Electrotechnical Commission, 2004, **PV Module Safety Qualification—Part 1: Requirements for Construction**, IEC Std. 61730-1, Geneva, Switzerland.
52. Vangala, P., et al., 2008, “Field Measurements of Lightning-induced Voltage Transients in PV Arrays”, **33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 11-16 May 2008, pp. 1–4.
53. Rogers, C. B., May 1981, “The Protection of Photovoltaic Power Systems from Lightning”, **Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.**, pp. 761–766.
54. Carmichael, D. C., and Noel, G. T., May 1985, “Development of Low-cost Modular Designs for Photovoltaic Array Fields”, **IEEE Trans. Power App. Syst.**, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1005–1011.
55. Häberlin, H., Oct. 2001, “Interference Voltages Induced by Magnetic Fields of Simulated Lightning Currents in PV Modules and Arrays”, **Proc. 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference (EPSEC)**, pp. 2343–2346.
56. Kern, A., and Krichel, F., Mar. 2004, “Considerations about the Lightning Protection System of Mains Independent Renewable Energy Hybrid-systems: Practical Experiences”, **Journal of Electrostatics**, vol. 60, pp. 257–263.
57. Stern, H.-J., and Karner, H. C., Aug. 1993, “Lightning Induced EMC Phenomena in Photovoltaic Modules”, **Proc. IEEE Int. Electromagnetic Compatibility**, pp. 442–446.
58. Häberlin, H., and Minkner, R., Apr. 1994, “A Simple Method for Lightning Protection of PV-Systems”, **Proc. 12<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference**, pp. 1885–1888.
59. Hernandez, J. C., Vidal, P. G., and Jurado, F., Jun. 2005, “Guidelines to Requirements for Protection Against Electric Shock in PV Generators”, **Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting**, pp. 17–22.
60. Hernandez, J.C., et al., 2008, “Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 23, Issue: 4, pp. 1961- 1971.
61. E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, 2000, **High Voltage Engineering**, Butterworth-Heinemann, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd., London, England.
62. Wadhwa, C.L., 2007, **High Voltage Engineering**, New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, India, pp. 168-169.

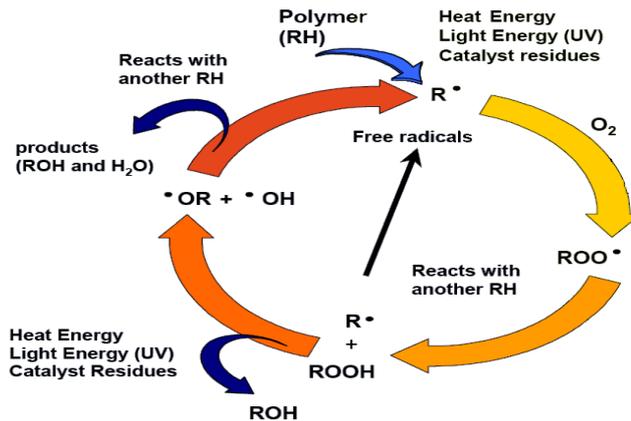
63. ตำราวย ตั้งษ์สะอาด, 2549, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 3, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 7-2.
64. Kwan Chi Kao, 2004, **Dielectric Phenomena in Solids: with Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes**, Elsevier Academic Press.
65. สุรพล ดำรงกิตติกุล, 2535, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 176.
66. Richard H. Boyd and Grant D. Smith, 2007, **Polymer Dynamics and Relaxation**, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 31-33.
67. Wells Plastics Ltd, 2008, **Antioxidants**, Staffordshire, United Kingdom.
68. Heacock, J.F., Malloreay, F.B. and Gay, F.P., 1968, “Photodegradation of Polyethylene Films”, **Journal of Polymer Science**, A1 (6), pp. 2921–2934.
69. Maruyama, K. and Asakura, H., 1990, “Dichroism Analysis of Polyenes Produced in Heat Treated PVA (Polyvinyl Alcohol)”, **Polymer**, Vol. 31, pp. 2053-2056.

### ภาคผนวก ก

การเสื่อมอายุพอลิเมอร์จากการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศรังสียูวีและอุณหภูมิ

### การเสื่อมอายุของพอลิเมอร์จากการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ

โดยทั่วไป ปฏิกิริยาการรวมตัวกับอากาศทำให้โมเลกุลขาด หรือโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยง แล้วส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจนของโมเลกุลพอลิเมอร์เป็นกลไกแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ (Free-radical Chain Mechanism) อนุมูลอิสระเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา [66] ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ขั้นตอนปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจนของพอลิเมอร์ [67]

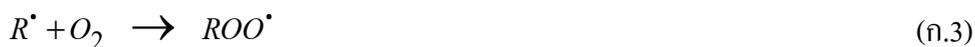
การเกิดอนุมูลอิสระในระยะเริ่มต้นของปฏิกิริยา จะทำให้โมเลกุลเกิดการขาดออกแล้วเกิดอนุมูลอิสระ 2 ตัว ดังปฏิกิริยาที่ (ก.1) คือ



หรือเกิดการหลุดของโมเลกุลไฮโดรเจนเกิดอนุมูลอิสระ 1 ตัว ดังปฏิกิริยาที่ (ก.2) คือ



ขั้นตอนนี้เรียกว่าขั้นตอนการเริ่มต้น (Initiation) ของปฏิกิริยาการรวมตัวกับอากาศ อนุมูลอิสระ ( $R^\bullet$ ) ที่เกิดขึ้น มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนในอากาศมาก จึงเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระเพอร์ออกซิ (Peroxy Radical) ดังปฏิกิริยาที่ (ก.3)



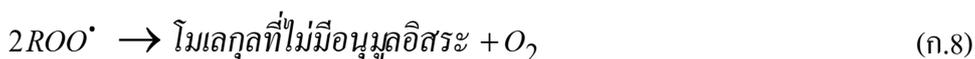
อนุมูลอิสระเพอร์ออกซิที่เกิดขึ้น สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไฮโดรเจนโมเลกุลพอลิเมอร์ได้ จึงทำให้เกิดไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (ROOH) และอนุมูลอิสระตัวใหม่ดังปฏิกิริยาที่ (ก.4) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยา (ก.3) เรียกว่าขั้นตอนนี้ว่าเป็นการแผ่ขยายของปฏิกิริยา (Propagation)



ไฮโดรเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไม่เสถียร เนื่องจากมีพันธะ O-O ซึ่งสามารถเกิดการแยกออกได้ง่าย ดังนั้นจึงมันจะเกิดการสลายตัว ดังปฏิกิริยาที่ (ก.5)-(ก.7)



ทำให้เกิดอนุมูลอิสระชนิดใหม่อีกสองชนิดคือ  $RO\cdot$  และ  $\cdot OH$  ปฏิกิริยาจะสิ้นสุด (Termination) ได้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้



ผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (ก.9) และ (ก.10) ทำให้เกิดโมเลกุลพอลิเมอร์ยาวขึ้น แต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดกับโมเลกุลมากกว่า 2 โมเลกุลจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุล

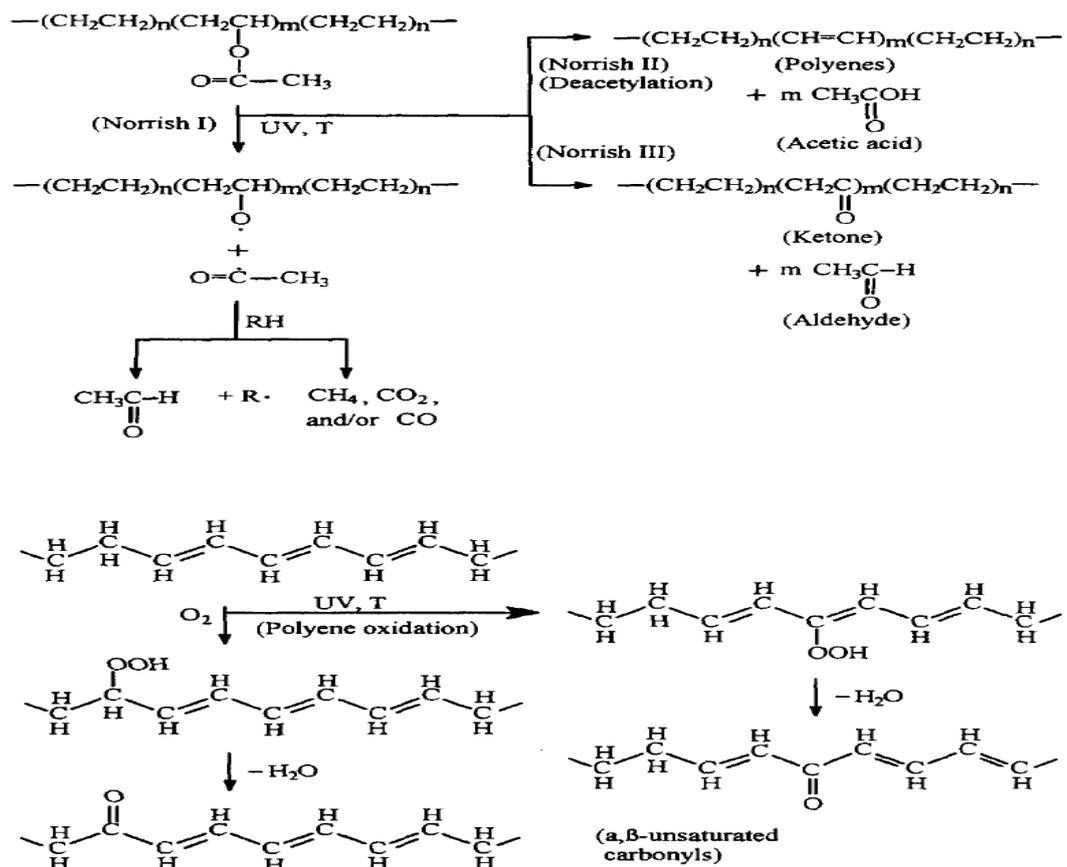
ผลของการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับอากาศดังในปฏิกิริยาที่ (ก.1) ถึง (ก.10) ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงเช่น ทำให้การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างขึ้น มักจะพบออกซิเจนปริมาณสูงเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลพอลิเมอร์ ซึ่งออกซิเจนดังกล่าวมักจะอยู่ในรูปหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอนิล (-C=O) หมู่เอสเทอร์ (-COOR) และหมู่กรด (-COOH) นอกจากนี้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสี สมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ เช่น ค่าดัชนีการไหล สมบัติการไหลทั้งแบบเหนียวแบบยืด การทนต่อการกระแทก และสมบัติต้านไฟฟ้าเปลี่ยนไป

### การเสื่อมสภาพของอีวีเอจากรังสียูวีและอนุมูล

อีวีเอเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลประกอบด้วยโมโนเมอร์สองชนิดคือ อีธีลีน (Ethylene) และ ไวนิล อะซิเตท (Vinyl Acetate) ต่อเรียงเป็น โคพอลิเมอร์แบบแรนดอม (Random Copolymer) การหุ้มฉนวนแผงใช้โคพอลิเมอร์ของ ไวนิล อะซิเตท 33% (โดยน้ำหนัก) ซึ่งมีผลของเชิงประกอบทางโมเลกุลเฉลี่ยของ  $-(CH_2-CH_2)_{6,14}-(CH_2-CHAc)-$  ซึ่ง Ac คือหมู่แทนที่อะซิเตท (Acetate Pendent Group)

OCOCH<sub>3</sub> ในการผลิตอีวีเอ ต้องมีอีซีดีน 20 Blocks หรือมากกว่า และไวโนลอะซิเตตอีกหลายหน่วย อาจจะถูกก่อรูปขึ้น ดังนั้นกลไกการเสื่อมสภาพขั้นปฐมภูมิ (Primary Degradation Mechanisms) จึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการขั้นตอนที่คล้ายคลึงกับพอลิอีซีดีน (Polyethylene) [68] และพอลิไวโนล อะซิเตต (Polyvinyl Acetate) [69]

ลำดับที่สำคัญของการเสื่อมสภาพจากความร้อนทางแสงของอีวีเอถูกแสดงดังรูปที่ ก.2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพทางความร้อนและความร้อนทางแสง (Thermal and Photothermal Stability) ของพอลิไวโนล อะซิเตต (Polyvinyl Acetate, PVA) และอีวีเอ ปฏิกริยาพื้นฐานเป็น Norrish Type II ในการผลิตกรดอะซิติก (Acetic Acid) ยกตัวอย่างเช่น CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> จากการเสื่อมสภาพทางแสง (Photodegradation) ขึ้นอยู่กับอีวีเอที่ถูกทำให้ไม่มีเสถียรภาพ โคลิเมอร์ผลิตสองส่วนหลักคือ กรดอะซิติก และ Aldehyde

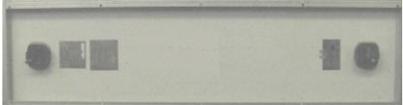
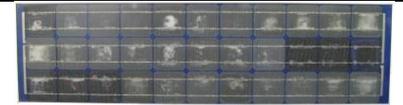
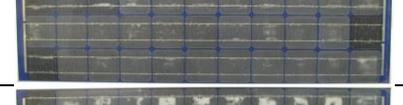
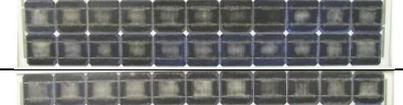
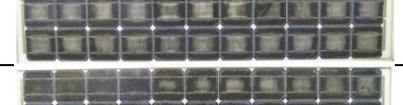


รูปที่ ก.2 กลไกการเสื่อมสภาพที่สำคัญของอีวีเอจากรังสียูวีและอุณหภูมิ [27]

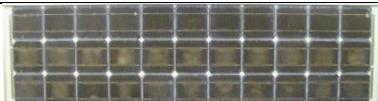
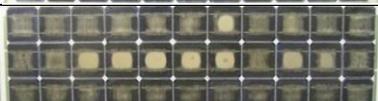
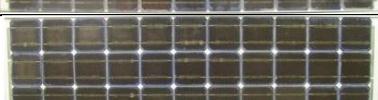
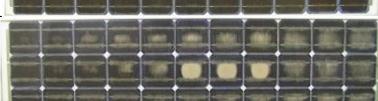
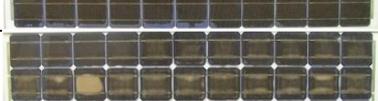
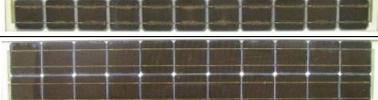
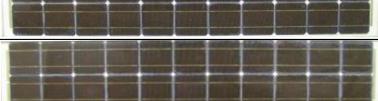
### ภาคผนวก ข

สภาพภายนอกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

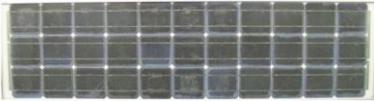
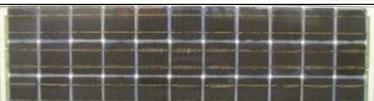
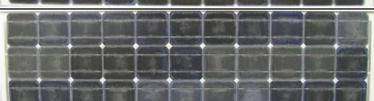
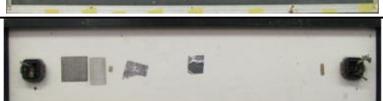
ตารางที่ ข.1 สภาพภายนอกแผงจากโครงการ มช. 39 แผง

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
1	B1-1		
2	B1-2		
3	B1-3		
4	B2-1		
5	B3-1		
6	B3-2		
7	B3-3		
8	B3-4		
9	B3-5		
10	B3-6		
11	B3-7		
12	B3-8		
13	B3-9		
14	B3-10		

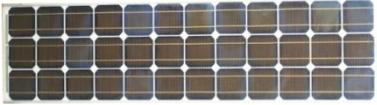
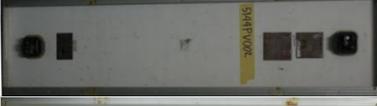
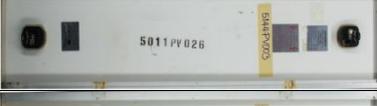
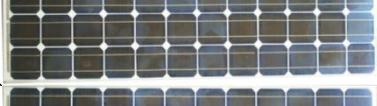
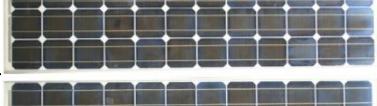
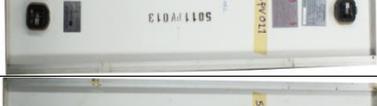
ตารางที่ ข.1 สภาพภายนอกแผงจากโครงการ มจธ. 39 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
15	B4-1		
16	B4-2		
17	B4-3		
18	B4-4		
19	B4-5		
20	B4-6		
21	B4-7		
22	B4-8		
23	B4-9		
24	B4-10		
25	B4-11		
26	B4-12		
27	B4-13		
28	B5-1		
29	B5-2		

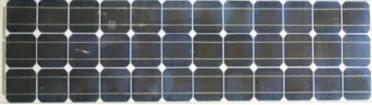
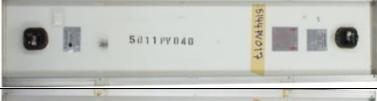
ตารางที่ ข.1 สภาพภายนอกแผงจากโครงการ มจร. 39 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
30	B6-1		
31	B6-2		
32	B6-3		
33	B6-4		
34	B6-5		
35	B6-6		
36	B7-1		
37	B7-2		
38	B7-3		
39	B7-4		

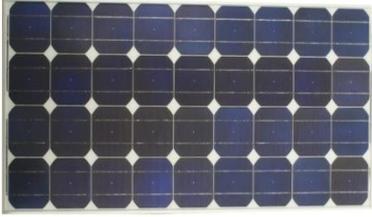
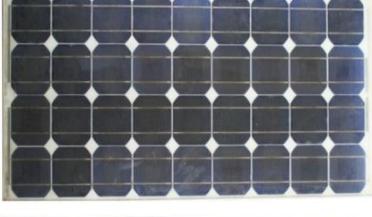
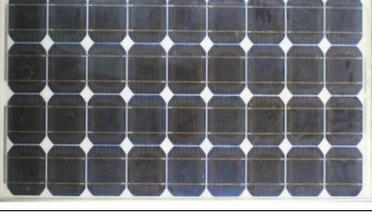
ตารางที่ ข.2 สภาพภายนอกแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย จำนวน 37 แผง

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
1	5144PV001		
2	5144PV002		
3	5144PV003		
4	5144PV004		
5	5144PV005		
6	5144PV006		
7	5144PV007		
8	5144PV008		
9	5144PV009		
10	5144PV010		
11	5144PV011		
12	5144PV012		
13	5144PV013		
14	5144PV014		

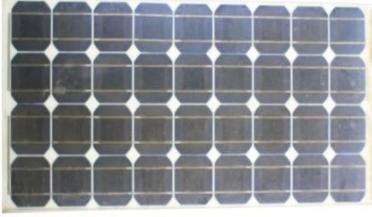
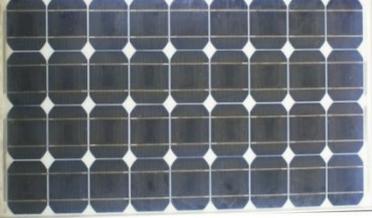
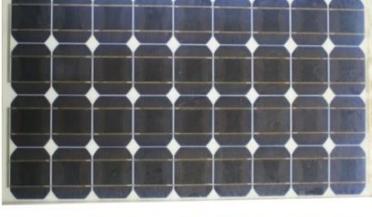
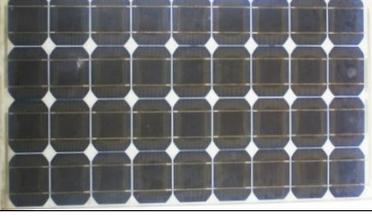
ตารางที่ ข.2 สภาพภายนอกแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย จำนวน 37 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
15	5144PV015		
16	5144PV016		
17	5144PV017		
18	5144PV018		
19	5144PV019		
20	5144PV020		
21	5144PV021		
22	5144PV022		
23	5144PV023		
24	5144PV024		
25	5144PV025		

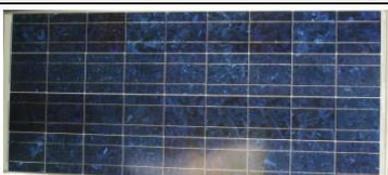
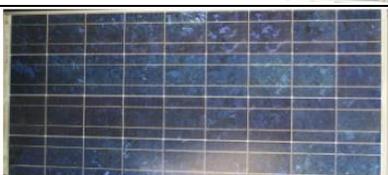
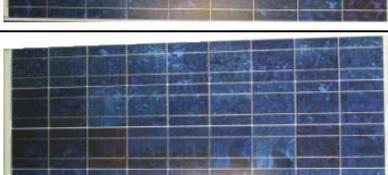
ตารางที่ ข.2 สภาพภายนอกแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย จำนวน 37 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
26	5144PV026		
27	5144PV027		
28	5144PV028		
29	5144PV029		
30	5144PV030		
31	5144PV031		

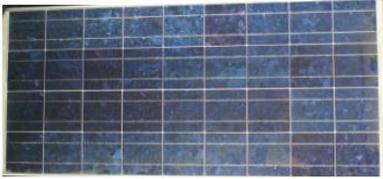
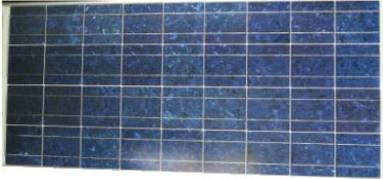
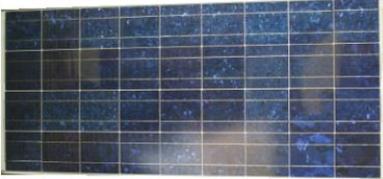
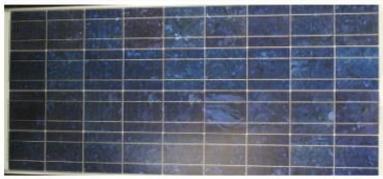
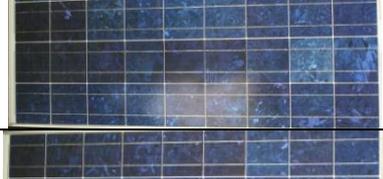
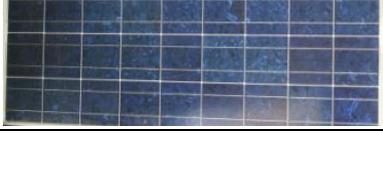
ตารางที่ ข.2 สภาพภายนอกแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย จำนวน 37 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
32	5144PV032		
33	5144PV033		
34	5144PV034		
35	5144PV035		
36	5144PV036		
37	5144PV037		

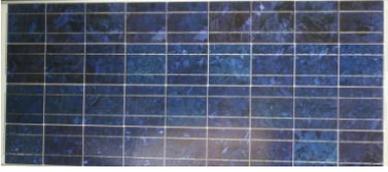
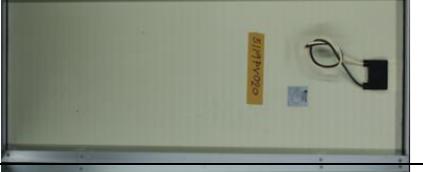
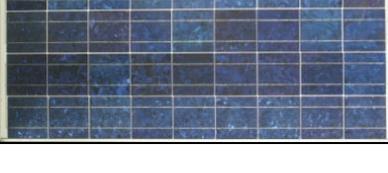
ตารางที่ ข.3 จากตำบลบ้านโสก อำเภอดอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ จำนวน 40 แผง

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
1	5119PV001		
2	5119PV002		
3	5119PV003		
4	5119PV004		
5	5119PV005		
6	5119PV006		
7	5119PV007		
8	5119PV008		

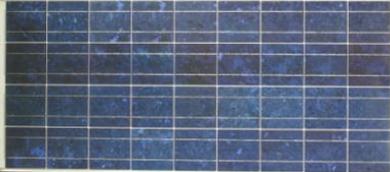
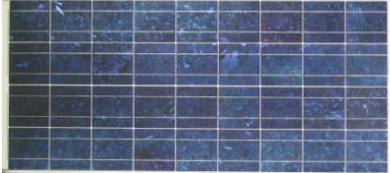
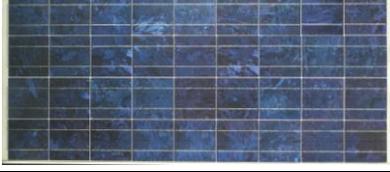
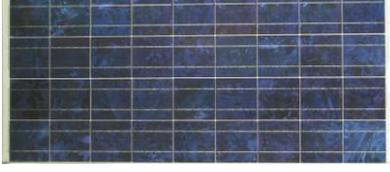
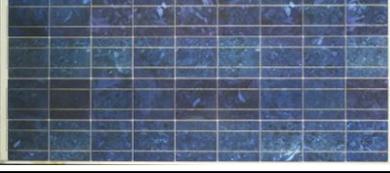
ตารางที่ ข.3 จากตำบลบ้านโสก อำเภอดอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ จำนวน 40 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
9	5119PV009		
10	5119PV010		
11	5119PV011		
12	5119PV012		
13	5119PV013		
14	5119PV014		
15	5119PV015		
16	5119PV016		

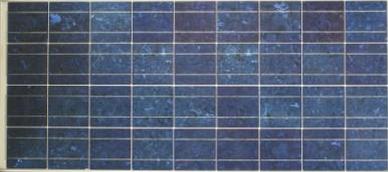
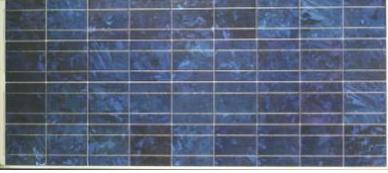
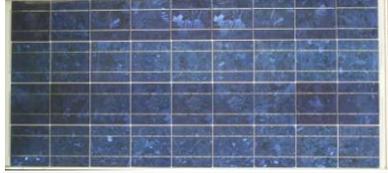
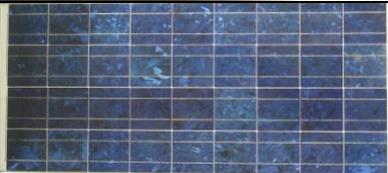
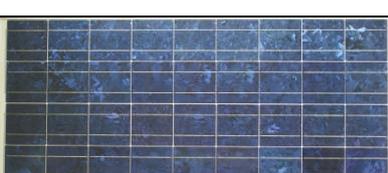
ตารางที่ ข.3 จากตำบลบ้านโสก อำเภอดอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ จำนวน 40 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
17	5119PV017		
18	5119PV018		
19	5119PV019		
20	5119PV020		
21	5119PV021		
22	5119PV022		
23	5119PV023		
24	5119PV024		

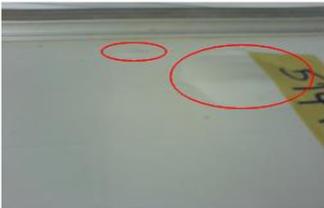
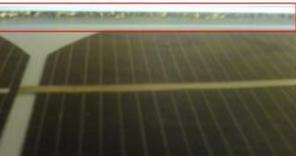
ตารางที่ ข.3 จากตำบลบ้านโสก อำเภอดอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ จำนวน 40 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
25	5119PV025		
26	5119PV026		
27	5119PV027		
28	5119PV028		
29	5119PV029		
30	5119PV030		
31	5119PV031		
32	5119PV032		

ตารางที่ ข.3 จากตำบลบ้านโสก อำเภอดอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ จำนวน 40 แผง (ต่อ)

แผงที่	รหัสแผง	ด้านหน้าแผง	ด้านหลังแผง
33	5119PV033		
34	5119PV034		
35	5119PV035		
36	5119PV036		
37	5119PV037		
38	5119PV038		
39	5119PV039		
40	5119PV040		

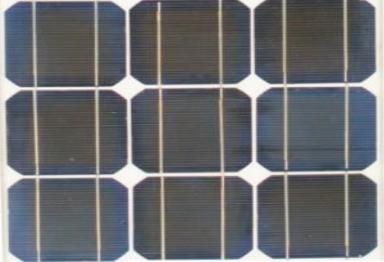
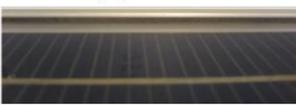
ตารางที่ ข.4 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV012 ซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยที่สุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
น้อย	ไม่มี	น้อย	บวม	มีสิ่งสกปรกเกาะกอยู่ในขอบ
				 

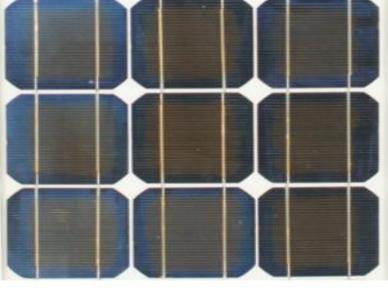
ตารางที่ ข.5 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV013 ซึ่งมีค่าความต้านทานรองจากค่าที่น้อยที่สุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
น้อย	ไม่มี	น้อย	ดี	มีสิ่งสกปรกเกาะกอยู่ในขอบ
				 

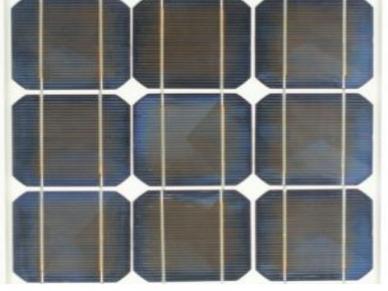
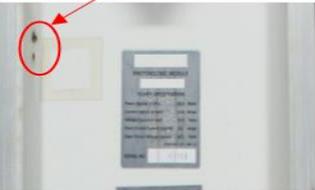
ตารางที่ ข.6 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV018 ซึ่งมีค่าความต้านทานมากที่สุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
น้อย	ไม่มี	น้อย	ดี	ดี
				 

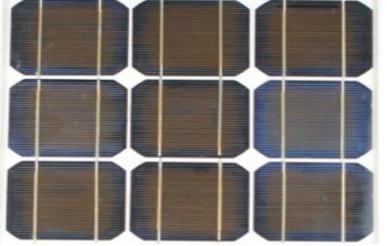
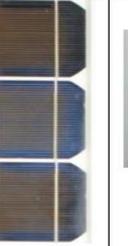
ตารางที่ ข.7 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV021 ซึ่งมีค่าความต้านทานรองจากแผงที่มีค่ามากที่สุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	ไม่มี	น้อย	ดี	
				 (ก) ขอบบน  (ข) ขอบแผงด้านข้าง

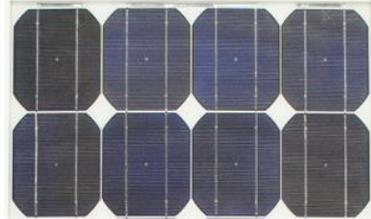
ตารางที่ ข.8 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV09 ซึ่งมีค่าความต้านทานใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	ไม่มี	น้อย	พบจุดไหม้	ดี
				 (ก) ขอบบน  (ข) ขอบแผงด้านข้าง

ตารางที่ ข.9 สภาพภายนอกของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร รหัส 5144PV001 ซึ่งมีค่าความต้านทานใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	ไม่มี	น้อย	ดี	ดี
				 (ก) ขอบบน  (ข) ขอบแผงด้านข้าง

ตารางที่ ข.10 สภาพภายนอกของแผงจากประเทศจีน รุ่น Model JDG.M รหัส 5144PV026 ซึ่งมีค่าความต้านทานมากที่สุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ดี	ดี
				

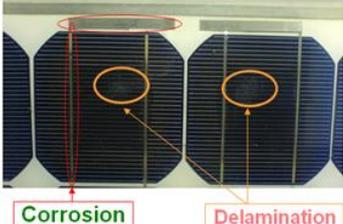
ตารางที่ ข.11 สภาพภายนอกของแผงจากประเทศจีน รุ่น Model JDG.M รหัส 5144PV033 ซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยที่สุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ดี	ดี
				

ตารางที่ ข.12 สภาพภายนอกของแผง Model M75 รหัส 5144PV030 ซึ่งมีค่าความต้านทานมากที่สุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	ไม่พบ	มาก	ดี	ดี
				

ตารางที่ ข.13 สภาพภายนอกของแผงรุ่น Model M75 รหัส 5144PV033 มีค่าความต้านทานน้อยสุด

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	กลางเซลล์	มาก	ดี	ดี
				

ตารางที่ ข.14 สภาพภายนอกของแผง SHARP รุ่น Model NE 1175E1

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ดี	ดี
				

### ภาคผนวก ก

ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผง

ตารางที่ ค.1 ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่ม B1-B7

กลุ่มแผง	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
ค่าเฉลี่ย (GΩ)	14.57	10	3.16	1.14	2.02	1.47	2.88
ค่ามัธยฐาน (GΩ)	16.7	10	2.42	1.07	2.02	1.76	2.37
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (GΩ)	5.24	-	2.32	0.76	0.37	0.75	1.30
ค่าความแปรปรวน (GΩ) <sup>2</sup>	27.42	-	5.38	0.58	0.56	0.56	1.69
ค่าน้อยที่สุด (GΩ)	8.6	10	0.36	0.26	1.76	0.5	1.97
ค่ามากที่สุด (GΩ)	18.4	10	7.20	3.00	2.28	2.22	4.80

ตารางที่ ค.2 ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผงจากวัดป่าวัดป่าสิรินธร จังหวัดเลย

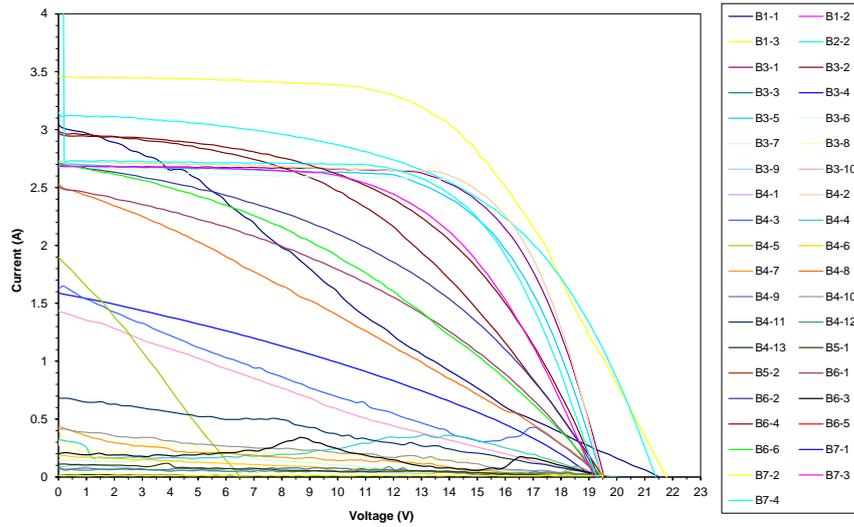
ค่าทางสถิติ	กลุ่มแผง	SOLARTRON		CHINA	หน่วย
		M60 & M55/S53	M75	JDG-M	
จำนวนแผง		23	10	4	-
ค่าเฉลี่ย		7.75	3.47	0.59	(GΩ)
ค่ามัธยฐาน		8.60	3.15	0.45	(GΩ)
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		4.04	2.58	0.52	(GΩ)
ค่าความแปรปรวน		16.3	6.65	0.27	(GΩ) <sup>2</sup>
ค่าน้อยที่สุด		0.86	1.08	0.12	(GΩ)
ค่ามากที่สุด		17.3	10.30	1.32	(GΩ)

ตารางที่ ค.3 ตัวเลขทางสถิติของค่าความต้านทานฉนวนของแผงจาก จังหวัดชัยภูมิ

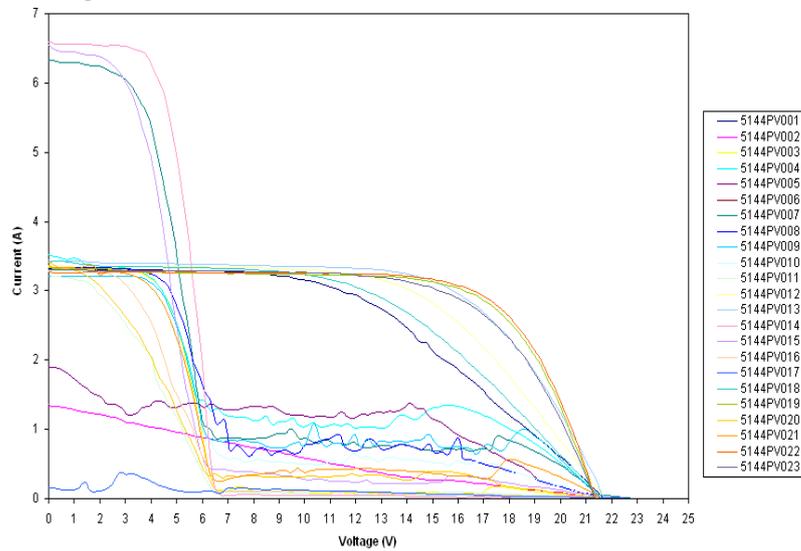
ค่าทางสถิติ	ค่าเฉลี่ย	มัธยฐาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความแปรปรวน	น้อยที่สุด	มากที่สุด
	8.03	6.78	4.64	21.35	2.72	23.6
หน่วย	(GΩ)	(GΩ)	(GΩ)	(GΩ) <sup>2</sup>	(GΩ)	(GΩ)

### ภาคผนวก ง

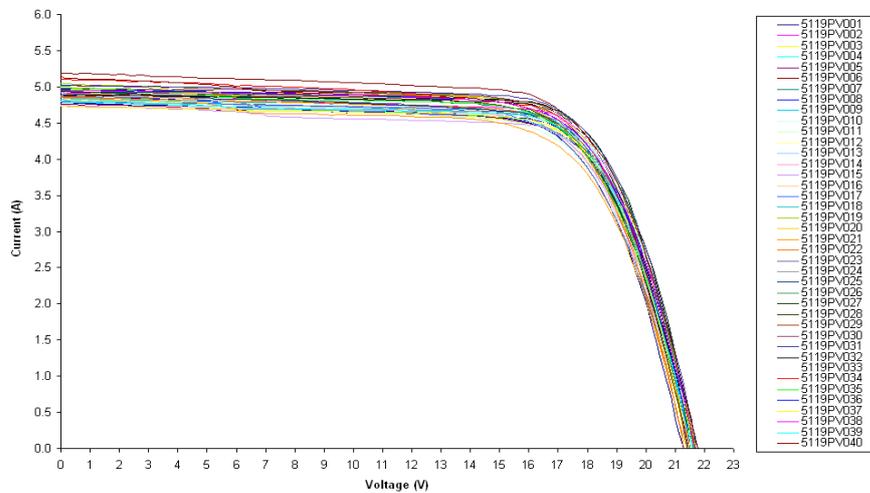
เส้นกราฟกระแส-แรงดันของแผงจาก โครงการ มจร. (จังหวัดบุรีรัมย์และอีสานเขียว)  
วัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธร จังหวัดเลย และ ต.บ้านโสก อ.คอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ



รูปที่ ง.1 กราฟกระแส-แรงดันของแผงจากโครงการ มจร.



รูปที่ ง.2 กราฟกระแส-แรงดันของแผงจากวัดป่าเทิดพระเกียรติสิรินธรจังหวัดเลย

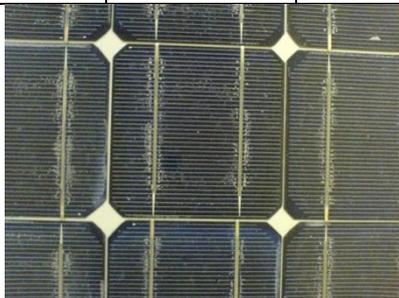
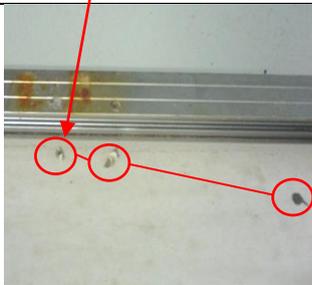


รูปที่ ง.3 กราฟกระแส-แรงดันของแผงจาก ตำบลบ้านโสก อำเภอคอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ

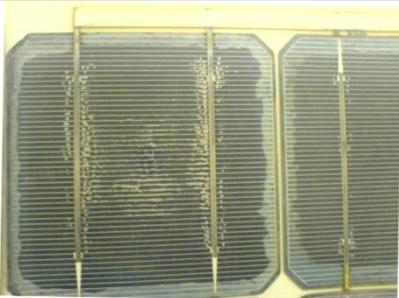
**ภาคผนวก จ**

สภาพแฟงภายนอกของแฟง B2-1, B3-4, B4-12, B5-2, B6-3 และ B7-1

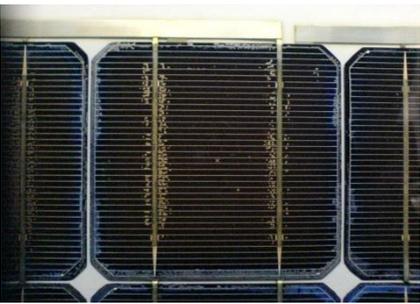
ตารางที่ จ.1 สภาพแผงภายนอกของแผง B2-1

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
น้อย	เป็นจุดกระจาย	น้อย	มีรอยถลอกบริเวณใกล้ขอบแผง	ปกติ
				

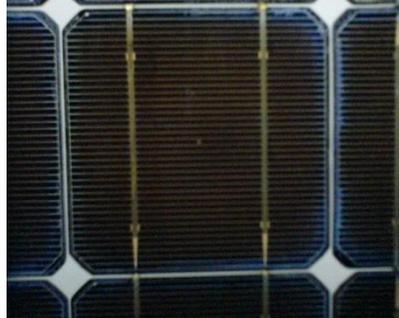
ตารางที่ จ.2 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B3-4

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
น้อย	กลางเซลล์>ขอบ	น้อย	การหลุดร่อนที่มุมแผงบางส่วน	พบรอยแตกของกาวฉนวนขอบและขอบแผงอลูมิเนียมคู่คร่อน
				

ตารางที่ จ.3 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B4-12

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	กลางเซลล์>ขอบ	น้อย	หลุดร่อนจากข้อต่อสายไปยังขอบแผง	พบรอยแตกของกาวฉนวนขอบและขอบแผงอลูมิเนียมคู่คร่อน
			 แนวหลุดร่อน	

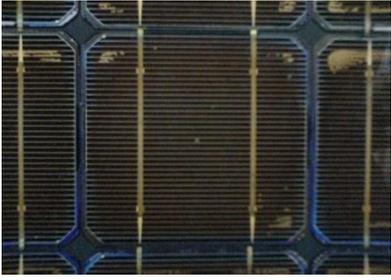
ตารางที่ จ.4 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B5-2

Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	ขอบ>กลางเซลล์	น้อย	ไม่พบความผิดปกติ	กรอบและหลุดเป็นผง
				

ตารางที่ จ.5 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B6-3

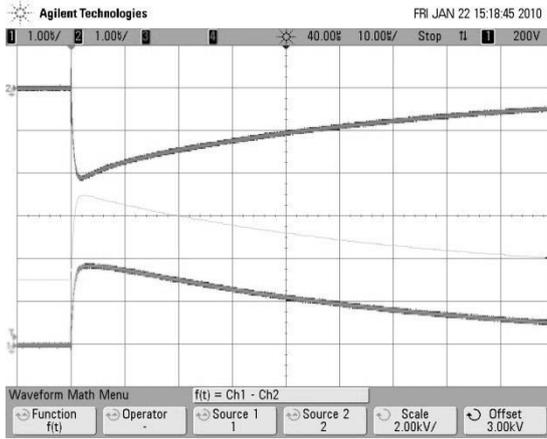
Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
น้อย	ขอบ>กลางเซลล์	น้อย	หลุดร่อนที่มุมแผงหรือขอบ แผงและมีรอยถลอก	กรอบและหลุดเป็นผง
				

ตารางที่ จ.6 สภาพแผงภายนอกของกลุ่ม B7-1

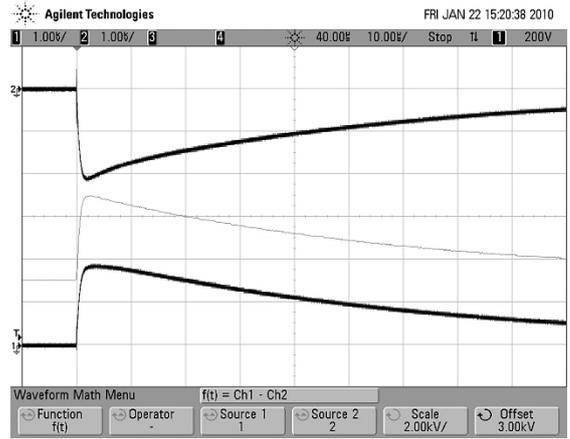
Browning	Delamination	Corrosion	สภาพ Back Sheet	สภาพ Edge Seal
มาก	มุมแผงหรือ ขอบเซลล์	น้อย	ถลอกที่ขอบแผง	พบรอยแตกของกาวฉนวนขอบ
				

### ภาคผนวก ฉ

ผลการบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ของแผงซึ่งมีรูปคลื่นเหมือนกันที่ค่ายอดแรงดันสูงสุด 4 kV

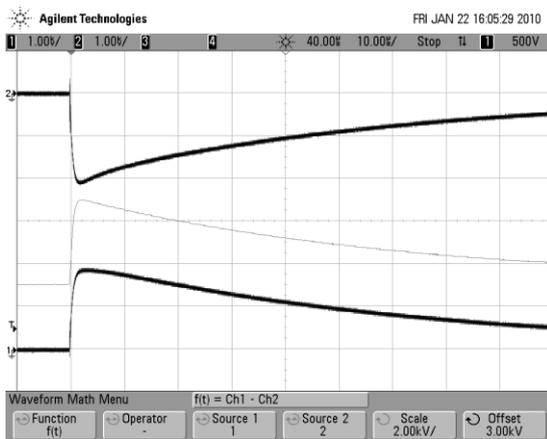


(ก) ก่อนจ่ายเข้าแผง

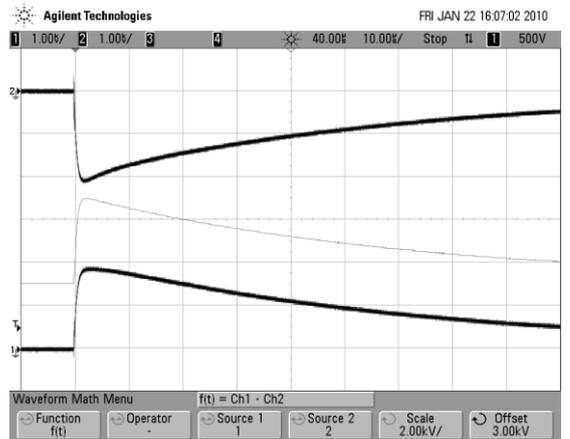


(ข) หลังจ่ายเข้าแผง

รูปที่ จ.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 4 kV ของแผง B1-3

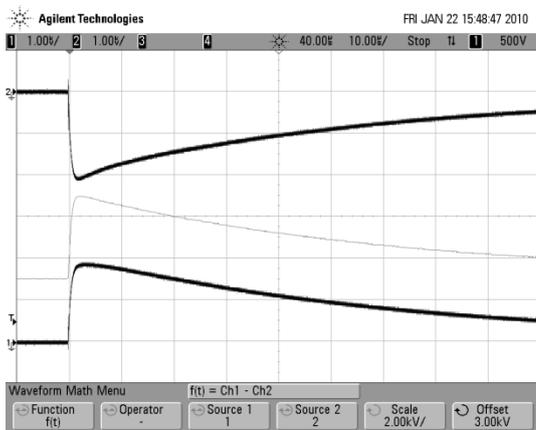


(ก) ก่อนจ่ายเข้าแผง

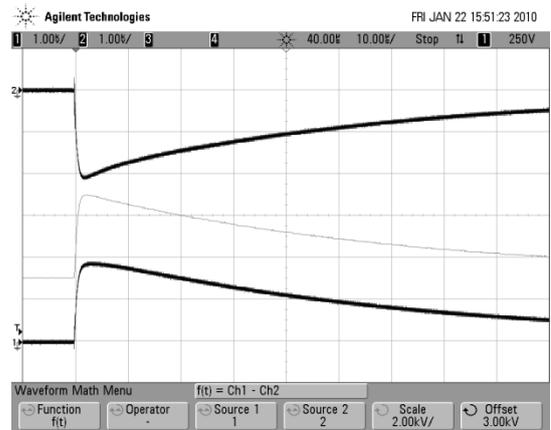


(ข) หลังจ่ายเข้าแผง

รูปที่ จ.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 4 kV ของแผง B4-8



(ก) ก่อนจ่ายเข้าแผง

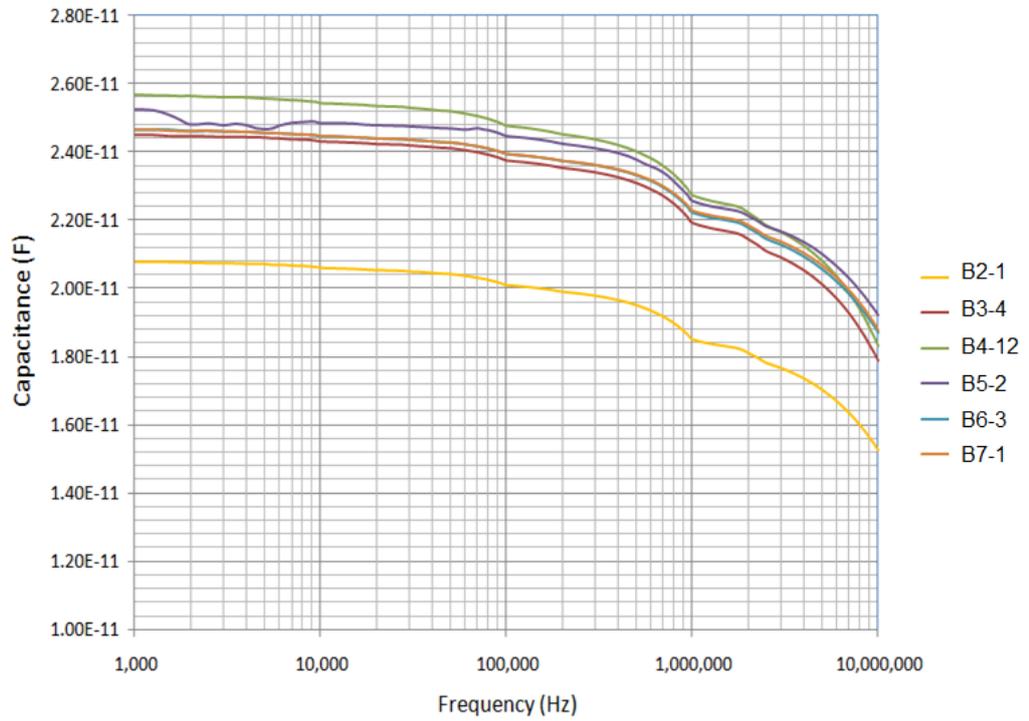


(ข) หลังจ่ายเข้าแผง

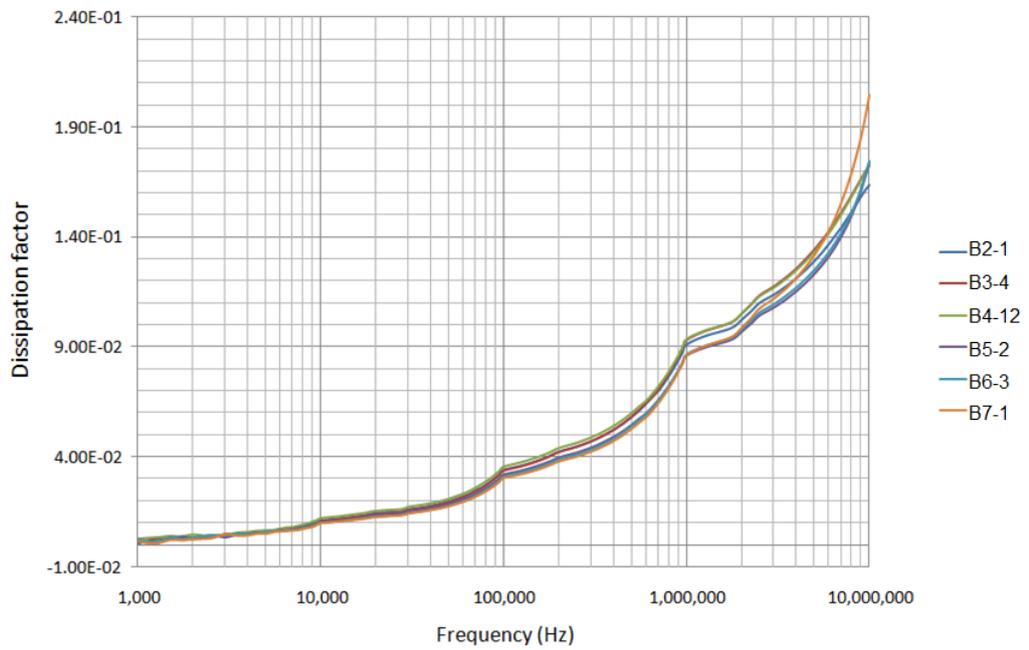
รูปที่ จ.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 4 kV ของแผง B5-1

### ภาคผนวก ข

ค่าความเก็บประจุและค่าตัวประกอบความสูญเสียของฉนวนตัวอย่างอีวีเอในฟังก์ชันของความถี่



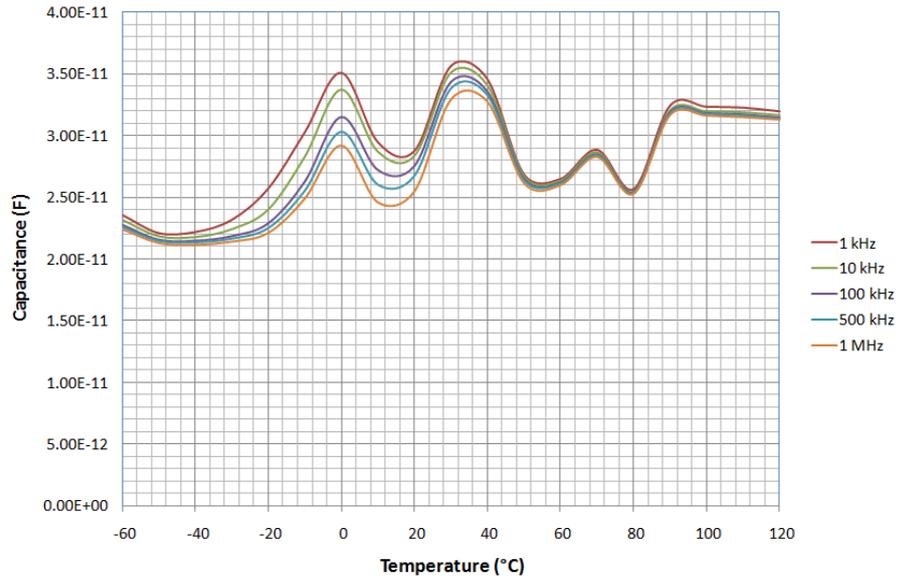
รูปที่ ข.1 ค่าความจุไฟฟ้าของอีวีเอที่เสื่อมสภาพในฟังก์ชันความถี่



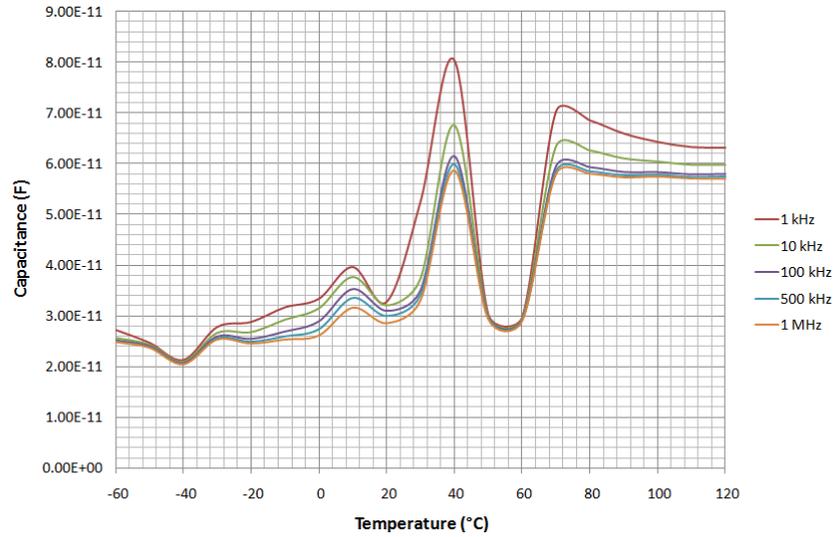
รูปที่ ข.2 ตัวประกอบความสูญเสียของอีวีเอที่เสื่อมสภาพในฟังก์ชันความถี่

### ภาคผนวก ข

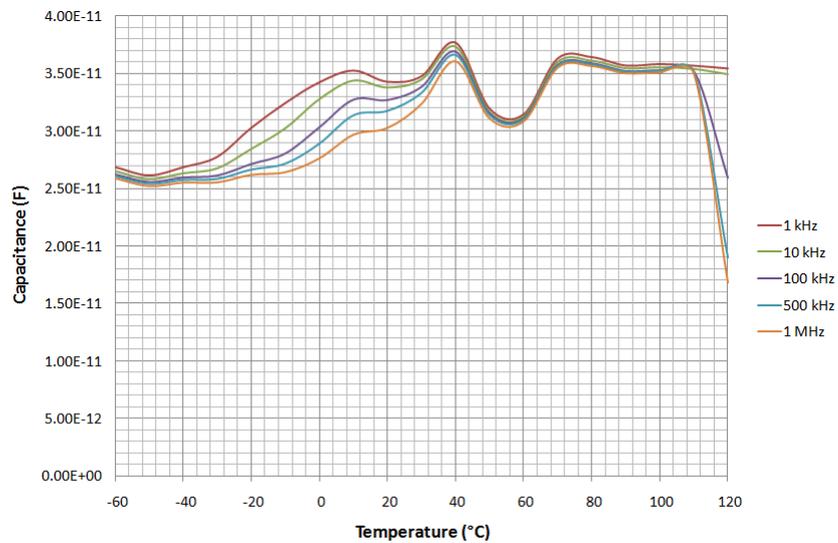
ค่าความถี่ประจุของชั้นตัวอย่างอีวีเอในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ



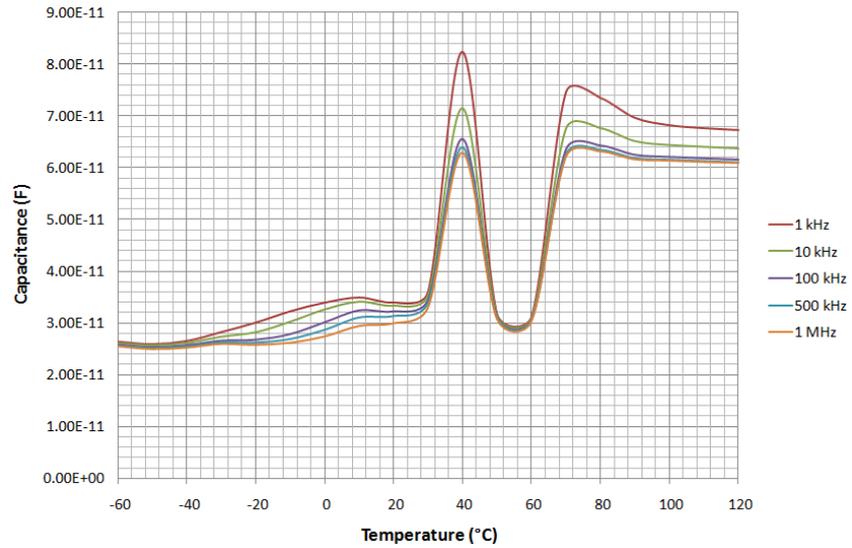
รูปที่ ข.1 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอิวีเอสำหรับ B2-1 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



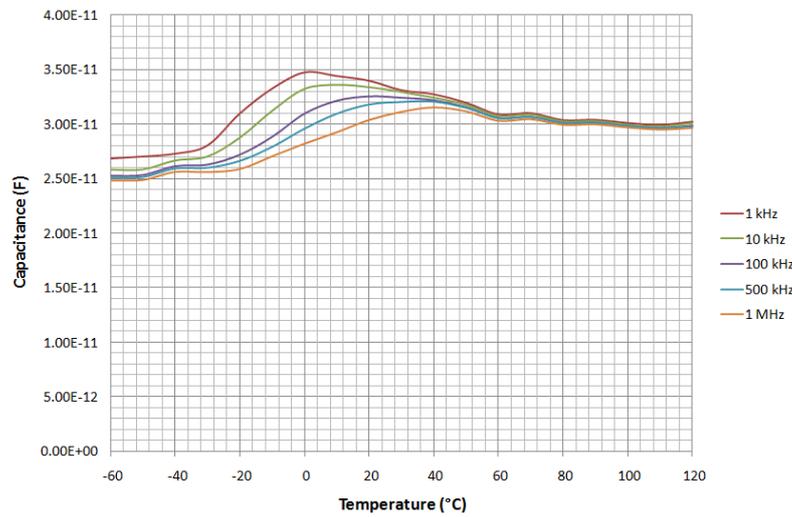
รูปที่ ข.2 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอิวีเอสำหรับ B3-4 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



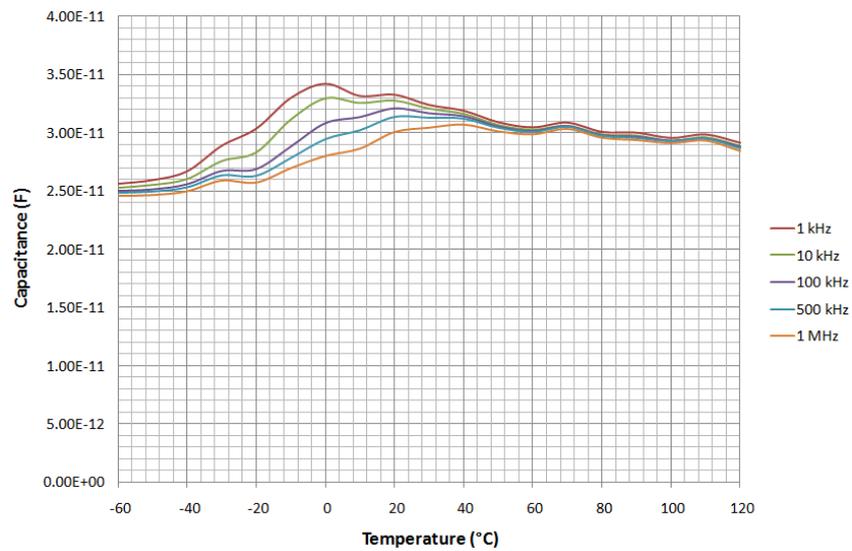
รูปที่ ข.3 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอิวีเอสำหรับ B4-12 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



รูปที่ ข.4 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอวีไอเอสำหรับ B5-2 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



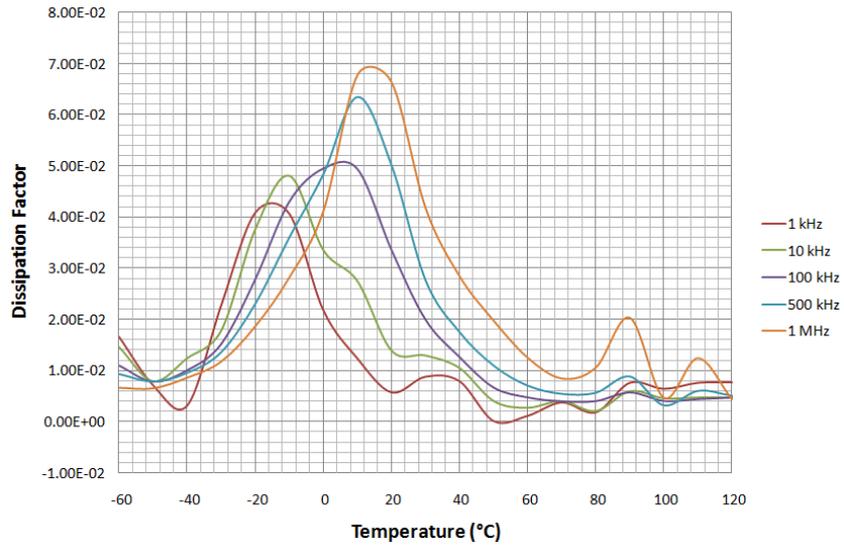
รูปที่ ข.5 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอวีไอเอสำหรับ B6-3 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



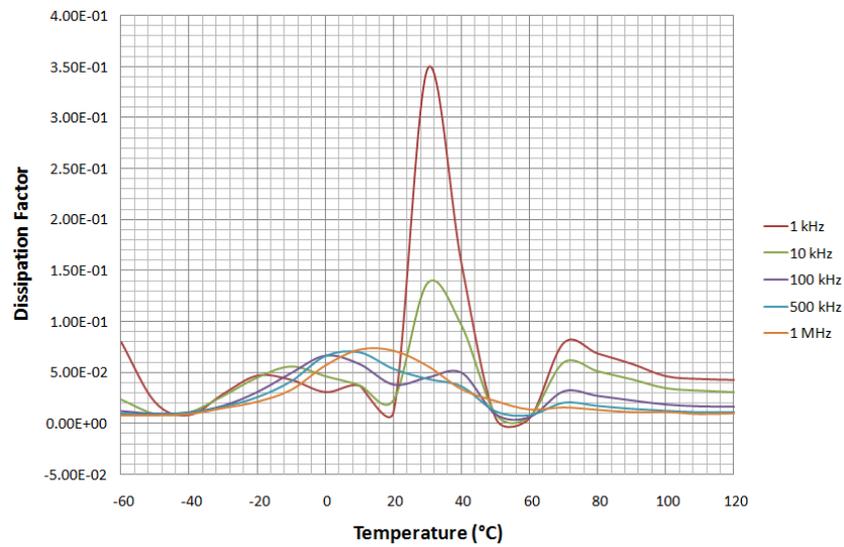
รูปที่ ข.6 ค่าความเก็บประจุขึ้นตัวอย่างอวีไอเอสำหรับ B7-1 ภายใต้อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C

### ภาคผนวก ฅ

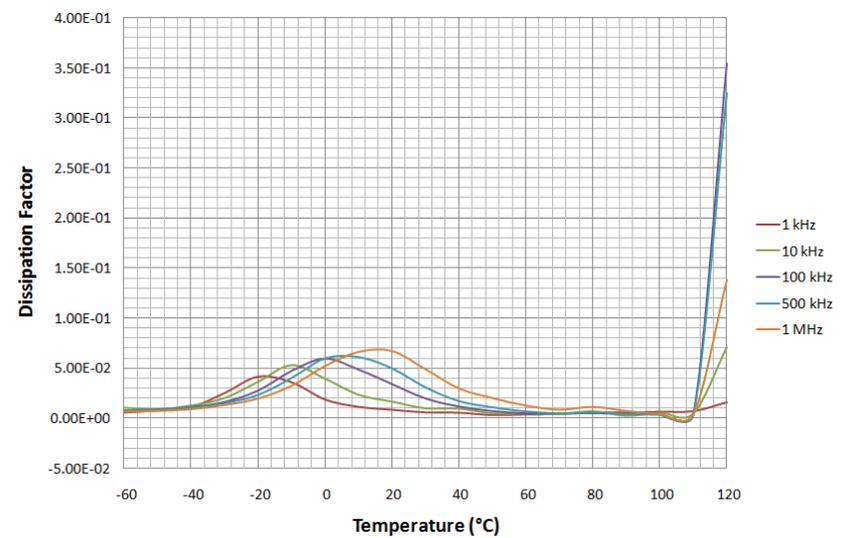
ค่าตัวประกอบความสูญเสียของชั้นตัวอย่างอีวีเอในฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ



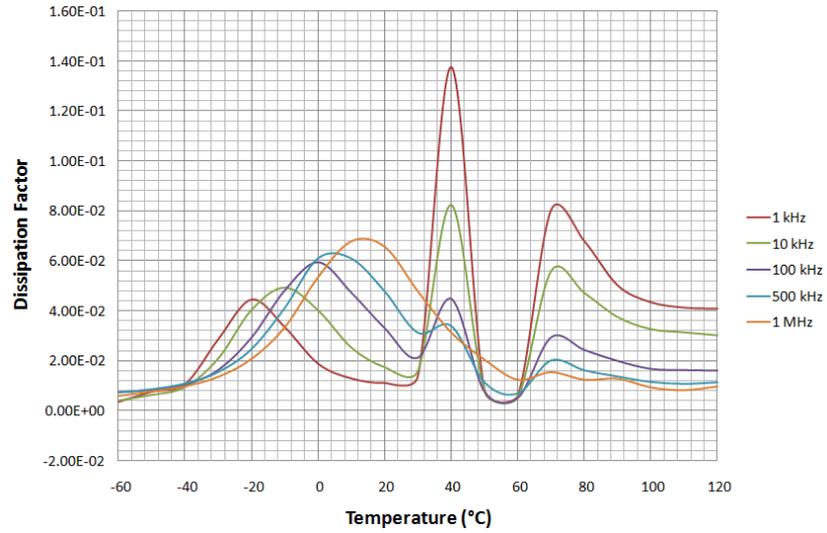
รูปที่ ฅ.1 ค่าตัวประกอบความสูญเสีย ขึ้นตัวอย่างอวีเอสำหรับ B2-1 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



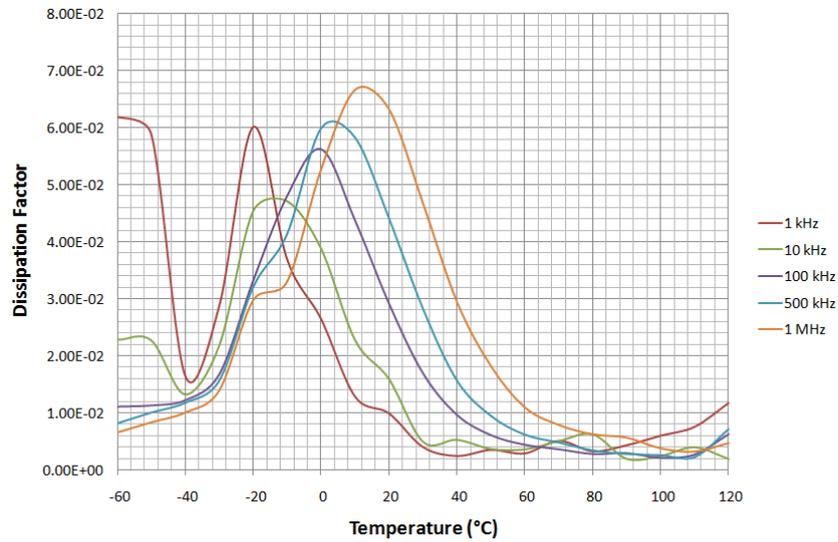
รูปที่ ฅ.2 ค่าตัวประกอบความสูญเสีย ขึ้นตัวอย่างอวีเอสำหรับ B3-4 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



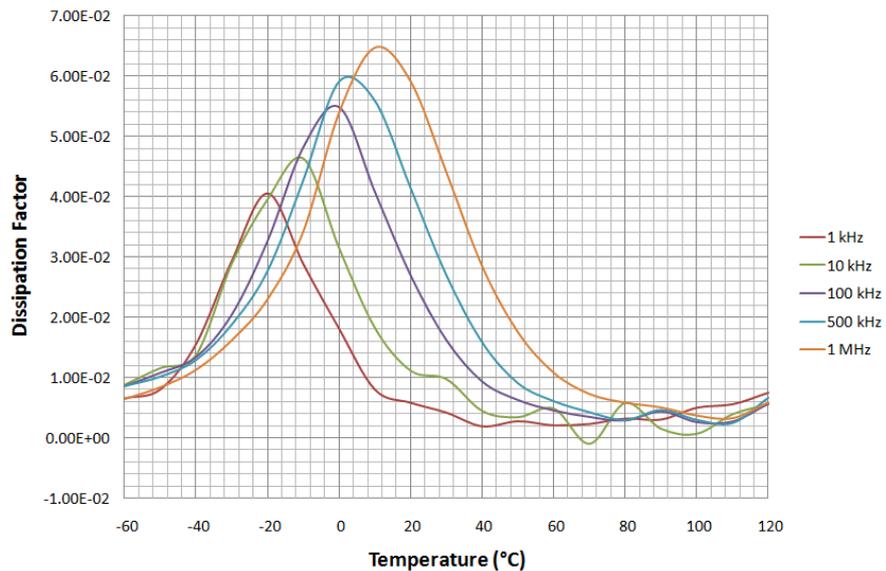
รูปที่ ฅ.3 ค่าตัวประกอบความสูญเสีย ขึ้นตัวอย่างอวีเอสำหรับ B4-12 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



รูปที่ ๓.๔ ค่าตัวประกอบความสูญเสีย ขึ้นตัวอย่างอิมพีแดนซ์สำหรับ B5-2 ภายใต้อิมพีแดนซ์ที่ -60°C ถึง 120°C



รูปที่ ๓.๕ ค่าตัวประกอบความสูญเสีย ขึ้นตัวอย่างอิมพีแดนซ์สำหรับ B6-3 ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 120°C



รูปที่ ๓.๖ ค่าตัวประกอบความสูญเสีย ขึ้นตัวอย่างอิมพีแดนซ์สำหรับ B7-1 ที่ -60°C ถึง 120°C

### ภาคผนวก ๓

คำคำนวณองค์ประกอบจริงและจินตภาพของไดอิเล็กตริกที่เป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ

ตารางที่ ๓.1 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B2-1

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	4.6064	4.5285	4.4506	4.4116	4.3727
-50.0	4.3205	4.2692	4.2148	4.1899	4.1546
-40.0	4.3371	4.2562	4.1975	4.1682	4.1271
-30.0	4.5266	4.3795	4.2706	4.2248	4.1750
-20.0	5.0188	4.6872	4.4710	4.3918	4.3129
-10.0	5.9038	5.5161	5.1269	4.9805	4.8562
0.0	6.8423	6.5727	6.1426	5.9085	5.6925
10.0	5.7509	5.5988	5.3070	5.0692	4.7867
20.0	5.6137	5.5339	5.3744	5.2124	4.9599
30.0	6.9495	6.8438	6.7002	6.5972	6.4190
40.0	6.7409	6.6421	6.5482	6.4928	6.3874
50.0	5.2445	5.2144	5.1796	5.1554	5.1043
60.0	5.1728	5.1428	5.1178	5.1010	5.0699
70.0	5.6317	5.5917	5.5609	5.5450	5.5177
80.0	5.0130	4.9751	4.9678	4.9562	4.9329
90.0	6.3254	6.2497	6.2245	6.2097	6.1783
100.0	6.3090	6.2337	6.2098	6.1988	6.1713
110.0	6.2953	6.2187	6.1885	6.1742	6.1468
120.0	6.2367	6.1749	6.1421	6.1212	6.1076

ตารางที่ ๓.2 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B3-4

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	5.0673	4.7917	4.6978	4.6607	4.6205
-50.0	4.6122	4.5417	4.4780	4.4474	4.4095
-40.0	3.9805	3.9183	3.8620	3.8308	3.8013
-30.0	5.1829	4.9678	4.8301	4.7714	4.7058
-20.0	5.3703	4.9951	4.7435	4.6492	4.5625
-10.0	5.9062	5.4490	5.0087	4.8422	4.7056
0.0	6.2200	5.8674	5.3752	5.0948	4.8492
10.0	7.3866	7.0178	6.5580	6.2372	5.8642
20.0	6.1078	5.9815	5.7676	5.5860	5.2964
30.0	9.2387	6.8940	6.5125	6.3605	6.1391
40.0	14.8013	12.5415	11.4289	11.1432	10.9244
50.0	5.6650	5.6031	5.5488	5.5209	5.4592
60.0	5.5418	5.5016	5.4501	5.4311	5.3919
70.0	13.0613	11.8026	11.0673	10.8972	10.7984
80.0	12.7457	11.6567	11.0351	10.8912	10.8076
90.0	12.2715	11.3692	10.8609	10.7419	10.6754
100.0	11.9701	11.2579	10.8528	10.7575	10.7035
110.0	11.7833	11.1399	10.7743	10.6857	10.6326
120.0	11.7600	11.1387	10.7885	10.7021	10.6306

ตารางที่ ๓.3 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B4-12

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	4.1637	4.1138	4.0672	4.0426	4.0140
-50.0	4.0514	4.0067	3.9644	3.9389	3.9088
-40.0	4.1615	4.0838	4.0231	3.9917	3.9555
-30.0	4.2999	4.1504	4.0504	4.0044	3.9579
-20.0	4.6871	4.4088	4.2044	4.1296	4.0595
-10.0	5.0234	4.6817	4.3437	4.2075	4.0936
0.0	5.3049	5.0752	4.6930	4.4722	4.2767
10.0	5.4635	5.3275	5.0690	4.8545	4.5909
20.0	5.3131	5.2349	5.0669	4.9171	4.6824
30.0	5.3875	5.3425	5.2463	5.1637	5.0104
40.0	5.8403	5.7837	5.7223	5.6783	5.5904
50.0	4.9516	4.9077	4.8886	4.8682	4.8206
60.0	4.8734	4.8452	4.8241	4.8100	4.7814
70.0	5.6263	5.5799	5.5465	5.5330	5.5079
80.0	5.6451	5.5947	5.5655	5.5518	5.5292
90.0	5.5321	5.4951	5.4620	5.4516	5.4312
100.0	5.5518	5.5077	5.4717	5.4627	5.4423
110.0	5.5292	5.4848	5.4580	5.4473	5.4301
120.0	5.4914	5.4002	3.7891	2.7987	2.5819

ตารางที่ ๓.4 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B5-2

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	4.3419	4.2841	4.2435	4.2189	4.1872
-50.0	4.2591	4.2115	4.1590	4.1325	4.0981
-40.0	4.3588	4.2854	4.2209	4.1863	4.1444
-30.0	4.6378	4.4818	4.3643	4.3140	4.2604
-20.0	4.9355	4.6199	4.3935	4.3104	4.2326
-10.0	5.2961	4.9513	4.5679	4.4194	4.2954
0.0	5.5735	5.3414	4.9391	4.7040	4.4908
10.0	5.7386	5.5906	5.3187	5.0953	4.8183
20.0	5.5798	5.4671	5.2919	5.1442	4.9045
30.0	5.9194	5.8039	5.6668	5.5758	5.4149
40.0	13.4095	11.6952	10.7591	10.5089	10.3160
50.0	5.2225	5.1660	5.1227	5.0991	5.0454
60.0	5.1243	5.0714	5.0388	5.0233	4.9911
70.0	12.2182	11.0745	10.4349	10.2838	10.1970
80.0	12.0462	11.0940	10.5588	10.4308	10.3585
90.0	11.4276	10.6849	10.2646	10.1653	10.1086
100.0	11.1975	10.5648	10.2004	10.1169	10.0688
110.0	11.1034	10.5078	10.1537	10.0737	10.0257
120.0	11.0432	10.4543	10.1123	10.0328	9.9937

ตารางที่ ๕.5 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B6-3

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	4.8372	4.6527	4.5578	4.5258	4.4890
-50.0	4.8729	4.6555	4.5726	4.5365	4.4964
-40.0	4.9264	4.8052	4.7201	4.6782	4.6293
-30.0	5.0609	4.8705	4.7455	4.6889	4.6259
-20.0	5.5788	5.1794	4.9079	4.8002	4.6743
-10.0	5.9955	5.6246	5.2006	5.0288	4.8846
0.0	6.2650	5.9921	5.5835	5.3242	5.0878
10.0	6.2066	6.0627	5.8009	5.5714	5.2721
20.0	6.1299	6.0259	5.8762	5.7283	5.4758
30.0	5.9743	5.9465	5.8556	5.7727	5.6142
40.0	5.9064	5.8493	5.8141	5.7790	5.6909
50.0	5.7673	5.7353	5.7027	5.6791	5.6273
60.0	5.5757	5.5463	5.5207	5.5078	5.4733
70.0	5.5958	5.5684	5.5380	5.5267	5.4993
80.0	5.4811	5.4559	5.4392	5.4313	5.4067
90.0	5.4858	5.4626	5.4456	5.4348	5.4140
100.0	5.4347	5.4015	5.3890	5.3815	5.3620
110.0	5.4050	5.3728	5.3539	5.3470	5.3286
120.0	5.4556	5.4319	5.3975	5.3707	5.3547

ตารางที่ ๕.6 ค่าคำนวณองค์ประกอบจริงของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B7-1

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	4.9148	4.8584	4.7977	4.7641	4.7231
-50.0	4.9756	4.9069	4.8222	4.7851	4.7372
-40.0	5.1198	5.0038	4.9076	4.8566	4.7991
-30.0	5.5367	5.2974	5.1255	5.0514	4.9751
-20.0	5.8172	5.4400	5.1555	5.0459	4.9424
-10.0	6.3240	5.9780	5.5227	5.3347	5.1774
0.0	6.5586	6.3305	5.9060	5.6399	5.3733
10.0	6.3597	6.2572	6.0110	5.7876	5.4898
20.0	6.3800	6.2970	6.1563	6.0101	5.7644
30.0	6.2123	6.1649	6.0776	5.9998	5.8390
40.0	6.1175	6.0788	6.0287	5.9854	5.8936
50.0	5.9277	5.8937	5.8595	5.8380	5.7834
60.0	5.8440	5.8200	5.7878	5.7707	5.7369
70.0	5.9213	5.8817	5.8660	5.8520	5.8240
80.0	5.7687	5.7402	5.7171	5.7035	5.6800
90.0	5.7561	5.7203	5.6931	5.6700	5.6417
100.0	5.6696	5.6353	5.6266	5.6158	5.5936
110.0	5.7258	5.6903	5.6623	5.6573	5.6326
120.0	5.5895	5.5497	5.5279	5.4986	5.4635

ตารางที่ ๗.7 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B2-1

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	0.0765	0.0657	0.0485	0.0412	0.0292
-50.0	0.0309	0.0334	0.0326	0.0330	0.0273
-40.0	0.0139	0.0525	0.0418	0.0398	0.0357
-30.0	0.1029	0.0777	0.0646	0.0574	0.0493
-20.0	0.2047	0.1761	0.1244	0.1013	0.0806
-10.0	0.2394	0.2651	0.2208	0.1794	0.1371
0.0	0.1488	0.2201	0.3045	0.2858	0.2344
10.0	0.0711	0.1535	0.2624	0.3216	0.3242
20.0	0.0323	0.0765	0.1805	0.2611	0.3292
30.0	0.0614	0.0880	0.1334	0.1826	0.2685
40.0	0.0535	0.0691	0.0823	0.1137	0.1819
50.0	0.0009	0.0205	0.0342	0.0565	0.1010
60.0	0.0061	0.0134	0.0238	0.0360	0.0636
70.0	0.0214	0.0220	0.0215	0.0303	0.0470
80.0	0.0093	0.0098	0.0194	0.0281	0.0524
90.0	0.0483	0.0366	0.0350	0.0550	0.1258
100.0	0.0408	0.0279	0.0245	0.0200	0.0290
110.0	0.0481	0.0287	0.0266	0.0373	0.0765
120.0	0.0482	0.0288	0.0282	0.0312	0.0271

ตารางที่ ๗.8 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B3-4

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	0.4073	0.1116	0.0553	0.0454	0.0350
-50.0	0.0974	0.0418	0.0405	0.0396	0.0333
-40.0	0.0344	0.0421	0.0403	0.0405	0.0336
-30.0	0.1521	0.1334	0.0818	0.0781	0.0696
-20.0	0.2539	0.2243	0.1441	0.1198	0.0962
-10.0	0.2545	0.3033	0.2460	0.2008	0.1546
0.0	0.1935	0.2706	0.3553	0.3370	0.2759
10.0	0.2762	0.2613	0.3794	0.4355	0.4257
20.0	0.0721	0.1359	0.2172	0.2986	0.3788
30.0	3.2130	0.9474	0.2902	0.2776	0.3461
40.0	2.3206	1.2008	0.5640	0.4045	0.3646
50.0	0.0314	0.0506	0.0473	0.0653	0.1187
60.0	0.0308	0.0371	0.0318	0.0438	0.0721
70.0	1.0357	0.7040	0.3443	0.2213	0.1664
80.0	0.8773	0.5937	0.2931	0.1874	0.1404
90.0	0.7212	0.4896	0.2408	0.1535	0.1146
100.0	0.5591	0.3872	0.1967	0.1329	0.1167
110.0	0.5178	0.3559	0.1761	0.1164	0.0937
120.0	0.5062	0.3394	0.1720	0.1188	0.1015

**ตารางที่ ๙.9** ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B4-12

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	0.0218	0.0418	0.0298	0.0300	0.0260
-50.0	0.0295	0.0343	0.0326	0.0323	0.0280
-40.0	0.0443	0.0501	0.0423	0.0413	0.0351
-30.0	0.1081	0.0822	0.0636	0.0598	0.0518
-20.0	0.1962	0.1583	0.1135	0.0959	0.0795
-10.0	0.1818	0.2461	0.2028	0.1687	0.1326
0.0	0.0982	0.1983	0.2772	0.2666	0.2231
10.0	0.0605	0.1224	0.2436	0.2962	0.3046
20.0	0.0427	0.0846	0.1699	0.2443	0.3147
30.0	0.0291	0.0508	0.1008	0.1588	0.2454
40.0	0.0295	0.0532	0.0637	0.0969	0.1664
50.0	0.0131	0.0218	0.0321	0.0526	0.0969
60.0	0.0159	0.0212	0.0205	0.0321	0.0600
70.0	0.0202	0.0200	0.0241	0.0267	0.0465
80.0	0.0294	0.0369	0.0245	0.0324	0.0623
90.0	0.0288	0.0107	0.0218	0.0227	0.0388
100.0	0.0337	0.0282	0.0201	0.0181	0.0228
110.0	0.0366	0.0245	0.0203	0.0175	0.0204
120.0	0.0860	0.3806	1.3417	0.9077	0.3572

**ตารางที่ ๙.10** ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B5-2

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	0.0155	0.0180	0.0314	0.0299	0.0238
-50.0	0.0325	0.0270	0.0345	0.0348	0.0308
-40.0	0.0464	0.0408	0.0436	0.0449	0.0398
-30.0	0.1329	0.0941	0.0711	0.0661	0.0572
-20.0	0.2197	0.1869	0.1286	0.1059	0.0872
-10.0	0.1771	0.2443	0.2201	0.1816	0.1432
0.0	0.1051	0.2148	0.2934	0.2867	0.2403
10.0	0.0744	0.1416	0.2511	0.3099	0.3271
20.0	0.0625	0.0960	0.1745	0.2451	0.3220
30.0	0.0825	0.0935	0.1203	0.1731	0.2584
40.0	1.8448	0.9636	0.4815	0.3547	0.3217
50.0	0.0426	0.0433	0.0385	0.0570	0.1025
60.0	0.0313	0.0285	0.0254	0.0340	0.0610
70.0	0.9818	0.6191	0.3061	0.2055	0.1558
80.0	0.8177	0.5239	0.2567	0.1672	0.1269
90.0	0.5735	0.4014	0.2044	0.1378	0.1280
100.0	0.4866	0.3457	0.1709	0.1146	0.0921
110.0	0.4587	0.3302	0.1649	0.1067	0.0805
120.0	0.4513	0.3164	0.1621	0.1122	0.0952

ตารางที่ ๑๑.11 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B6-3

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	0.2998	0.1061	0.0504	0.0366	0.0291
-50.0	0.2869	0.1056	0.0516	0.0453	0.0371
-40.0	0.0812	0.0634	0.0576	0.0547	0.0462
-30.0	0.1457	0.1061	0.0794	0.0731	0.0641
-20.0	0.3358	0.2352	0.1629	0.1537	0.1388
-10.0	0.2215	0.2652	0.2501	0.2081	0.1610
0.0	0.1659	0.2325	0.3144	0.3190	0.2679
10.0	0.0799	0.1379	0.2540	0.3248	0.3511
20.0	0.0608	0.0957	0.1714	0.2526	0.3461
30.0	0.0240	0.0290	0.0992	0.1629	0.2623
40.0	0.0145	0.0305	0.0559	0.0902	0.1673
50.0	0.0203	0.0207	0.0345	0.0534	0.1020
60.0	0.0162	0.0196	0.0242	0.0336	0.0595
70.0	0.0286	0.0278	0.0198	0.0261	0.0429
80.0	0.0180	0.0337	0.0150	0.0181	0.0333
90.0	0.0238	0.0102	0.0158	0.0146	0.0302
100.0	0.0327	0.0129	0.0113	0.0134	0.0198
110.0	0.0409	0.0210	0.0142	0.0115	0.0167
120.0	0.0641	0.0100	0.0335	0.0379	0.0247

ตารางที่ ๑๑.12 ค่าคำนวณองค์ประกอบจินตภาพของไดอิเล็กตริกในฟังก์ชันความถี่และอุณหภูมิ B7-1

ความถี่ (Hz) อุณหภูมิ °C	1,000	10,000	100,000	500,000	1,000,000
-60.0	0.0317	0.0430	0.0413	0.0410	0.0307
-50.0	0.0395	0.0570	0.0522	0.0486	0.0401
-40.0	0.0793	0.0690	0.0660	0.0628	0.0545
-30.0	0.1625	0.1534	0.1051	0.0950	0.0809
-20.0	0.2356	0.2156	0.1687	0.1397	0.1140
-10.0	0.1817	0.2771	0.2666	0.2281	0.1778
0.0	0.1180	0.1993	0.3241	0.3329	0.2902
10.0	0.0502	0.1142	0.2453	0.3230	0.3555
20.0	0.0365	0.0703	0.1659	0.2484	0.3408
30.0	0.0254	0.0603	0.0986	0.1615	0.2574
40.0	0.0111	0.0274	0.0565	0.0947	0.1680
50.0	0.0157	0.0204	0.0370	0.0529	0.1016
60.0	0.0116	0.0284	0.0265	0.0352	0.0623
70.0	0.0131	-0.0056	0.0206	0.0250	0.0427
80.0	0.0179	0.0334	0.0167	0.0171	0.0335
90.0	0.0169	0.0088	0.0251	0.0262	0.0289
100.0	0.0278	0.0040	0.0149	0.0169	0.0210
110.0	0.0314	0.0225	0.0156	0.0140	0.0188
120.0	0.0413	0.0310	0.0315	0.0367	0.0325

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายชาญชัย เดชธรรมรงค์
วัน เดือน ปีเกิด	11 ตุลาคม 2512
<b>ประวัติการศึกษา</b>	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย พ.ศ. 2529
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ	โรงเรียนโปลิเทคนิคลานนา พ.ศ. 2531
ระดับปริญญาตรี	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พ.ศ. 2535
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2538
ระดับปริญญาเอก	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2555
<b>ทุนการศึกษา หรือทุนวิจัย</b>	ทุนการศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่ 2549 ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี นักศึกษา ระดับอุดมศึกษา จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2552
<b>ประวัติการทำงาน</b>	ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2539-2541 อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่ พ.ศ. 2541-ปัจจุบัน

ผลงานที่ได้รับเกียรติพิมพ์

C. Dechthummarong, J. Thongpron, S. Thepa, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara , 2012, “Lightning Impulse Test of Field Aged PV Modules and Simulation Partial Discharge Within MATLAB”, **Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - The 9th International Conference 2012**, Hua Hin, Thailand.

C. Dechthummarong, J. Thongpron, S. Thepa, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara, 2011, “Performance Assessment of PV Modules after Long Field Exposure in North Eastern of Thailand”, **Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - The 8th International Conference 2011**, Khon Kaen, Thailand.

C. Dechthummarong, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara, 2011, “Experiment and Simulation Impulse Partial Discharge Behavior in Dielectric Encapsulations of Field-aged PV Modules”, **37th IEEE, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**, 19-24 June 2011, Seattle, Washington State, The United States of America.

C. Dechthummarong, B. Wiengmoon, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara, 2010, “Physical Deterioration of Encapsulation and Electrical Insulation Properties of PV Modules after Long-term Operation in Thailand”, **Solar Energy Materials & Solar Cells Journal**, Vol. 94, pp. 1437–1440.

C. Dechthummarong, B. Wiengmoon, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara, 2012, Corrigendum to “Physical Deterioration of Encapsulation and Electrical Insulation Properties of PV Modules after Long Term Operation in Thailand” **Solar Energy Materials & Solar Cells Journal**, Volume 103, August 2012, Page 205, Referred to by: C. Dechthummarong, B. Wiengmoon, D. Chenvidhya, C. Jivacate, K. Kirtikara, “Physical Deterioration of Encapsulation and Electrical Insulation Properties of PV Modules after Long Term Operation in Thailand” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 94 (9), 2010, Page 1437–1440.

C. Dechthummarong, C. Limsakul, D. Chenvidhya, C. Jivacate and K. Kirtikara, 19-22 May 2009, "Diagnosis of Dielectric Properties and Assessment of PV Module Performances after Real Operating in Field Exposure at Chaiyaphum Province of Thailand", **The World Renewable Energy Congress 2009 - Asia (WREC-2009)**, Bangkok, Thailand, pp. 651-656.

C. Dechthummarong, B. Wiengmoon, D. Chenvidhya, C. Jivacate and K. Kirtikara, 19-23 January 2009, "Physical Deterioration of Encapsulation and Electrical Insulation Properties of PV Modules after Long-term Operation in Thailand," **The 18th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-18)**, Science City Convention Center, Kolkata, India.