

การวิเคราะห์และทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์

ANALYSIS AND TESTING OF SUBMERGED SOLAR PANELS IN A
SOLAR POWER PLANT

อริวัฒน์ สนิทบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์และทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์

อริวัฒน์ สนิทบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์และทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์
Analysis and Testing of Submerged Solar Panels in a Solar Power
Plant

ชื่อ - นามสกุล นายอริวัฒน์ สนิทบุญ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์รัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนตรี นาวงษ์, วศ.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์, Ph.D.)
วันที่ 4 เดือน เมษายน พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
ชื่อ – นามสกุล	นายอริวัฒน์ สนิทบุญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำภายในโครงการ ว่ามีคุณสมบัติเชิงสมรรถนะและความปลอดภัยสำหรับใช้งานเพื่อผลิตไฟฟ้าขายได้อยู่หรือไม่

การวิเคราะห์ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดผลึกซิลิกอน ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในส่วนที่น้ำท่วมมีจำนวน 111,798 แผ่น มีระยะเวลาในการจมน้ำแตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 5 – 8 วัน จำนวน 73,558 แผ่น 2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 8 – 12 วัน จำนวน 38,240 แผ่น และในส่วนอ้างอิงที่น้ำไม่ท่วมมีจำนวน 20 แผ่น โดยมีขั้นตอนการทดสอบอยู่ 7 วิธี คือ 1) สุ่มเลือกกลุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความถูกต้องเหมาะสมตามหลักสถิติโดยอ้างอิงจากราง Krejcie & Morgan 2) ตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา 3) leakage voltage test 4) leakage current test 5) insulation test 6) wet leakage current test และ 7) I-V test

จากผลการวิเคราะห์พบว่ากลุ่มอ้างอิงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้นที่มีสมรรถนะและคุณภาพเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของแผง เมื่อเทียบกับ Specification กลุ่มที่ 1 มีค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของแผงลดลงเฉลี่ย 43.99% และกลุ่มที่ 2 มีค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของแผงลดลงเฉลี่ย 57.73% ตามลำดับ และค่าความต้านทานฉนวนพื้นผิวที่แผงของกลุ่มที่ 1 จำนวน 85.00% และกลุ่มที่ 2 จำนวน 96.67% ไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสถานะเปียกชื้น เนื่องจากมีค่าความเป็นฉนวนแบบเปียกต่ำกว่าค่ามาตรฐาน IEC 61215 ที่กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 40 MΩm²

คำสำคัญ : แผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำ การทดสอบฉนวน การทดสอบ I-V

Thesis Title	Analysis and Testing of Submerged Solar Panels in a Solar Power Plant
Name - Surname	Mr. Athiwat Sanitboon
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Boonyang Plangklang, Dr.-Ing.
Academic Year	2022

ABSTRACT

This thesis presents the analysis and testing of submerged solar panels in a solar power plant. The analysis aimed to inspect the submerged solar panels whether they had good performance and safety features to generate electricity or not.

The analysis and testing of submerged solar panels in the selected solar power plant focused on the crystalline silicon solar panels in the submerged area. There were 111,798 submerged solar panels with different submersion durations which could be divided into 2 groups: 1) 73,558 solar panels submerged for 5 – 8 days and 2) 38,240 solar panels submerged for 8 – 12 days. There were also 20 non-submerged referenced solar panels. The testing procedures comprised 7 processes: 1) randomization of solar panels from the group of submerged solar panels by Krejcie & Morgan technique, 2) visual inspection, 3) leakage voltage test, 4) leakage current test, 5) insulation test, 6) wet leakage current test and 7) I-V test.

From the analysis results, only the referenced group of solar panels had suitable performance and quality for use. The solar panels in group 1 and 2 were not suitable for use because of the lower maximum power of the panels than the specification. Group 1 and group 2 had an average reduction in the maximum power of 43.99 and 57.73%, respectively. Besides, the insulation resistance multiplied by the panel area of group 1 and group 2 were 85.00 and 96.67%, respectively. As a result, they were not suitable for use in wet conditions because the wet dielectric strength was lower than the IEC 61215 standard which requires not less than 40 MΩm².

Keywords: submerged solar panel, insulation test, I-V test

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ที่เสียสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงข้อบกพร่องจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนทล นาวงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์และเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ญาติพี่น้อง เพื่อนพ้องและคณะครู-อาจารย์ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุน รวมทั้งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยต้องขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

อธิวัฒน์ สนิทบุญ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	12
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	13
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	13
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 บทนำ.....	15
2.2 ทฤษฎีรังสีดวงอาทิตย์.....	15
2.3 การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อการวิจัย.....	16
2.4 หลักการทำงานและประเภทของระบบโซลาร์เซลล์.....	22
2.5 หลักการของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน.....	25
2.6 ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน.....	26
2.7 ข้อกำหนดสำหรับส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	32
2.8 ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ.....	37
2.9 สมการที่ใช้ในการหาค่า Degradation Factor.....	41
2.10 การเสื่อมสภาพและการเสียหายของเซลล์แสงอาทิตย์.....	41
2.11 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
2.12 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์.....	54
2.13 วัฏจักรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	59
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	63
3.1 วิธีการสุ่มเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	64
3.2 วิธีการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา.....	66
3.3 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test	67
3.4 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test	69
3.5 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage current test	71
3.6 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Wet leakage current test	71
3.7 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี I-V test	72
3.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ.....	73
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	75
4.1 บทนำ.....	75
4.2 ผลการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา (Visual inspection)	75
4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test	75
4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test	78
4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage current test	81
4.6 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Wet leakage current test	83
4.7 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี I-V test	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 บทนำ.....	88
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	88
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม.....	91
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดสอบและรายละเอียดอุปกรณ์.....	96
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	139

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดของกลุ่มตัวอย่างของทาโร ยามาเน่ (Yamane)	18
ตารางที่ 2.2 ขนาดกลุ่มตัวอย่างของเครซีและมอร์แกน.....	19
ตารางที่ 2.3 ค่าปรับแก้แรงดันสำหรับ PV Module ชนิดผลึกซิลิกอนและ ชนิดหลายผลึก.	33
ตารางที่ 2.4 ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามวัสดุและประสิทธิภาพการใช้งานทดลอง และใช้งานจริง.....	55
ตารางที่ 2.5 ความเข้มการแผ่รังสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะต่าง ๆ.....	57
ตารางที่ 3.1 ตาราง Krejcie & Margan.....	64
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำที่ทำการสุ่มและทดสอบในแต่ละ การทดสอบ.....	66
ตารางที่ 4.1 สรุปค่า Voc และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ถูกสุ่มเลือก.....	76
ตารางที่ 4.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดสอบ I-V test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือก.....	85



สารบัญรูป

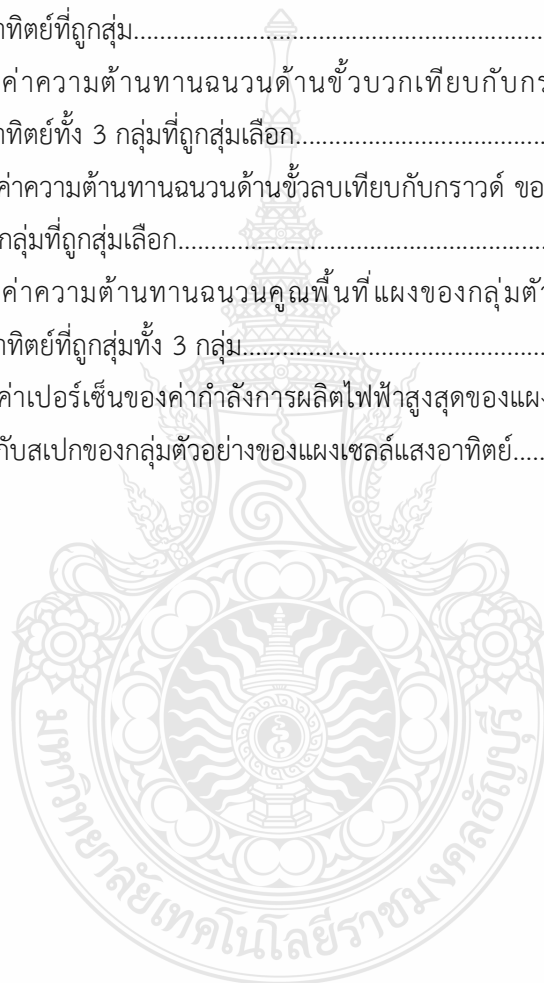
	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในการสูมตัวอย่างกับขนาดของกลุ่มตัวอย่าง.....	16
รูปที่ 2.2 ภาพส่วนประกอบภายในของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
รูปที่ 2.3 ภาพการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์แบบ On grid.....	24
รูปที่ 2.4 ภาพการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์แบบ Off grid.....	24
รูปที่ 2.5 ภาพการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์แบบ Hybrid	25
รูปที่ 2.6 ภาพวงจรระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า...	26
รูปที่ 2.7 ภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน.....	27
รูปที่ 2.8 ภาพโครงสร้างสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
รูปที่ 2.9 ภาพกล่องรวมสายไฟฟ้ากระแสตรง (Combiner box).....	29
รูปที่ 2.10 ภาพอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า (Grid connected inverter).....	30
รูปที่ 2.11 ข้อต่อสายไฟฟ้ากระแสตรง MC4.....	30
รูปที่ 2.12 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer).....	31
รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า (Switch gear).....	32
รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมของระบบ PVGCS และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพและสมรรถนะ.....	41
รูปที่ 2.15 ภาคตัดขวางเซลล์ที่ซิลิกอนสัมผัสกับแถบทองแดง.....	42
รูปที่ 2.16 เซลล์เสียหายจากไฟฟ้าลัดวงจรภายในแผง.....	43
รูปที่ 2.17 การแตกหักของเซลล์.....	43
รูปที่ 2.18 การเสื่อมสภาพของแผงเซลล์ที่มีการลอกของอีวีเอ.....	44
รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนสีน้ำตาลของแผงเซลล์ที่ผ่านการใช้งานในภาคสนามมา 15 ปี.....	45
รูปที่ 2.20 ความชุ่มชื้นของกระจกเกิดจากฝุ่น ออกไซด์ หรือหินปูนบนผิวหน้า.....	46
รูปที่ 2.21 การลอกของแบคซีทและผลจากการซึมของน้ำที่เข้าทางด้านหลังของแผง.....	47
รูปที่ 2.22 วงจรเทียบเคียงเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับโหลด.....	47
รูปที่ 2.23 เส้นโค้งของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จากคุณลักษณะของไดโอด.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.24	วงจรเทียบเคียงของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะเปิดวงจร.....	49
รูปที่ 2.25	เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPP).....	50
รูปที่ 2.26	วงจรเทียบเคียงของ เซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้งานจริง.....	51
รูปที่ 2.27	กราฟเส้นโค้งของ I-V ที่มีค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างกัน.....	52
รูปที่ 2.28	กราฟเส้นโค้งของ I-V ที่มีค่าความต้านทานขนานค่าต่าง.....	53
รูปที่ 2.29	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน.....	55
รูปที่ 2.30	ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพแต่ละประเภท.....	57
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนกระบวนการทดสอบ.....	64
รูปที่ 3.2	วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test เพื่อตรวจวัดค่า Vdc.....	68
รูปที่ 3.3	วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test เพื่อตรวจวัดแรงดันรั่วไหลระหว่างขั้วบวกกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	68
รูปที่ 3.4	วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test เพื่อตรวจวัดแรงดันรั่วไหลระหว่างขั้วลบกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	69
รูปที่ 3.5	วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test การทดสอบความต้านทานฉนวนขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับเฟรม.....	70
รูปที่ 3.6	วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test การทดสอบความต้านทานฉนวนขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับเฟรม.....	70
รูปที่ 3.7	วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage current test เพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของแผงเทียบกับโครงแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	71
รูปที่ 3.8	วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Wet leakage current test.....	72
รูปที่ 3.9	วงจรสำหรับวิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี I-V test.....	73
รูปที่ 4.1	กราฟค่าเปอร์เซ็นต์ของ Voc @STC เมื่อเทียบกับสเปกของกุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	77
รูปที่ 4.2	กราฟค่า Leakage voltage ด้านขั้วบวกเทียบกับกราวด์.....	78

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.3	กราฟค่า Leakage voltage ด้านขั้วลบเทียบกับกราวด์.....	78
รูปที่ 4.4	กราฟค่า Leakage current ของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่ม.....	79
รูปที่ 4.5	กราฟค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่ม.....	80
รูปที่ 4.6	กราฟค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วบวกเทียบกับกราวด์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือก.....	82
รูปที่ 4.7	กราฟค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วลบเทียบกับกราวด์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือก.....	83
รูปที่ 4.8	กราฟค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม.....	84
รูปที่ 4.9	กราฟค่าเปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	87



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากเหตุการณ์น้ำท่วมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้เกิดความเสียหายทั้งหมดแก่โรงไฟฟ้างดังกล่าว โดยเฉพาะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีการจมน้ำเป็นเวลานานมากกว่า 1 สัปดาห์ หลังจากกระดับน้ำลดแล้วได้มีการเข้าทำการปรับปรุงโรงไฟฟ้างดังกล่าวให้สามารถกลับมาขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ได้อีกครั้ง แต่ยังคงมีความกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยและสมรรถนะในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าว จึงได้ดำเนินการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน ซึ่งมีระยะเวลาในการจมน้ำแตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 5 – 8 วัน 2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 8 – 12 วัน จากข้อมูลดังกล่าวพิจารณาแล้วพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีการจมน้ำเกินกว่าเงื่อนไขที่กำหนดไว้ใน IP 67 ตามมาตรฐาน IEC 60529 Degrees of Protection Provided By Enclosures (IP Code) โดย IP 67 กำหนดให้ทำการทดสอบโดยอุปกรณ์ที่จะทดสอบลงในน้ำโดยมีระดับน้ำสูงเหนืออุปกรณ์ทดสอบ 1 เมตร เป็นเวลา 30 นาที จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีน้ำและหรือความชื้นแทรกซึมเข้าไปในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำครั้งนี้เพื่อตรวจสอบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านั้นยังคงมีคุณสมบัติเชิงสมรรถนะเหมาะสมกับการใช้งานอยู่หรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาวิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำหลังน้ำลดตามมาตรฐาน IEC61215, IEC61646, IEC62446, IP67

1.2.2 เพื่อทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำหาคุณสมบัติเชิงสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำท่วมเป็นเวลา 5 – 12 วัน เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 หาวิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำหลังน้ำลดตามมาตรฐาน IEC61215, IEC61646, IEC62446, IP67

1.4.2 ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อหาคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำภายในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

1.4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ศึกษาการแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.5.3 วางแผนกระบวนการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.5.4 รวบรวมและจัดเก็บข้อมูลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.5.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.5.6 สรุปและอภิปรายผล

1.5.7 จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้ทราบกระบวนการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อหาคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.6.2 ทำให้ทราบผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่

1.6.3 เป็นข้อมูลอ้างอิงในการพิจารณาผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่าเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์อยู่หรือไม่



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

จากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการลดลงเรื่อย ๆ จากการทบทวนบทความต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการลดลงเฉลี่ย 1% ต่อปีด้วยหลายปัจจัย การลอกถ่อนของ อีวีเอ การเสื่อมสภาพของแผ่นปิดด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การซึมจากของเหลวเข้าไปภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอายุการใช้งานเฉลี่ยจะอยู่ที่ 25-30 ปี อายุการใช้งานของอินเวอร์เตอร์เฉลี่ยอยู่ที่ 15-20 ปี อายุการใช้งานของโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 30-60 ปี อายุการใช้งานของสายไฟฟ้าชนิดต่างๆเฉลี่ยอยู่ที่ 25-30 ปี จากการสืบค้นงานวิจัยย้อนหลังพบว่าการลดลงของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลง 10% ต่อปี ในปี 1991 และเนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและการวิจัยที่มีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเนื่องมาจึงมีการลดลงของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 12% ต่อปี ในปี 2000 จากการวิเคราะห์พบว่าเทคโนโลยียังมีความก้าวหน้ามากเท่าใด การลดลงของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะลดน้อยลงและกำลังการผลิตต่อตารางเมตรจะยิ่งเพิ่มขึ้นตามเทคโนโลยี เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินขนาด 36 MW ในพื้นที่จังหวัดสระแก้วเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมจากภัยธรรมชาติ จึงค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินเพื่อให้มีความเข้าใจในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการลดลงของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีทฤษฎีและวรรณกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้

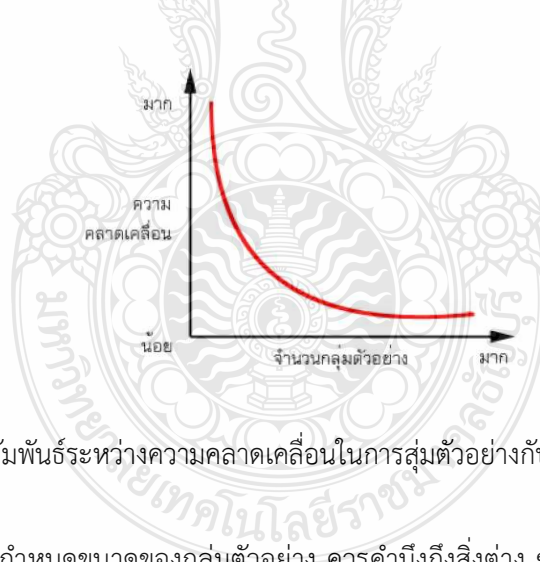
2.2 ทฤษฎีรังสีดวงอาทิตย์

รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation) หมายถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งคนทั่วไปมักเรียกกันว่า แสงอาทิตย์ แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวไม่ได้มีเฉพาะแสงสว่างเท่านั้น หากยังมีรังสีอื่นๆอีกด้วย อีกด้วยดังนั้นทางวิชาการจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ว่า รังสีอาทิตย์ เนื่องจากความรู้ด้านรังสีอาทิตย์มีความสำคัญต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมาก จึงทำการค้นคว้าเรื่องรังสีอาทิตย์ เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีรังสีอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น รังสีดวงอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 10^{-3} ไมครอน หรือช่วงความยาวคลื่นของรังสีแกมมาจนถึงความยาวคลื่นหลายกิโลเมตร ซึ่งเป็นช่วงของคลื่นวิทยุอย่างไร้

ตามพลังงานส่วนใหญ่ของรังสีอาทิตย์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3-3.0 ไมครอน ซึ่งจะเรียกว่ารังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (broadband solar radiation) ในการศึกษารังสีอาทิตย์สามารถแบ่งเป็นการศึกษารังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นกว้างและ การศึกษารังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด โดยรังสีในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่างสามารถแยกพิจารณาได้เป็นรังสีที่ ตามนุษย์ใช้ประโยชน์ในการมองเห็นหรือแสงสว่างธรรมชาติ และรังสีที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสง

2.3 การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อการวิจัย

กลุ่มตัวอย่าง (Sample group) หมายถึงบางส่วนของจำนวนทั้งหมดที่ถูกเลือกมาเป็นตัวแทนของจำนวนทั้งหมดที่ทำการศึกษา การใช้กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กจะทำให้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนมาก และการใช้ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่มีจำนวนมากจะมีความคลาดเคลื่อนน้อย เพราะขนาดกลุ่มตัวอย่างที่มีจำนวนมากจะให้ข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียง การคำนวณทางสถิติมีความถูกต้องมากกว่ากลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก กลุ่มตัวอย่างยิ่งจำนวนมาก ความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มจะมีค่าลดลงแต่ถ้าถึงจุดหนึ่งแม้ว่าจะเพิ่มจำนวนของกลุ่มตัวอย่างให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นอีก แต่ความคลาดเคลื่อนก็ลดลงได้ไม่มากนัก [1] ดังภาพที่ 1



รูปที่ 2.1 ภาพความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในการสุ่มตัวอย่างเป็นกับขนาดของกลุ่มตัวอย่าง [1]

2.3.1 การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ควรคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ หลายอย่างมาประกอบกัน [2] ดังนี้

2.3.1.1 ค่าใช้จ่าย เวลา แรงงานและเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างนั้น พอหรือไม่ และคุ้มค่าเพียงใด

2.3.1.2 ปริมาณของจำนวนทั้งหมด ถ้าปริมาณของจำนวนทั้งหมดมีมาก จำเป็นต้องเลือกกลุ่มตัวอย่าง ถ้าปริมาณของจำนวนทั้งหมดมีน้อย ควรศึกษาจากจำนวนทั้งหมดทั้งหมด

2.3.1.3 ความเหมือนกัน ถ้าจำนวนทั้งหมดมีความเหมือนกันมาก เช่น ระยะเวลาจมน้ำของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เท่ากันทั้งหมด หรือประเภทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมือนกันทั้งหมด ใช้กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กได้ แต่ถ้าจำนวนทั้งหมดมีความแตกต่างกัน เช่น ระยะเวลาจมน้ำของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระยะเวลาต่างกันมาก หรือประเภทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เหมือนกัน ความแปรปรวนจะมีมาก ต้องใช้กลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ขึ้น

2.3.1.4 ความแม่นยำชัดเจน ยิ่งขนาดกลุ่มตัวอย่างใหญ่มากเพียงใด ผลของการศึกษายิ่งแม่นยำมากเท่านั้น

2.3.1.5 ความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่าง มักจะยอมให้เกิดได้ 1% หรือ 5% (สัดส่วน 0.01 หรือ 0.05) และขึ้นอยู่กับความสำคัญของเรื่องที่ศึกษาด้วย ถ้าสำคัญมากให้มีความคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด

2.3.1.6 ความเชื่อมั่น ต้องกำหนดความเชื่อมั่นว่ากลุ่มตัวอย่างที่สุ่มมามีโอกาสได้ค่าอ้างอิงไม่แตกต่างจากค่าแท้จริงของจำนวนทั้งหมดเท่าไร

2.3.2 วิธีการกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง

วิธีการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างมีด้วยกันหลากหลายวิธี ในที่นี้จะเสนอการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการกำหนดเกณฑ์ การใช้สูตรคำนวณและการใช้ตารางสำเร็จรูป ซึ่งแต่ละวิธีสามารถกำหนดเกณฑ์ได้ต่อไปนี้

2.3.2.1 การกำหนดเกณฑ์

ในกรณีนี้ผู้วิจัยต้องทราบจำนวนประชากรที่แน่นอนก่อนแล้ว ใช้เกณฑ์โดยกำหนดเป็นร้อยละของประชากรในการพิจารณา ดังนี้ [2]

- 1) ถ้าจำนวนทั้งหมดเป็นหลักร้อยละ ควรใช้กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 25%
- 2) ถ้าจำนวนทั้งหมดเป็นหลักพัน ควรใช้กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 10%
- 3) ถ้าจำนวนทั้งหมดเป็นหลักหมื่น ควรใช้กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 5%
- 4) ถ้าจำนวนทั้งหมดเป็นหลักแสน ควรใช้กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 1%

2.3.2.2 การใช้ตารางสำเร็จรูป

การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างด้วยตารางสำเร็จรูป มีอยู่หลายประเภท ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้วิจัย ตารางสำเร็จรูปที่นิยมใช้กันในงานวิจัยเชิงสำรวจ ได้แก่ ตารางสำเร็จรูปของทาโร ยามาเน่ และตารางสำเร็จรูปของเครจซี่และมอร์แกน เป็นต้น

- 1) ตารางสำเร็จรูปของทาโร ยามาเน่ [3]

ตารางสำเร็จรูปของ ทาโร ยามาเน่ เป็น ตารางที่ใช้หาขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อประมาณค่าสัดส่วนของประชากร โดยคาดว่าสัดส่วนของลักษณะที่สนใจในประชากร

เท่ากับ 0.5 และระดับความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 1 วิธีการอ่านตารางผู้วิจัยจะต้องทราบขนาดของประชากร และกำหนดระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เช่น ต้องการหาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง จากประชากรที่มีขนาดเท่ากับ 2,000 คน ความคลาดเคลื่อนที่ผู้วิจัยยอมรับได้เท่ากับ 5% ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการจะเท่ากับ 333 คน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ขนาดของกลุ่มตัวอย่างของทาโร ยามาเน่ (Yamane) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และ ความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ [4]

ขนาด ประชากร	ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ระดับความคลาดเคลื่อน (e)					
	±1%	±2%	±3%	±4%	±5%	±10%
500	*	*	*	*	222	83
1,000	*	*	*	385	286	91
1,500	*	*	638	441	316	94
2,000	*	*	714	476	333	95
2,500	*	1,250	769	500	345	96
3,000	*	1,364	811	517	353	97
3,500	*	1,458	843	530	359	97
4,000	*	1,538	870	541	364	98
4,500	*	1,607	891	549	367	98
5,000	*	1,667	909	556	370	98
6,000	*	1,765	938	566	375	98
7,000	*	1,842	959	574	378	99
8,000	*	1,905	976	580	381	99
9,000	*	1,957	989	584	383	99
10,000	5,000	2,000	1,000	588	385	99
15,000	6,000	2,143	1,034	600	390	99
20,000	6,667	2,222	1,053	606	392	100
25,000	7,143	2,273	1,064	610	394	100
50,000	8,333	2,381	1,087	617	397	100
100,000	9,091	2,439	1,099	621	398	100
∞	10,000	2,500	1,111	625	400	100

2) ตารางสำเร็จรูปของเครจซี่และมอร์แกน [2]

ตารางสำเร็จรูปของเครจซี่และมอร์แกน สำหรับตารางของเครจซี่และมอร์แกน (Krejcie & Morgan) ตารางนี้ใช้ในการประมาณค่าสัดส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำ เช่นเดียวกันและกำหนดให้สัดส่วนของลักษณะที่สนใจในแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเท่ากับ 0.5 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 5% และค่าความเชื่อมั่น 95% สามารถคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำที่มีจำนวนได้ตั้งแต่ 10 ขึ้นไป ดังแสดงในตารางที่ 2.2 วิธีการอ่านตารางคือต้องทราบจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 ขนาดกลุ่มตัวอย่างของเครจซี่และมอร์แกน [5]

Population	Sampled population	Population	Sampled population	Population	Sampled population
10	10	220	140	1200	291
15	14	230	144	1300	297
20	19	240	148	1400	302
25	24	250	152	1500	306
30	28	260	155	1600	310
35	32	270	159	1700	313
40	36	280	162	1800	317
45	40	290	165	1900	320
50	44	300	169	2000	322
55	48	320	175	2200	327
60	52	340	181	2400	331
65	56	360	186	2600	335
70	59	380	191	2800	338
75	63	400	196	3000	341
80	66	420	201	3500	346
85	70	440	205	4000	351
90	73	460	210	4500	354
95	76	480	214	5000	357

ตารางที่ 2.2 ขนาดกลุ่มตัวอย่างของเครซี่และมอร์แกน (ต่อ) [5]

Population	Sampled population	Population	Sampled population	Population	Sampled population
100	80	500	217	6000	361
110	86	550	226	7000	364
120	92	600	234	8000	367
130	97	650	242	9000	368
140	103	700	248	10000	370
150	108	750	254	15000	375
160	113	800	260	20000	377
170	118	850	265	30000	379
180	123	900	269	40000	380
190	127	950	274	50000	381
200	132	1000	278	75000	382
210	136	1100	285	100000	384

สำหรับตารางของเครซี่และมอร์แกน Krejcie & Morgan ตารางนี้สามารถคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเล็กได้ตั้งแต่ 10 ขึ้นไป สัดส่วนของลักษณะที่สนใจในกลุ่มตัวอย่าง เท่ากับ 0.5 ระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 5% และระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยจะเป็นการหาจำนวนกลุ่มตัวอย่าง เพื่อประมาณค่าสัดส่วนการสุ่มหาตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำ

2.3.3 การใช้สูตรคำนวณ

2.3.3.1 กรณีทราบจำนวนทั้งหมด

1) สูตรของ ทาโร ยามาเน่ [4]

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2} \quad (2.1)$$

โดย

n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

N = ขนาดของประชากร

e = ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้

2) สูตรของ เครจซี่และมอร์แกน [5]

$$n = \frac{x^2 N p (1-p)}{e^2 (N-1) + x^2 p (1-p)} \quad (2.2)$$

โดย

- n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
 N = ขนาดของประชากร
 e = ระดับความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้
 X^2 = ไคสแควร์ที่ df เท่ากับ 1 และระดับความเชื่อมั่น 95% $X^2 = 3.841$
 p = สัดส่วนของลักษณะที่สนใจ (ถ้าไม่ทราบให้กำหนด $p = 0.5$)

2.3.2.2 กรณีไม่ทราบจำนวนทั้งหมด

1) สูตรของคอกแรน [6] ใช้ในกรณีที่ไม่ทราบจำนวนทั้งหมดที่แน่นอน แต่ทราบว่ามีจำนวนมากและต้องการประมาณค่าสัดส่วนของประชากรมี 2 กรณีคือ

กรณีทราบค่าสัดส่วนของประชากร

$$n = \frac{p(1-p)Z^2}{e^2} \quad (2.3)$$

กรณีไม่ทราบค่าสัดส่วนของประชากรหรือ $p = 0.5$

$$n = \frac{Z^2}{4e^2} \quad (2.4)$$

โดย

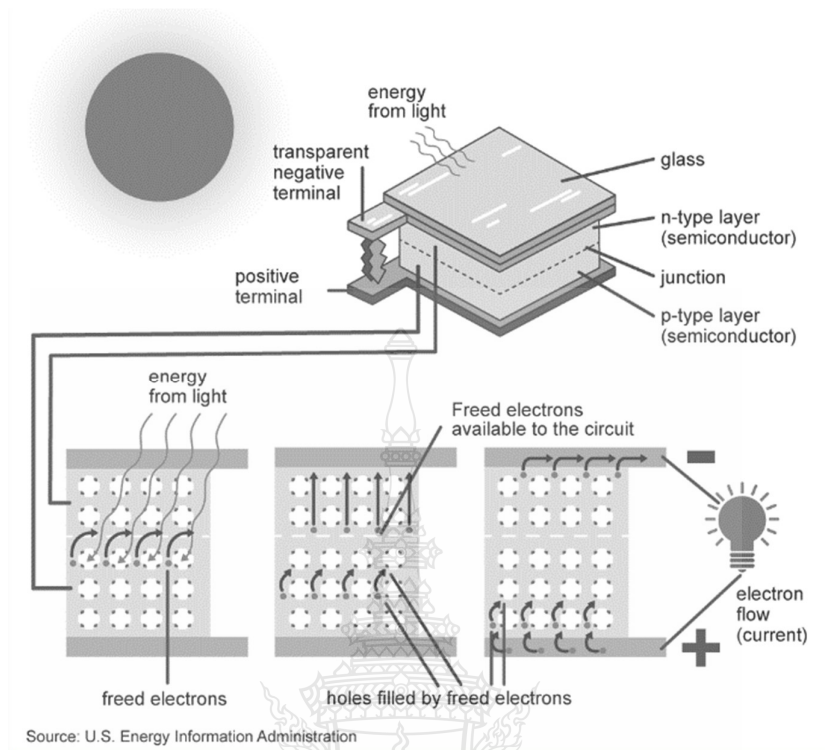
- n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
 p = สัดส่วนของลักษณะที่สนใจ
 e = ระดับความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้
 Z = ค่า Z ที่ระดับความเชื่อมั่นหรือระดับนัยสำคัญ

ถ้าระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 มีค่า $Z = 1.96$

ถ้าระดับความเชื่อมั่น 99% หรือระดับนัยสำคัญ 0.01 มีค่า $Z = 2.58$

2.4 หลักการทำงานและประเภทของระบบโซลาร์เซลล์

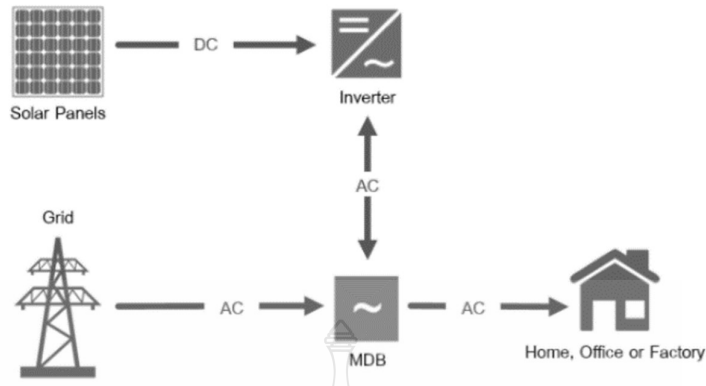
ในปัจจุบันมนุษย์ใช้ไฟฟ้าตามบ้านหรือโรงงานที่ได้รับมาจากแหล่งผลิตไฟฟ้าเช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (Electricity Generating Authority of Thailand) และส่งต่อการบริหารการจ่ายไฟฟ้าผ่านการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority) และการไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority) ซึ่งแหล่งพลังงานนั้นมีหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นจากก๊าซธรรมชาติ หรือจากแหล่งน้ำ เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงที่นำมาใช้และสามารถหมดไปได้ ซึ่งในหลาย ๆ ปีที่ผ่านมา มนุษย์เริ่มรู้จักระบบโซลาร์เซลล์ (Solar cell system) โดยอาจเรียกว่า Renewable energy เพราะเป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่สามารถใช้ได้ฟรี ไม่มีค่าต้นทุนเรื่องเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า และเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก โซลาร์เซลล์ (Solar cell) หรือ เซลล์โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ที่มีความสามารถในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวสารกึ่งตัวนำเพื่อเปลี่ยนมาเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) ซึ่งสามารถนำมาใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ดำเนินการต่อกับระบบโซลาร์เซลล์ได้ โดยหลักการทำงานของโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในแผงของโซลาร์เซลล์นั้น จะเริ่มต้นจากการที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบกับสารกึ่งตัวนำของโซลาร์เซลล์ โดยพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมตัวกันที่ขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และโฮลจะถูกเติมเต็มด้วยอิเล็กตรอนจากขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากกระบวนการนี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และสามารถนำไปใช้งานได้กับโหลดที่เชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้



รูปที่ 2.2 ภาพส่วนประกอบภายในของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [7]

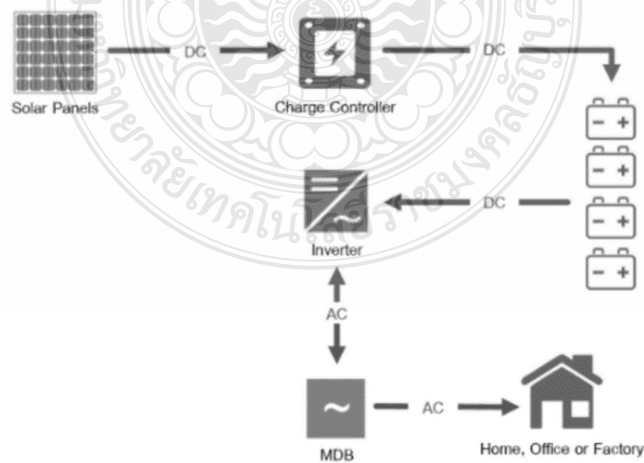
ประเภทของระบบโซลาร์เซลล์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจะมี 3 ระบบ

2.4.1 ระบบโซลาร์เซลล์แบบ On grid เป็นการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ที่มีการเชื่อมต่อกับ Grid หรือระบบไฟฟ้าของภูมิภาคหรือไฟฟ้านครหลวง ซึ่งระบบที่นิยมและค่าใช้จ่ายไม่สูง เนื่องจากระบบนี้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ Battery ในการสำรองไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ โดยรูปแบบการต่อแผงโซลาร์เซลล์จะได้ไฟฟ้ากระแสตรงมา ดำเนินการต่อผ่าน Inverter เพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ เพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อไปในบ้านหรือโรงงาน แต่ที่ Inverter นั้นจะมีการต่อกับ Grid ของการไฟฟ้า นั้นหมายความว่าพลังงานที่โซลาร์เซลล์ผลิตได้เพียงพอกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านหรือโรงงานต้องการ ก็จะไม่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าจาก Grid ของการไฟฟ้า ในทางกลับกัน ถ้าไม่เพียงพอระบบจะทำการดึงไฟฟ้าจากการไฟฟ้ามาช่วยจ่ายให้ได้โดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามระบบนี้แม้จะประหยัดเงินลงทุน แต่จะสามารถใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจากโซลาร์เซลล์ได้เพียงช่วงเวลากลางวัน หรือวันที่แดดแรงเท่านั้น และในระหว่างวันโซลาร์เซลล์อาจจะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ จะต้องมีการนำดึงไฟฟ้าจากการไฟฟ้ามาจ่ายให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านและโรงงาน



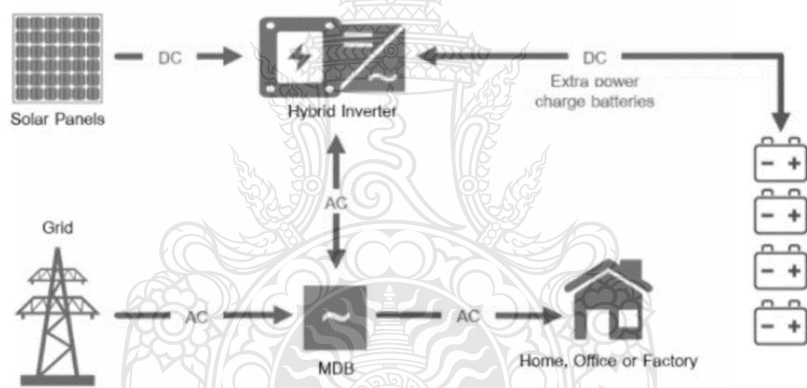
รูปที่ 2.3 ภาพการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์แบบ On grid [31]

2.4.2 ระบบโซลาร์เซลล์แบบ Off grid ระบบโซลาร์เซลล์ที่ออกแบบมาเป็นแบบ Off grid นั้นจะคล้ายๆ กับ On grid แต่จะแตกต่างกันตรงที่จะไม่มีการเชื่อมต่อกับ Grid ของการไฟฟ้า และมีการติดตั้ง Battery เข้าไปเพื่อเป็นพลังงานสำรองของโซลาร์เซลล์ นั่นก็หมายความว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านและโรงงานนั้นจะรับไฟฟ้าผ่านโซลาร์เซลล์อย่างเดียว โดยจะไม่มีการรับไฟฟ้าจากทางการไฟฟ้าอย่าง PEA หรือ MEA ซึ่งในระบบนี้นั้นค่าใช้จ่ายจะสูงกว่าแบบ On grid เนื่องจากมีเงินลงทุนของ Battery รวมไปถึงค่าบำรุงรักษา และการออกแบบจะต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษเพราะจะต้องออกแบบให้ครอบคลุมไปถึงช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด เช่น กลางคืน หรือ แสงแดดไม่จัด ซึ่งจะทำให้เรื่องของความเสถียรหรือความต่อเนื่องของการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ อาจจะไม่เพียงพอได้ในบางช่วงเวลา



รูปที่ 2.4 ภาพการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์แบบ Off grid [31]

2.4.3 ระบบโซลาร์เซลล์แบบ Hybrid เป็นระบบโซลาร์เซลล์ที่เอาข้อดีของทั้ง 2 ระบบ คือ On grid และ Off grid มาประยุกต์เข้าด้วยกัน คือสามารถใช้ไฟฟ้าได้ทุกช่วงเวลาไม่ว่าจะเป็นช่วงแสงแดดแรงหรือแดดอ่อน แม้กระทั่งช่วงเวลากลางคืนนั้นก็ยังคงสามารถใช้ไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยแบ่งการใช้ไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาดังนี้ ในช่วงเวลากลางวัน จะใช้ไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์เป็นหลัก ถ้าไฟฟ้าไม่เพียงพอจะมีการรับไฟฟ้าส่วนที่ขาดมาจากการไฟฟ้าอย่าง PEA หรือ MEA มาช่วย ในช่วงเวลากลางคืน จะใช้ไฟฟ้าจาก Battery ที่เก็บสำรองไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ และรับไฟฟ้าจากการไฟฟ้าอย่าง PEA และ MEA เข้ามาช่วยจ่ายอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างไรก็ตามระบบนี้ความเสถียรภาพของไฟฟ้านั้นสูง แต่เงินลงทุนก็จะสูงตามไปด้วย ระบบโซลาร์เซลล์ (SOLAR CELL SYSTEM) นั้นเป็นพลังงานสะอาดและฟรีที่เราสามารถเอามาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ที่สามารถช่วยประหยัดเงินในกระเป๋า และทำการลด CO² ที่จะต้องปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศได้ด้วย สามารถเลือกพิจารณาว่าระบบไหนเหมาะสมกับที่บ้านหรือโรงงาน โดยคำนึงถึงงบประมาณและจุดคุ้มทุน

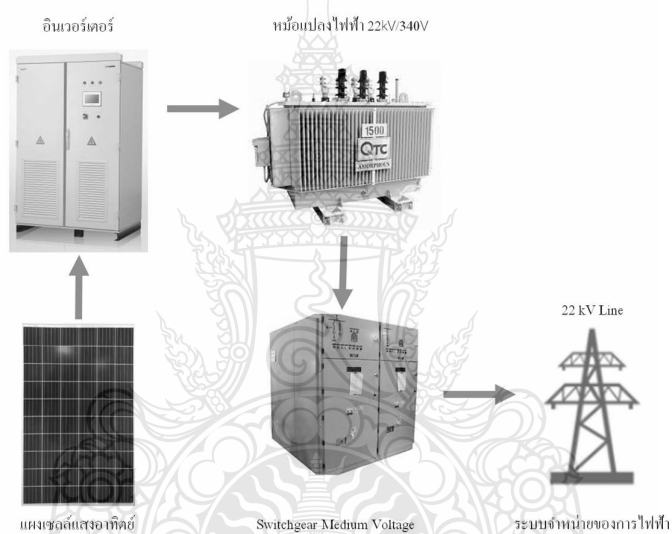


รูปที่ 2.5 ภาพการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์แบบ Hybrid [31]

2.5 หลักการของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน

2.5.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้า เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์มีโฟตอนมากระทบกับอิลีกตรอนรอบนอกฝั่ง N Type จะเกิดการเป็นอิลีกตรอนอิสระและอิลีกตรอนอิสระจะวิ่งไปหาฝั่ง P Type เนื่องระหว่าง N Type และ P Type จะมี PN Junction คั่นกลางไว้ อิลีกตรอนจากฝั่ง N Type จึงพยายามวิ่งผ่านสวจรและสายไฟที่เชื่อมต่อไว้จึงเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้โดยกระแสไฟฟ้าจะไปที่อุปกรณ์อินเวอร์เตอร์แล้ววนกลับมาที่ฝั่ง P Type

2.5.2 อุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้า, Switchgear และระบบ Protection หลังจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ การทำงานของอินเวอร์เตอร์คือจะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอินเวอร์เตอร์แบบออนกริดจะต้องมีไฟฟ้าที่มาจากทางด้านที่เชื่อมต่อคือด้านกริดหรือการไฟฟ้าและต้องมีกระแสไฟฟ้ามาจากทางด้านที่ผลิตไฟฟ้าหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์อินเวอร์เตอร์จะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยอุปกรณ์ และจะส่งกระแสไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้ตรงกับระดับแรงดันที่เชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าโดยมี Switchgear ในการเชื่อมต่อและมีระบบ Protection ตาม Grid code ของการไฟฟ้า



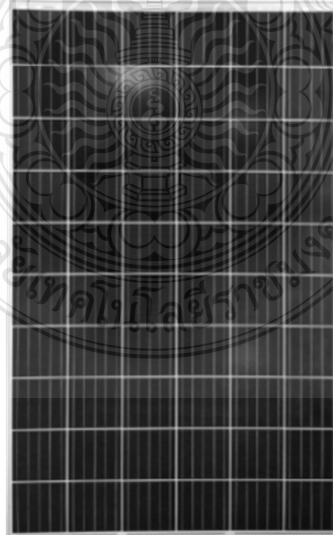
รูปที่ 2.6 ภาพวงจรระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า [36]

2.6 ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Standalone system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกรออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง

หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกรออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ ในที่นี้จะพูดถึงโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย โดยจะเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 22 kV

2.6.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอนมาผ่าน กระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตเป็นแผ่นซิลิกอนบริสุทธิ์และเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์รังสี ของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่าโฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้น เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจร จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาหลักการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน



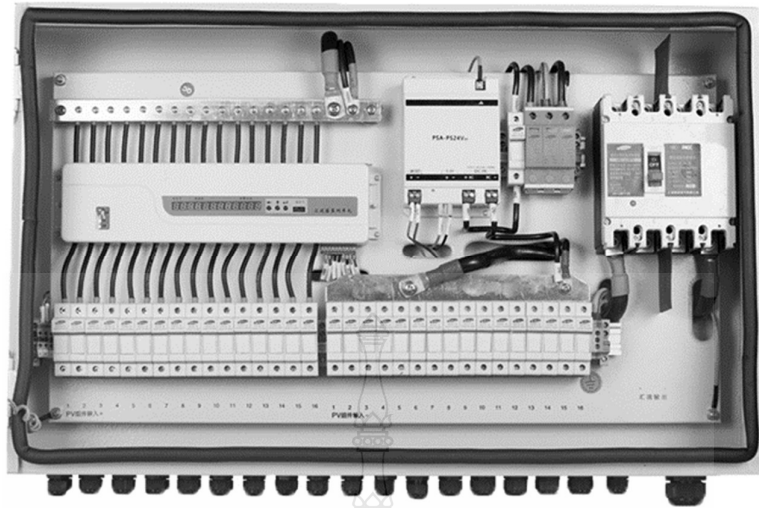
รูปที่ 2.7 ภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน [38]

2.6.2 โครงสร้างสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุโครงสร้างแบบโลหะปลอดสนิม เช่น อลูมิเนียม(Aluminum) สแตนเลส (Stainless steel) หรือเป็นเหล็กเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanizing) ตามมาตรฐาน ASTM สามารถถอดออกเป็นชิ้นส่วน และประกอบได้อย่างสะดวก มีขนาดที่เหมาะสม สามารถติดตั้งแผงได้อย่างมั่นคง แข็งแรง สามารถรับน้ำหนัก และสามารถต้านทานแรงลมปะทะ ไม่น้อยกว่าความเร็วสูงสุด ของพายุโซนร้อน (Tropical storm) ได้อย่างปลอดภัย มาตรฐานสากล อายุการใช้งานนานกว่า 25 ปี



รูปที่ 2.8 ภาพโครงสร้างสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [32]

2.6.3 กล่องรวมสาย (Combiner box) คือจุดรวมสายไฟฟ้ากระแสตรงที่มาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆสตริง ภายในจะมีอุปกรณ์ DC Breaker DC Fuse Surge Protection อุปกรณ์ตรวจวัดกำลังไฟฟ้าเพื่อส่งสัญญาณมาแสดงที่อาคารควบคุมหลัก



รูปที่ 2.9 ภาพกล่องรวมสายไฟฟ้ากระแสตรง (Combiner box) [33]

2.6.4 อุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า (Grid connected inverter) กริดไท อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า สำหรับแปลงระบบไฟ จากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ได้รับมาจากแผงโซลาร์เซลล์ ให้กลายเป็นไฟกระแสสลับ (AC) 220V / 1 เฟส (2 สาย) สำหรับไฟบ้านทั่วไป หรือแปลงระบบไฟแบบ 380V / 3 เฟส สำหรับโรงงานหรือสถานที่ใช้ไฟ 3 เฟส กริดไท อินเวอร์เตอร์ สามารถปรับขนาดของแรงดันและความถี่ จึงสามารถเชื่อมต่อกับเมนไฟบ้าน ร่วมกับสายส่งของการไฟฟ้า และเพื่อความปลอดภัย ในระยะยาว ควรติดตั้งภายในอาคาร ในตัวบ้าน หรือโรงจอดรถ ในร่ม ไม่ถูกแดด หรือฝน กริดไท อินเวอร์เตอร์ จะทำงานเมื่อมีไฟจากแผงโซลาร์เซลล์ และมีไฟจากการไฟฟ้ามาเลี้ยง จะหยุดการทำงานหากเป็นตอนกลางคืน หรือไฟจากการไฟฟ้าดับ มาตรฐานสากล การรับประกัน 5 ปี ไม่รับประกัน หากฟ้าผ่า ไฟกระชาก หรือต่อสายผิด



รูปที่ 2.10 ภาพอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้า (Grid connected inverter) [34]

2.6.5 ข้อต่อสายไฟ MC4 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายไฟฟ้ากระแสตรง ที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วต่อสายไฟของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และสายไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อไปยังกล่องรวมสายไฟฟ้ากระแสตรง โดยขั้วต่อสายไฟต้องมีมาตรฐานสากล กันน้ำฝน ถอดประกอบสะดวก สำหรับงานโซลาร์เซลล์โดยเฉพาะ รองรับสายไฟขนาด 2.5 ตาราง มม. ถึง 6 ตาราง มม.



รูปที่ 2.11 ข้อต่อสายไฟฟ้ากระแสตรง MC4 [35]

2.6.6 หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้ในการถ่ายโอนพลังงานในรูปแบบไฟฟ้าระหว่างสองหรือจำนวนของวงจร หน้าที่หลักของหม้อแปลงคือการเปลี่ยนกระแสสลับจากแรงดันไฟฟ้าหนึ่งไปเป็นแรงดันไฟฟ้าอื่น หม้อแปลงไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวและทำงานบนหลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก การออกแบบหม้อแปลง เป็นส่วนใหญ่สำหรับขั้นตอนขึ้นหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า สิ่งเหล่านี้

ส่วนใหญ่มีให้เลือกสองประเภทตามขดลวดคือชั้นตอนขึ้นและชั้นลงหม้อแปลง วัตถุประสงค์ของหม้อแปลงแบบ step-up คือการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ฟังก์ชัน step-down transformer คือการลดแรงดันไฟฟ้าลง หม้อแปลง การกำหนดขนาดของหม้อแปลงสามารถทำได้ตามข้อกำหนดเช่น VA หรือ KVA หรือ MVA หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยการรักษากระแสไฟฟ้าให้คงที่โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เรียกว่าหม้อแปลงแบบ step-up หม้อแปลงชนิดนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในการใช้งานสถานีส่งกำลังและสถานีผลิตไฟฟ้า หม้อแปลงนี้มีสองตัว ขดลวด คือขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ขดลวดปฐมภูมิมีรอบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับขดลวดทุติยภูมิ การออกแบบแกนในหม้อแปลงทำได้โดยใช้วัสดุที่ซึมผ่านได้สูง วัสดุหลักนี้ช่วยให้ฟลักซ์แม่เหล็กไหลโดยมีการสูญเสียน้อยลง วัสดุของแกนกลางมีความสามารถในการซึมผ่านสูงเมื่อเทียบกับอากาศในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นวัสดุแกนนี้จะจำกัดเส้นสนามแม่เหล็กภายในวัสดุหลัก ดังนั้นประสิทธิภาพของหม้อแปลงสามารถเพิ่มได้โดยการลดการสูญเสียหม้อแปลง แกนแม่เหล็กช่วยให้ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านพวกเขาและยังนำไปสู่การสูญเสียในแกนกลาง เช่นการสูญเสียกระแสเนื่องจากฮิสเทรีซิส ดังนั้นวัสดุ hysteresis และวัสดุที่มีการแข็งตัวต่ำจึงถูกเลือกเพื่อให้แกนแม่เหล็กคล้ายกับเหล็กเฟอร์ไรต์หรือซิลิกอน เพื่อให้การสูญเสียกระแสอยู่ในระดับต่ำสุดสามารถเคลือบแกนหม้อแปลงเพื่อป้องกันความร้อนของแกนได้ เมื่อแกนถูกให้ความร้อนจะมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลงลดลง ขดลวดในหม้อแปลงแบบ step-up จะช่วยในการส่งกระแสไฟฟ้าที่ในหม้อแปลง ขดลวดเหล่านี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้หม้อแปลงเย็นและต้านทานเงื่อนไขการทดสอบและการใช้งานเป็นหลัก ความหนาแน่นของเส้นลวดที่ด้านขดลวดปฐมภูมิมิมีความหนา แต่มีจำนวนรอบน้อยกว่า ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของเส้นลวดที่ขดลวดทุติยภูมิจะบางแต่จะมีจำนวนรอบมาก การออกแบบนี้สามารถทำได้เช่นขดลวดปฐมภูมิมิแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 2.12 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) [36]

2.6.7 อุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า (Switch gear) ระบบการจ่ายไฟฟ้าดั้งเดิมเริ่มขึ้นจากการกระจุกตัวภายในเมือง การจ่ายไฟฟ้าเริ่มจากแรงดันไฟฟ้าต่ำ 110-220 Volt เมื่อมีการขยายตัวสูงขึ้นของการใช้ไฟฟ้า ระยะทางการจ่ายไฟฟ้าเริ่มไกลออกไป แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจึงต้องเพิ่มขึ้นเพื่อลดกระแสในสายไฟฟ้า เป็นการลดการสูญเสียพลังงานในสายไฟฟ้าและลดปัญหาเรื่องแรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเข้าสู่ระบบแรงดันปานกลาง (Medium Voltage) 3 kV ถึง 33 kV ไปจนถึงระดับแรงสูง (High Voltage) 69 kV ถึง 230 kV และปัจจุบันเข้าสู่ระดับสูงพิเศษ (Extra High or Ultra High Voltage) ที่ระดับแรงดัน 500 kV ในอุปกรณ์กรตัดตอนไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้ จะมีระดับแรงดันอยู่ที่ 22 kV โดยภายในจะมีอุปกรณ์ต่างๆ เช่น Relay protection, Current transformer, Potential transformer, Vacuum Circuit Breaker (VCB) โดยหลักจะมีการตรวจสอบความผิดปกติต่างๆ ในระบบไฟฟ้าเพื่อตัดการเชื่อมต่อระหว่างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า (Switch gear) [37]

2.7 ข้อกำหนดสำหรับส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ส่วนประกอบทุกตัวต้องมีมาตรฐานอุปกรณ์และการติดตั้ง [8] มีพิกัดใช้งานสำหรับไฟฟ้ากระแสตรง ต้องมีพิกัดกระแสเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ต้องมีแรงดันพิกัดเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันสูงสุดของ PV_{ARRAY} แรงดันสูงสุดของ PV_{ARRAY} ถูกพิจารณาให้มีค่าเท่ากับ $V_{OC ARRAY}$ ที่ปรับแก้สำหรับอุณหภูมิทำงานคาดว่าต่ำสุด

$$PV_{ARRAY} = V_{OC_{ARRAY}} + \gamma v(T_{min} - T_{STC})M \quad (2.5)$$

โดย

$V_{OC_{ARRAY}}$ คือ แรงดันเปิดวงจร ณ ภาวะทดสอบมาตรฐาน (หน่วยเป็นโวลต์)

γv คือ สัมประสิทธิ์แรงดันอุณหภูมิ ($V/^{\circ}C / module$) ที่ผู้ผลิตระบุ (มีค่าเป็นลบสำหรับชนิดผลึกซิลิกอน)

T_{min} คือ อุณหภูมิที่ต่ำสุดของวันตลอดทั้งปีของเซลล์ (หน่วยเป็นองศาเซลเซียส)

T_{STC} คือ อุณหภูมิของเซลล์ ณ ภาวะทดสอบมาตรฐาน (หน่วยเป็นองศาเซลเซียส)

M คือ จำนวนการต่ออนุกรมของ PV Module ในแถว

ตารางที่ 2.3 ค่าปรับแก้แรงดันสำหรับ PV Module ชนิดผลึกซิลิกอนและ ชนิดหลายผลึก

อุณหภูมิที่คาดว่าต่ำสุด (องศาเซลเซียส)	ค่าปรับแก้
24 ถึง 20	1.02
19 ถึง 15	1.04
14 ถึง 10	1.06
9 ถึง 5	1.08
4 ถึง 0	1.10
-1 ถึง -5	1.12
-6 ถึง -10	1.14
-11 ถึง -15	1.16
-16 ถึง -20	1.18
-21 ถึง -25	1.20
-26 ถึง -30	1.21
-31 ถึง -35	1.23
-36 ถึง -40	1.25

2.7.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนต้องเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1843 หรือเทียบเท่า และ PV Module แบบฟิล์มบางต้องเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.2210 หรือ

เทียบเท่า ระบบที่มีแรงดันกระแสตรงเกิน 50 โวลต์ ต้อง มีไดโอดลัดข้าม เว้นแต่ว่าผู้ผลิต PV Module จะระบุไม่ให้ใช้ไดโอดลัดข้าม ถ้า PV Module ไม่มีไดโอดลัดข้ามอยู่ ภายใน จำเป็นต้องติดตั้งไดโอดลัดข้ามภายนอกอย่างน้อยมอดูลละ 1 ตัว PV Module ที่มีอินเวอร์เตอร์รวมอยู่ในแผงต้องเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1843, มอก. 2210 หรือเทียบเท่า ตามวัสดุของ PV Module ที่นำมาใช้

2.7.2 PV Array และ อุปกรณ์ PV อุปกรณ์ทุกตัวที่ติดตั้งภายนอกอาคารต้องมีการป้องกัน IP 54 เป็นอย่างน้อย ตามมาตรฐาน มอก.513 และต้องเป็นแบบทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต หมายเหตุ : เมื่อใช้ในเขตมรสุม ควรพิจารณาค่า IP ที่สูงกว่านี้ กล้องต่อสายและกล่องรวมสายที่ต่อถัดจาก PV Array ในบริเวณที่อาจจะได้รับผลกระทบจากการฉีดย้ำน้ำ เพื่อทำความสะอาด PV Array ควรมีการป้องกัน IP 55 เครื่องห่อหุ้มทุกชิ้นต้องมีพิกัด IP ที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อม ค่าพิกัด IP นี้ ต้องเหมาะสมสำหรับตำแหน่งของการติดตั้ง ควรใช้ค่าพิกัด IP สำหรับการติดตั้งในแนวตั้ง เว้นเสียแต่ว่าผู้ผลิตระบุเป็นอย่างอื่น บานพับต่างๆ และฝาปิดของเครื่องห่อหุ้มควรปิดกลับได้โดยอัตโนมัติเมื่อออกจากตำแหน่งเปิด เช่น ใช้แรงของสปริงเพื่อป้องกันการเปิดทิ้งไว้โดยไม่เจตนา และยังคงระดับการป้องกันตามพิกัด IP ที่กำหนด การต่อสายไฟและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ท่อสายไฟ/เบลีอกสายไฟ จะต้องรักษาระดับการป้องกัน IP ถ้าไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดในคู่มือของผู้ผลิตอุปกรณ์หรือเครื่องห่อหุ้ม อาจจะทำให้เกิดความชื้นเข้าไปสร้างความเสียหาย และเกิดไฟดูด หรือเกิดเพลิงไหม้ การติดตั้งต้องเป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิต

2.7.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ป้องกันกระแสเกินใน PV Array ต้องผ่านมาตรฐาน IEC 60947-2 ต้องไม่เป็นแบบป้องกันการกลับขั้ว (Polarity Sensitive) พิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องมีพิกัดตัดกระแสโหลดเต็มที และกระแสไฟฟ้าผิดพ้องของ PV Array และอุปกรณ์แหล่งกำเนิดอื่นๆ (ที่ถูกต้อง) เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ระบบไฟฟ้า (ถ้ามี)

2.7.4 อุปกรณ์ตัดต่อวงจร อุปกรณ์ตัดต่อวงจรทุกตัวต้องมีเครื่องห่อหุ้มและการกันส่วนที่มีไฟฟ้า ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะปิดหรือเปิดวงจร และต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60947-1 , 60947-3 และต้องมีกลไกที่ทำงานด้วยมือแยกอิสระ อุปกรณ์ตัดต่อวงจรหรือสวิตช์ตัดต่อวงจรต้องมีพิกัดกระแสเท่ากับหรือมากกว่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในกรณีที่ไม่ใช่มีอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน อุปกรณ์ตัดต่อวงจรหรือสวิตช์ตัดต่อวงจรต้องมีพิกัดกระแส เท่ากับหรือมากกว่าค่าต่ำสุดของความสามารถในการนำกระแสของวงจร สวิตช์ตัดต่อวงจรต้องผ่านมาตรฐานข้อกำหนดของ IEC 60947 และต้องมีกลไกที่เป็นแบบการทำงานด้วยมือแบบกึ่งเป็นอิสระหรือการทำงานด้วยมือที่เป็นอิสระ สวิตช์ตัดต่อวงจรและอุปกรณ์ตัดวงจรขณะมีโหลด ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ของการป้องกันหรือตัดวงจรต้องไม่เป็นแบบป้องกันการกลับขั้ว (Polarity Sensitive) ต้องตัดวงจรในตัวนำที่นำกระแสพร้อมกัน ต้องป้องกันไม่ให้มีการเปิดโดยผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องสำหรับสถานที่ที่ไม่ใช่บ้านพักอาศัย สวิตช์ตัดต่อวงจรของ PV Array ต้องตัดวงจรของตัวนำทั้งหมด (รวมถึงตัวนำสายดินที่ต่อลงดินตามหน้าที่) โดยตัวนำสายดินที่ต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย

ต้องไม่ถูกตัดวงจร ตัวตัดวงจรชนิดพ่วงลงดินที่ติดตั้งทางด้านกระแสตรง ต้องทำหน้าที่ตัดวงจรชนิดพ่วงลงดินให้กับ PV Array เมื่อกระแสในตัวนำสายดินเพิ่มมากกว่าค่าพิกัดของตัวตัดวงจรชนิดพ่วงลงดิน สวิตช์หรืออุปกรณ์ตัดวงจร ต้องติดตั้งระหว่าง PV Array และจุดต่อลงดินของ PV Array โดยอาจทำงานร่วมกับอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ตัดวงจรขณะเกิดความผิดปกติพ่วงลงดินต้องสามารถตัดกระแสชนิดพ่วง ที่มากที่สุดจาก PV Array ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของ PV Array สวิตช์หรืออุปกรณ์ตัดวงจรของจุดต่อลงดินตามหน้าที่จะต้องไม่ทำให้ตัวนำสายดินที่ต่อลงดินเพื่อความปลอดภัยถูกตัดวงจร

2.7.5 สายเคเบิล ขนาดของเคเบิลสำหรับเคเบิลของ PV String เคเบิลของ PV Sub-array และ เคเบิลของ PV Array ต้องพิจารณา พิกัดป้องกันกระแสเกิน ค่ากระแสทำงานปกติสูงสุด แรงดันตก และกระแสชนิดพ่วง โดยเลือกใช้ขนาดสายใหญ่ที่สุดที่ได้จากเงื่อนไขข้างต้น เคเบิลขนาดเล็กที่สุดสำหรับสายไฟของ PV Array จะต้องมาจากพิกัดกระแสที่ได้จากการคำนวณ อินเวอร์เตอร์บางตัว หรือ อุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า อาจสามารถป้องกันกระแสย้อนกลับเข้าสู่ PV Array ภายใต้ภาวะผิดปกติของกระแสย้อนกลับนี้ต้องถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณพิกัดกระแสของวงจรเคเบิลที่ใช้ใน PV Array ต้องมีพิกัดอุณหภูมิที่เหมาะสมตามลักษณะการใช้งาน ถ้าต้องอยู่กับสิ่งแวดล้อมภายนอกต้องเป็นแบบทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต หรือ ได้รับการป้องกันจากแสงอัลตราไวโอเลตด้วยวิธีการที่เหมาะสม หรือ ต้องติดตั้งอยู่ในท่อที่มีการป้องกันรังสี อัลตราไวโอเลต ต้องยึดหยุน (สายตีเกลียวหลายเส้น) เพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของ PV Array / PV Module เนื่องจากความร้อนหรือลม ต้องไม่ลามไฟ ตามมาตรฐาน IEC 60332-1-3 ต้องกันน้ำได้ สำหรับเคเบิลแฉกแรงดันต่ำในทุกระบบ ควรเป็นไปตามข้อกำหนด PV1-F ตาม TUV 2 PfG 1169 หรือ UL 4703 หรือ VDE-AR-E 2283-4 สำหรับระบบแรงดันต่ำควรใช้ทองแดงชุบดีบุกเพื่อลดการเกิดออกไซด์ของเคเบิล เคเบิลในทุกระบบต้องเลือกที่เหมาะสมเพื่อลดความเสี่ยงการลัดวงจรลงดินและการลัดวงจรให้ต่ำที่สุด เคเบิลต้องมีโครงสร้างมารับเพื่อทำให้เคเบิลไม่เกิดความเสียหายจากผลกระทบจากลมหรือสภาพแวดล้อมอื่นที่รุนแรงเคเบิลต้องมีการกำหนดแนวเดินสายมีโครงสร้างรองรับหรืออยู่ในท่อตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย ช่องเดินสายและท่อที่อยู่บนหลังคา หรือพื้นต้องไม่ขัดขวางทางเดินของน้ำ หรือเป็นแหล่งสะสมฝุ่นละออง เคเบิลต้องถูกป้องกันจากรอยขีดข่วน ความเครียดทางกล แรงกด และแรงตัดเฉือน ซึ่งอาจเกิดขึ้น จากวัฏจักรความร้อน ลม และแรงอื่น ๆ ในขณะการติดตั้งและตลอดอายุการใช้งาน ท่อและช่องเดินสายทั้งหมดที่โดนแสงแดดต้องเป็นแบบที่ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต เข็มขัดรัดสายเคเบิลต้องไม่เป็นวิธีการหลักในการรองรับเคเบิล เว้นเสียแต่ว่าเข็มขัดรัดสายเคเบิลนี้มี อายุยาวนานกว่าหรือเท่ากับ อายุของระบบ เคเบิลของ PV Array ภายในอาคาร ต้องมีความเสี่ยงในการเกิดการลัดวงจรต่ำที่สุด และต้องมีเครื่องท้อหุ้ม เช่น เดินในท่อร้อยสาย เป็นต้น

2.7.6 ตัวเชื่อมต่อ ตัวเชื่อมต่อต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62852 ต้องป้องกันการสัมผัส ส่วนที่มีไฟฟ้า ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะต่อไฟหรือไม่ต่อไฟ มีพิกัดกระแสเท่ากับหรือมากกว่าความสามารถในการนำกระแสสำหรับวงจรที่อุปกรณ์เหล่านี้ติดตั้งอยู่ สามารถที่จะรองรับเคเบิลที่ใช้ในวงจรได้ ต้องใช้แรงเพื่อที่จะแยกเคเบิลออก มีพิกัดอุณหภูมิที่เหมาะสมกับสถานที่ที่ทำการติดตั้ง ถ้าเป็นแบบหลายขั้ว ต้องเป็นแบบมีขั้ว ต้องเป็นไปตาม Class II สำหรับระบบที่ทำงานภายใต้แรงดันสูงกว่าแรงดันต่ำพิเศษ ถ้าต้องสัมผัสสภาพแวดล้อมภายนอก ต้องเป็นแบบใช้งานภายนอกอาคารเป็นแบบที่ทนต่อรังสี อัลตราไวโอเล็ต และต้องมีพิกัด IP ที่เหมาะสมกับสถานที่ใช้งาน ต้องติดตั้งเพื่อที่จะลดความเครียดบนตัวเชื่อมต่อ เช่น การรองรับเคเบิลทั้งสองด้านของตัวเชื่อมต่อ ควรใช้อุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะเดียวกัน หรือรุ่นเดียวกัน

2.7.7 พิวส์ พิวส์ที่ใช้ใน PV Array ต้องเป็นพิกัดใช้งานแบบกระแสตรง มีพิกัดแรงดันเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันสูงสุดของ PV Array มีพิกัดตัดกระแสผิดพลาดพร่องจาก PV Array และแหล่งกำเนิดอื่นๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้า (ถ้ามี) มีอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและกระแสลัดวงจรแบบที่เหมาะสมกับ PV ตามมาตรฐาน IEC 60269-6 ขั้วรับพิวส์ ต้องมีพิกัดแรงดันเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันสูงสุดของ PV Array มีพิกัดกระแสเท่ากับหรือมากกว่าพิกัดของพิวส์ที่ใช้งาน มีการป้องกันที่เหมาะสมกับสถานที่ และต้องไม่น้อยกว่า IP 2X ถึงแม้ว่าพิวส์จะถูกนำออกไปแล้ว

2.7.8 ไดโอดลัดข้าม ไดโอดลัดข้ามอาจถูกใช้เพื่อป้องกัน PV Module จากการย้อนกลับและความร้อนจากจุดร้อน (Hot Spot Heating) เมื่อไดโอดลัดข้ามภายนอกถูกใช้งาน และไม่ได้ติดตั้งอยู่ใน PV Module ไดโอดลัดข้ามต้องทำงานภายใต้ สภาวะแวดล้อมที่มีพิกัดแรงดันอย่างน้อย $2 \times \text{VOC MOD}$ ของ PV Module ที่ได้รับการป้องกัน มีพิกัดกระแสอย่างน้อย $1.4 \times \text{ISC MOD}$ ถูกติดตั้งตามที่ผู้ผลิต PV Module แนะนำ ถูกติดตั้งโดยปกปิดส่วนที่นำไฟฟ้าอย่างมิดชิด ต้องป้องกันการเสื่อมสภาพจากสภาวะแวดล้อม

2.7.9 ไดโอดกั้นกระแส (Blocking Diodes) ไดโอดกั้นกระแสอาจถูกใช้แต่ไดโอดเหล่านี้ต้องไม่มาแทนที่อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ถ้ามีการใช้งานไดโอดกั้นกระแส ไดโอดกั้นกระแสต้องทำงานในสภาวะแวดล้อม คือต้องมีพิกัดแรงดันอย่างน้อย 2 เท่าของแรงดันสูงสุดของ PV Array มีพิกัดกระแสอย่างน้อย 1.4 เท่าของกระแสลัดวงจรในภาวะทดสอบมาตรฐานของวงจรซึ่งไดโอดกั้นกระแสทำหน้าที่ป้องกัน ถูกติดตั้งโดยปกปิดส่วนที่นำไฟฟ้าอย่างมิดชิด ต้องป้องกันการเสื่อมสภาพจากสภาวะแวดล้อม ถ้าไม่มีข้อกำหนดพิเศษจากผู้ผลิต เพื่อการใช้งานไดโอดกั้นกระแสใน PV String ของ PV Array ไดโอดนี้ต้องติดตั้งก่อนการใช้งาน

2.7.10 อุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62109-1 และอินเวอร์เตอร์ส่วนเพิ่มต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62109-2 สำหรับระบบ PV ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำหนดให้อินเวอร์เตอร์เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62109-1 และ IEC 62109-2

2.8 ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ

ตัวชี้วัดที่ใช้แสดงประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน IEC 61724 การวิเคราะห์สมรรถนะทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ในการประเมินครั้งนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ทางด้านเทคนิคโดยอ้างอิงจาก International Energy Agency Photovoltaic Power System TASK 2-Performance, Reliability and Analysis of Photovoltaic systems (IEA PVPS Task2) ซึ่งได้กำหนดให้มีการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆดังต่อไปนี้

2.8.1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array Yield) หาได้จากสมการ

$$Y_A = \frac{E_a}{P_o} \quad (2.6)$$

โดย

Y_A = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh/kWp)

P_o = กำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Wp)

E_a = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)

2.8.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Reference Yield) หาได้จากสมการ

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad (2.7)$$

โดย

Y_r = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh/kWp)

H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)

$$G_{src} = \text{ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC=1 kW/m}^2$$

2.8.3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final Yield) หาได้จากสมการ

$$Y_f = \frac{E_{tot}}{P_o} \quad (2.8)$$

โดย

Y_f = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์(kWh/kWp)

E_{tot} = พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้โดยภาระทางไฟฟ้า (kWh)

P_o = กำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Wp)

2.8.4 พลังงานสูญเสียบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Capture Losses) หาได้จากสมการ

$$L_C = Y_r - Y_A \quad (2.9)$$

โดย

L_C = พลังงานที่สูญเสียบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)

Y_r = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh/kWp)

Y_A = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh/kWp)

2.8.5 พลังงานสูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (System Losses) หาได้จากสมการ

$$L_s = Y_A - Y_f \quad (2.10)$$

โดย

L_s = พลังงานที่สูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)

Y_A = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh/kWp)

Y_f = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)

2.8.6 สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio, PR) หาได้จากสมการ

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2.11)$$

โดย

- PR = ค่าสมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์: Performance Ratio (%)
 Y_f = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)
 Y_r = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh/kWp)

2.8.7 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array Efficiency) หาได้จากสมการ

$$\eta_a = \frac{E_a}{H_i A_A} \quad (2.12)$$

โดย

- η_a = ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
 E_a = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)
 H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)
 A_A = พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

2.8.8 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Total Efficiency) หาได้จากสมการ

$$\eta_{tot} = \frac{E_{tot}}{H_i A_A} \quad (2.13)$$

โดย

- η_{tot} = ประสิทธิภาพรวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- E_{tot} = พลังงานไฟฟ้ารวมที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)
 H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)
 A_A = พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

2.8.9 พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (E_a : kWh)

$$E_a = V_{dc} \times I_{dc} \times Time \quad (2.14)$$

โดย

- E_a = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)
 V_{dc} = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ PV array
 I_{dc} = กระแสไฟฟ้าที่ของ PV array
 $Time$ = ระยะเวลาที่ PV array ผลิต V_{dc} และ I_{dc}

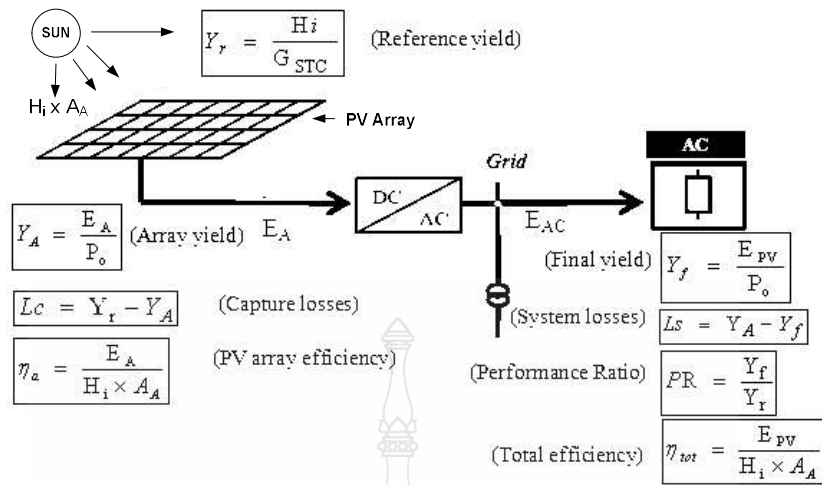
2.8.10 พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (H_i : kWh/m²)

$$H_i = G_i \times Time \quad (2.15)$$

โดย

- H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)
 G_i = ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ PV array ได้รับจริง (kW/m²)
 $Time$ = ระยะเวลาที่ PV array ผลิต V_{dc} และ I_{dc}

เพื่อที่จะสามารถเข้าใจค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างชัดเจนค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ PVGCS จึงแสดงได้ดังในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โดอะแกรมของระบบ PVGCS และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพและสมรรถนะ [21]

2.9 สมการที่ใช้ในการหาค่า Degradation Factor

$$\%DF = 100 \times \left(\frac{x_1 - x_2}{x_1} \right) \quad (2.16)$$

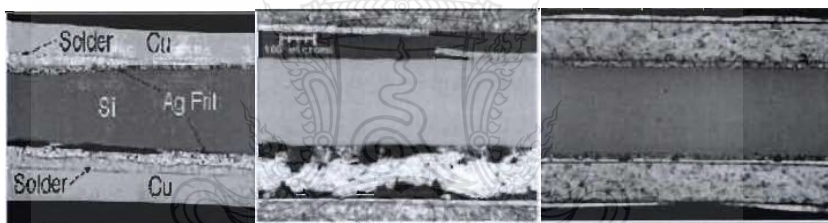
โดย

- x_1 = ค่า (PR) ของปีแรก
- x_2 = ค่า (PR) ของปีถัดมา

2.10 การเสื่อมสภาพและการเสียหายของเซลล์แสงอาทิตย์

กลไกการเสื่อมสภาพอาจรวมถึงการลดลงของกำลังไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว หรืออย่างช้าๆ ตลอดอายุการใช้งานของแผง หรือการลดลงทั้งหมดของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากความผิดปกติของตัวเซลล์ แต่ละเซลล์ในแผงที่ใช้งานนั้น อายุการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ในช่วง 20-30 ปี ซึ่งจะมีการเสื่อมสภาพทุกปีจากสภาพแวดล้อมแสงแดด ความร้อนและความชื้น รวมถึงระบบของกระแสและแรงดันไฟฟ้า การเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีปัจจัยจากคุณสมบัติทางวัสดุที่ใช้ในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนการผลิต และการดูแลบำรุงรักษาระบบ จึงมีความสำคัญที่ควรพิจารณาปัจจัยที่ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เสื่อมสภาพและวิธีการป้องกันการเสื่อมสภาพ [10]

2.10.1 การเสื่อมสภาพของ Conductive Adhesive Systems และผิวเคลือบของเซลล์ Conductive Adhesive Systems ซึ่งเป็นตัวนำที่ใช้ยึดระหว่างเซลล์และแถบตัวนำ [26, 35] มีอยู่หลายชนิด เช่น Ag, Cu, Au, Pd, Pt หรือ Al แต่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์คือ Silver-loaded Epoxy Resins เงิน (Silver) มีข้อดีคือไม่มี Oxidation และราคาถูก อีพอกซึ่งง่ายต่อการผสม ด้านทานความชื้น ไม่มีแกสพิษ เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีกระแสสูง ต้องการความต้านทานต่ำ มีความเสถียรในระยะยาว อย่างไรก็ตามอุณหภูมิแผงและเซลล์ที่เปลี่ยนขึ้นลง (Thermal Cycling) ในตอนกลางวันและกลางคืน กรณีนำไปใช้งานที่ภาคสนาม จะมีผลต่อการเกิดความต้านทานอนุกรม ในส่วนของแถบทองแดง (Copper Ribbons) กับเซลล์ ความต้านทานอนุกรมจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ การดูความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานนี้ นอกจากศึกษาโดยสมบัติทางไฟฟ้า อาจทำได้โดยการตัดเซลล์ภาคตัดขวาง แสดงดังรูป 2.15 เพื่อดูสิ่งที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของเซลล์ที่ผ่านการใช้งาน สังเกตสภาพกายภาพที่เกิดขึ้น นำไปสู่การพัฒนาวัสดุให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เซลล์ที่มีอายุการใช้งานต้องผ่านการทดสอบโดยใช้ Damp Heat มากกว่า 900 รอบ

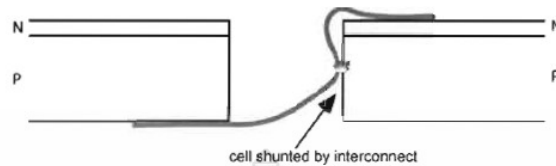


รูปที่ 2.15 ภาคตัดขวางเซลล์ที่ซิลิกอนสัมผัสกับแถบทองแดง [11]

นอกจากนี้ถ้าหากผิวเคลือบกันการสะท้อนแสง (Antireflection-AR Coatings) เสื่อมสภาพ จะทำให้แสงสะท้อนจากเซลล์เพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกอนมีผิวสีเทามันคล้ายกระจก มีการสะท้อนแสงได้มากกว่า 30% [36] ดังนั้นการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ ต้องลดแสงที่สะท้อนเพื่อให้วัสดุสารกึ่งตัวนำรับแสงมากที่สุด โดยทั่วไปมีอยู่ 2 กระบวนการที่ใช้การลดแสงสะท้อน 1) ใช้การเคลือบฟิล์มบางของ Silicon Monoxide (SiO) ที่ผิวบน สามารถลดแสงสะท้อนของผิวได้ประมาณ 10% 2) ใช้การทำผิวให้ขรุขระ โดยใช้สารเคมีกัดผิวให้เป็นรูป Cones และ Pyramids ซึ่งสามารถลดการสะท้อนแสงออกจากเซลล์ได้ โดยแสงที่สะท้อนจากผิวขรุขระหนึ่งจะตกกระทบผิวขรุขระอื่นต่อไปได้ บนผิวที่ขรุขระนี้ ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้มากกว่าหนึ่งครั้ง

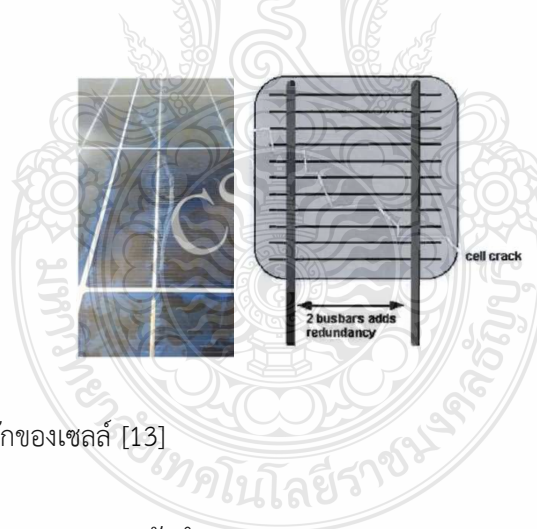
2.10.2 เซลล์ลัดวงจร (Short-Circuited Cell) การลัดวงจรไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นที่แถบตัวนำภายในเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เกิดจากแถบตัวนำด้านบนของเซลล์สัมผัสกับด้านล่างของเซลล์

เดียวกัน ทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจรในแผง ส่งผลให้เซลล์เกิดการกัดกร่อน และเกิดความเสียหายของตัวเซลล์ได้



รูปที่ 2.16 เซลล์เสียหายจากไฟฟ้าลัดวงจรภายในแผง [12]

2.10.3 สภาวะวงจรเปิดของเซลล์ (Open-Circuited Cells) การเสียหายจากการแตกหักของเซลล์ทำให้เกิดสภาวะวงจรเปิด การแตกหักนี้เกิดขึ้นโดยทั่วไปถึงแม้จะมีการติดแถบตัวนำอย่างแน่นหนาก็ตาม แต่เซลล์ก็ยังสามารถทำงานได้ ดังรูปที่ 2.17 และสาเหตุของการแตกหักอาจมาจากความเค้นเนื่องจากความร้อน การถูกกระแทกด้วยของแข็ง การแตกหักที่ไม่อาจตรวจพบในกระบวนการผลิต แต่อาจจะปรากฏในภายหลัง



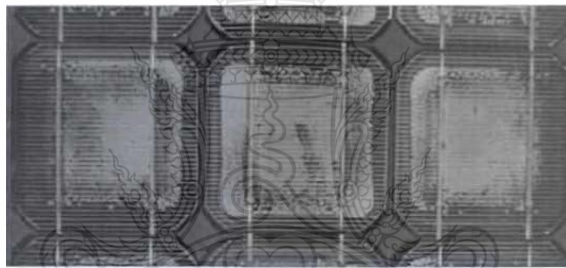
รูปที่ 2.17 การแตกหักของเซลล์ [13]

2.10.4 การลอกของแถบตัวนำ (Interconnect Open-Circuit) การลอกหลุดของแถบตัวนำเกิดจากความล้า (Metal Fatigue) ของแถบตัวนำ เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของความเค้นจากความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และแรงลมที่ประทะทำให้แผงบิดไปมา ทำให้แถบตัวนำหลุด

2.10.5 สภาวะวงจรเปิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Open-Circuit) อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างของแผง โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่สายไฟ หรือที่จิ้งจันบอกซ์ อาจเกิดจากสนิมที่กัดกร่อนหรือการลอกของแถบตัวนำ

2.10.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ลัดวงจร (Module Short-Circuit) ถึงแม้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกทดสอบก่อนการขาย แต่ก็พบแผงที่ลัดวงจรบ่อยๆ อาจเกิดเนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัตถุที่ใช้ทำเป็นฉนวนหุ้มเซลล์ ทำให้ความชื้นในอากาศซึมเข้าไปฉนวนหุ้มเซลล์เกิดการลอก ทำให้เซลล์แตกหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทำให้เกิดการกัดกร่อน

2.10.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการลอกของอีวีเอ (Module Delamination) ปัจจุบันปัญหาการลอกก่อนของแผงมีน้อยลง เมื่อเทียบกับแผงในช่วงระยะเวลาแรกๆ ที่พบโดยทั่วไป สาเหตุเกิดจากการลดลงของแรงยึดเกาะของฉนวนหุ้มเซลล์ เนื่องจากความร้อนและความชื้นภายใต้สภาวะอากาศทั้งกลางวันและกลางคืน ความแตกต่างของอุณหภูมิและการขยายตัวของวัสดุทำให้เกิดการลอกระหว่างเซลล์กับฉนวนหุ้ม ส่งผลให้ฉนวนหุ้มเซลล์ไม่เสถียรตามปกติ แสดงดังรูปที่ 2.18 การลอกส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นระหว่างฉนวนหุ้มกับเซลล์ นอกจากนั้นการที่ความชื้นแพร่ซึมเข้าไปทำให้เกิดสนิมที่โลหะบนเซลล์ได้ แต่ปรากฏการณ์นี้ก็ไม่สามารถตรวจสอบได้จากกระบวนการเร่งอายุการใช้งาน



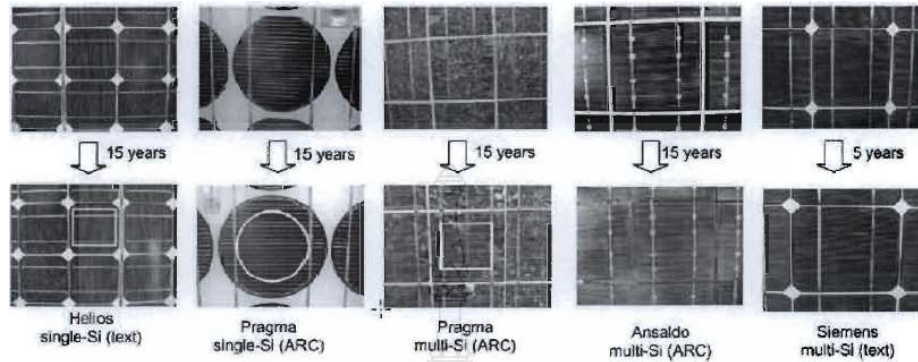
รูปที่ 2.18 การเสื่อมสภาพของแผงเซลล์ที่มีการลอกของอีวีเอ [14]

2.10.8 Hot-Spot Failures ความร้อนที่เกิดจากบางตำแหน่งบนเซลล์มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ (Hot Spot) นำไปสู่การเสื่อมสภาพของแผงเซลล์ผลิตไฟฟ้าไม่ได้ตามต้องการ และเป็นจุดเริ่มของการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์หรือระบบที่ใช้งานอยู่นั้น การเกิด Hot Spot สาเหตุมาจากการที่เซลล์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน การแตกหัก หรือการบังเงาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.10.9 บายพาสไดโอดเสีย (By-Pass Diode Failures) บายพาสใช้ป้องกันปัญหาเซลล์ที่ผิดปกติหรือไม่เข้ากันระหว่างเซลล์ (Cell Mismatch) การที่บายพาสไดโอดเสียหาย โดยทั่วไปเกิดจากไดโอดมีขนาดเล็กไม่สามารถทนกระแสที่ไหล ทำให้เกิดความร้อนที่มากเกินไปส่งผลให้ไดโอดเสียหาย

2.10.10 การเสื่อมสภาพจากความชื้นและการเปลี่ยนสีของฉนวนหุ้ม โดยทั่วไปฉนวนหุ้มเซลล์จะเป็นอีวีเอซึ่งโปร่งใสต่อแสง เมื่ออีวีเอเสื่อมสภาพ สีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ตรงกลางของเซลล์ ถ้าเป็นเซลล์ที่เป็นชนิดกกลม พื้นที่อีวีเอที่เปลี่ยนสีก็จะเป็นแบบกลม ถ้าเซลล์ที่เป็น

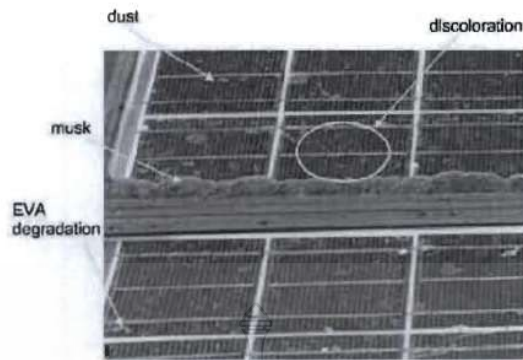
แบบเหลี่ยม พื้นที่ที่เปลี่ยนก็จะเป็นแบบเหลี่ยม เป็นผลเนื่องจากความร้อน เนื่องจากตรงกลางเซลล์มีอุณหภูมิมากกว่าตรงขอบเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนสีน้ำตาลของแผงเซลล์ที่ผ่านการใช้งานในภาคสนามมา 15 ปี [15]

สาเหตุของการเปลี่ยนสีมาจากอีวีเอได้รับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 nm. รังสียูวีจะไปเปลี่ยนโครงสร้างของอีวีเอ การเปลี่ยนสีอีวีเอเพราะยูวีรู้จักกันในนาม Cosmetic Effect ผลที่เกิดขึ้นคือจะทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงให้อีวีเอมีคุณสมบัติป้องกันการเสื่อมสภาพนี้ ทำพัฒนา “fast-cure” EVA (15295) ขึ้นมาจากผลการทดลองในภาคสนามโดยใช้ “fast-cure” EVA (15295) และทำการวัดกระแสลัดวงจรจาก 36 เซลล์ของแผงเซลล์ซิลิกอนผลึกย่อยในช่วงระยะเวลา 7 ปี ไม่พบค่าการสูญเสียของ (I_{sc}) แสดงว่าไม่เกิดการลดทอนของแสงที่ตกกระทบบนตัวเซลล์

2.10.11 การเสื่อมสภาพจากความชื้นมั่วของกระจกด้านบน โดยทั่วไปความชื้นมั่วของกระจกเกิดจากฝุ่น ออกไซด์ หรือ ปูนที่มาจากฝนหรือน้ำที่มาจากฝนหรือน้ำที่ใช้ทำความสะอาดที่ยึดเกาะกับผิวกระจกเป็นคราบ แสดงดังรูปที่ 2.20 ผลที่เกิดขึ้นเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้กำลังไฟฟ้าของแผงลดลงเนื่องจากแสงตกกระทบเซลล์ลดลง

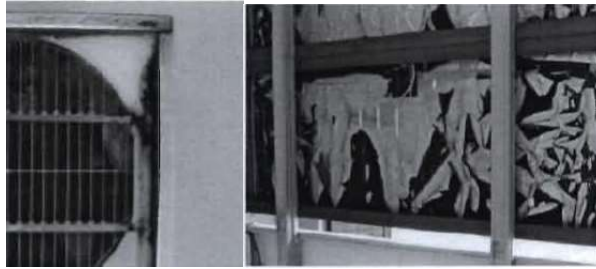


รูปที่ 2.20 ความขุ่นมัวของกระจกเกิดจากฝุ่น ออกไซด์ หรือหินปูนบนผิวหน้า [16]

ตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 กระจกที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จะเจือธาตุ Cerium (Ce) ลงไปเพื่อป้องกันรังสียูวีที่ความยาวคลื่นสั้นกว่า 400 nm ซึ่งเป็นเหตุของการเสื่อมสภาพของโพลีเมอร์ อย่างไรก็ตามการป้องกันรังสีอินฟราเรด (Infrared, IR) ที่เป็นคลื่นยาว มีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เช่นเดียวกัน แต่ยังไม่ได้นำมาพัฒนา ในการศึกษาวัสดุปิดด้านบนในส่วนของการส่งผ่านแสงแต่ละความยาวคลื่น (Spectral Transmittance) พบว่าแสงที่ผ่านผิวบนวัสดุปิดมาแล้วสามารถผ่านถึงเซลล์ 96% และสูญเสีย 4% ที่ผิวด้านบนของวัสดุ นอกจากนี้พบการลดกำลังไฟฟ้าเบื้องต้นการใช้งาน (Initial Drop) มาจากกระจกเช่นกัน [30]

กระจกที่ใช้งานต้องทนต่อแรงกระแทก ต้องสามารถผ่านการทดสอบจึงจะสามารถนำมาใช้งานเป็นกระจกเซลล์แสงอาทิตย์ได้ การทดสอบใช้ลูกบอลน้ำแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.54 cm. น้ำหนัก 8 กรัม ยิ่งกระแทกด้วยความเร็ว 23 m/s ที่มุมตั้งฉากกับกระจก สำหรับหินที่ใช้ทดสอบจะใช้น้ำหนัก 2 - 4 กรัม และใช้ความเร็วในการชนกระจก 10 to 15 m/s ค่าที่ใช้อ้างอิงนี้มาจากกรณีของลมพายุที่มีค่าน้อยกว่า 25 m/s [30]

2.10.12 การเสื่อมสภาพของแผ่นปิดด้านหลังการเสื่อมสภาพของแผ่นปิดด้านหลังหรือแบคชีท (Back Sheet) เป็นสาเหตุให้น้ำซึมผ่านเข้ามาภายในเซลล์ได้ ทำให้กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง เนื่องจากการเกิดการผุกร่อนที่หน้าสัมผัสส่งผลให้อายุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุลง ไม่เป็นไปตามเวลาที่รับประกัน ดังนั้นแผงเซลล์ที่ดีควรผ่านกระบวนการทดสอบที่ป้องกันน้ำซึมเข้าแผงเป็นอย่างดี ในรูปที่ 2.21 จะแสดงการเสื่อมสภาพของแบคชีท



รูปที่ 2.21 การลอกของแบคซีทและผลจากการซึมของน้ำที่เข้าทางด้านหลังของแผง [17]

2.11 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

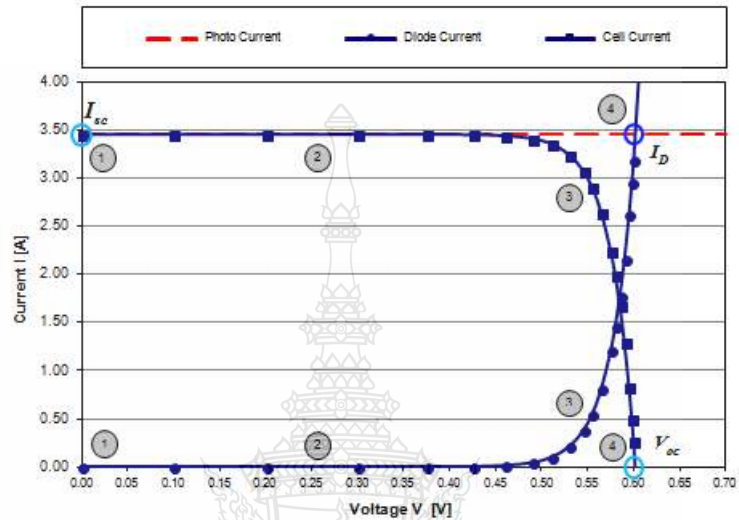
2.11.1 เซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎีเป็นที่ทราบกันแล้วว่า เมื่อมีแสงสว่างจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะ ให้ไหลผ่านโหลดที่เชื่อมต่อ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบจะเป็นสัดส่วนกับ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจะสามารถเขียนแทนด้วยวงจรในรูปที่ 2.22 รอยต่อ P-N junction นั้นจะเขียนแทนด้วยไดโอดและจะมีแหล่งจ่ายกระแสซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบ ตัวต้านทานปรับค่าได้แสดงถึงโหลด ทำให้เกิดสมการดังนี้

$$I_{ph} - I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.22 วงจรเทียบเคียงเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับโหลด [21]

ผลการทดลองตามวงจรเทียบเคียงของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่ออยู่กับโหลด พบว่าลักษณะของเส้นโค้งของกระแส-แรงดัน (I-V Curve) เมื่อมีปริมาณแสงตกกระทบคงที่จะทำให้เกิดตามรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เส้นโค้งของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จากคุณลักษณะของไดโอด [21]

เมื่อด้านปลายของขั้วต่อโหลดเกิดการ Short-circuit ขึ้น ($R_{load} = 0$) แรงดันด้านออกและแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าเป็น 0 แรงดัน $V=0$ (ตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 2.23) ดังนั้นกระแสทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากแสงจะไปที่ Output ดังนั้นกระแสสูงสุดที่จุดนี้จะเรียกว่า Short-circuit Current (I_{sc})

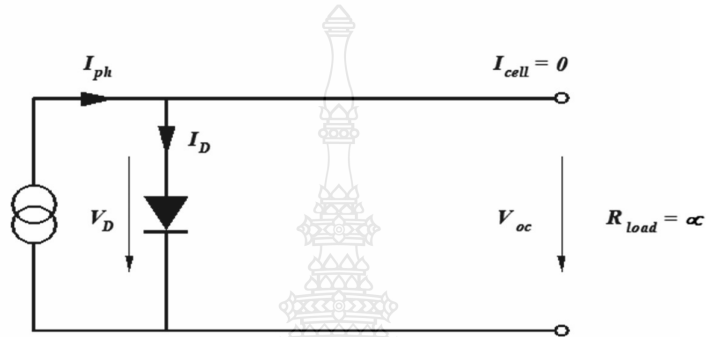
$$I_{sc} = I_{cell} = I_{ph} \quad (2.19)$$

ถ้าความต้านทานโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้น ค่าของกระแสจะเท่าเดิม ดังนั้นกระแสโฟโต้จะสัมพันธ์กับกระแสด้านออก (ตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 2.23)

เมื่อแรงดันไดโอดเริ่มเพิ่มขึ้นหลังจากค่าความต้านทานโหลดที่เพิ่มขึ้นแล้ว สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสโฟโต้ จะทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดได้ กระแสที่ไหลผ่านทำให้เกิดการสูญเสียกำลังภายในไดโอด จะสัมพันธ์กับพื้นที่เส้นโค้งของกระแสโฟโต้ และเส้นโค้งกระแสเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากผลรวมของกระแสโหลดและกระแสไดโอดต้องมีค่าเท่ากับค่าคงที่ของกระแสโฟโต้ ดังนั้นกระแสด้านออกจะลดลง (ตำแหน่งที่ 3 ในรูปที่ 2.23)

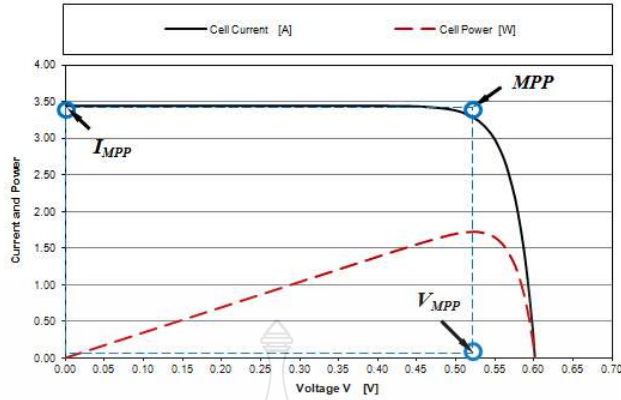
สำหรับโหลดที่มีค่าความต้านทานมาก ๆ (Open circuit) แสดงในรูปที่ 2.24 กระแสด้านออกมีค่าเท่ากับ 0 ($I_{cell} = 0$) ดังนั้นผลรวมของกระแสโฟโต้ ที่ไหลผ่านไดโอดภายใน (ตำแหน่งที่ 4 ดังรูปที่ 2.23) ขณะเปิดวงจร Open-circuit voltage (V_{oc}) สามารถหาได้โดย

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.24 วงจรเทียบเคียงของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะเปิดวงจร [21]

ค่าของแรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage) จากการคำนวณของซิลิคอนเซลล์จะมีค่าระหว่าง 0.5 - 0.6 V และจะมีค่าระหว่าง 0.75-0.9 V สำหรับ Amorphous Silicon เซลล์ จากการทดลองทำให้เข้าใจได้ว่าเส้นโค้งคุณลักษณะ ของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งคุณสมบัติ ไดโอดโดยมีทิศทางตรงข้าม เนื่องจากกำลังไฟฟ้าเกิดจากกระแสและแรงดัน ดังนั้น เส้นโค้งของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถจ่ายได้ขึ้นอยู่กับระดับของแสงที่ได้รับ และเป็นไปตามกราฟคุณสมบัติ I-V ที่ตรงข้ามไดโอดตามรูปที่ 2.25 ซึ่งจะมีจุดที่เกิดพลังงานสูงสุดเรียกว่า Maximum Power Point (MPP)



รูปที่ 2.25 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPP) [21]

ถึงแม้จะมีค่ากระแสสูงที่สุดจะอยู่ที่จุดลัดวงจรก็ตาม แต่เมื่อค่าของแรงดันเท่ากับ 0 และตั้งนั้นค่ากำลังก็คือ 0 ด้วย และกลับกันที่จุด เปิดวงจร ค่าของกำลังที่จุดนี้ก็จะเป็น 0 ด้วย ในระหว่างที่มีผลที่เกิดจากการรวมกันของกระแสและแรงดันที่ทำให้ค่าของกำลังมีค่าใกล้กับค่าสูงสุด ซึ่งเราเรียกว่า Maximum Power Point (MPP) ซึ่งเป็นจุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ ทำงานโดยได้รับความเข้มจากการส่องแสงแล้วส่งผ่านกำลังสูงสุด เมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟส่วนโค้งของ I-V ค่าของ V_{MPP} และ I_{MPP} สามารถคำนวณได้จาก V_{oc} และ I_{sc} คือ

$$V_{MPP} \approx (0.75 - 0.9) V_{oc}$$

$$I_{MPP} \approx (0.85 - 0.95) I_{sc}$$

และค่า Fill Factor (FF) เป็นค่าที่นำมาพิจารณาเพื่อหาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย

$$FF = \frac{(V_{MPP} \cdot I_{MPP})}{(V_{oc} \cdot I_{sc})} \quad (2.21)$$

ซึ่งค่า Fill Factor หมายถึงค่าที่แสดงถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมันจะแสดงว่า กราฟคุณลักษณะเส้นโค้งของ I-V มีค่าเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมมากน้อยเพียงใด โดยปกติแล้ว ซิลิคอนเซลล์ จะมีค่าประมาณ 0.7 - 0.8 ส่วนกำลังด้านนอกของเซลล์ก็คือ

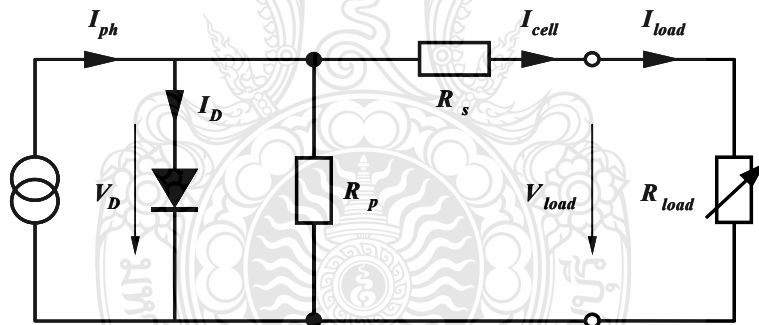
$$P_{MPP} = V_{MPP} \times V_{oc} \times FF \quad (2.22)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ หาได้จาก อัตราส่วนของ พลังงานไฟฟ้าด้านออก ต่อ พลังงานแสงอาทิตย์ด้านเข้า (P_{in}) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\eta \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.23)$$

ในปัจจุบันนี้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ Silicon Solar Cell ได้รับแสงอาทิตย์ขนาด 1.5 AM จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าประมาณ 24 % บนพื้นที่ขนาดเล็กและ ในส่วนที่มีใช้งานทั่วไปซึ่งเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีประสิทธิภาพ 6-10% สำหรับ Amorphous Silicon และ 14-18% สำหรับ Crystalline Silicon ถึงแม้ทางทฤษฎีจะได้ค่า 26 – 27% ก็ตาม

2.11.2 เซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ ผลของความต้านทานที่ต่ออนุกรม และต่อขนาน เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ จะพบว่ามีส่วนประกอบความต้านทานเพิ่มมาอีก 2 ค่าภายในเซลล์ ก็คือ R_s ที่ต่ออนุกรมและ R_p ที่ต่อขนานอยู่ ซึ่งพิจารณาได้จากวงจรเทียบเคียงในรูปที่ 2.26

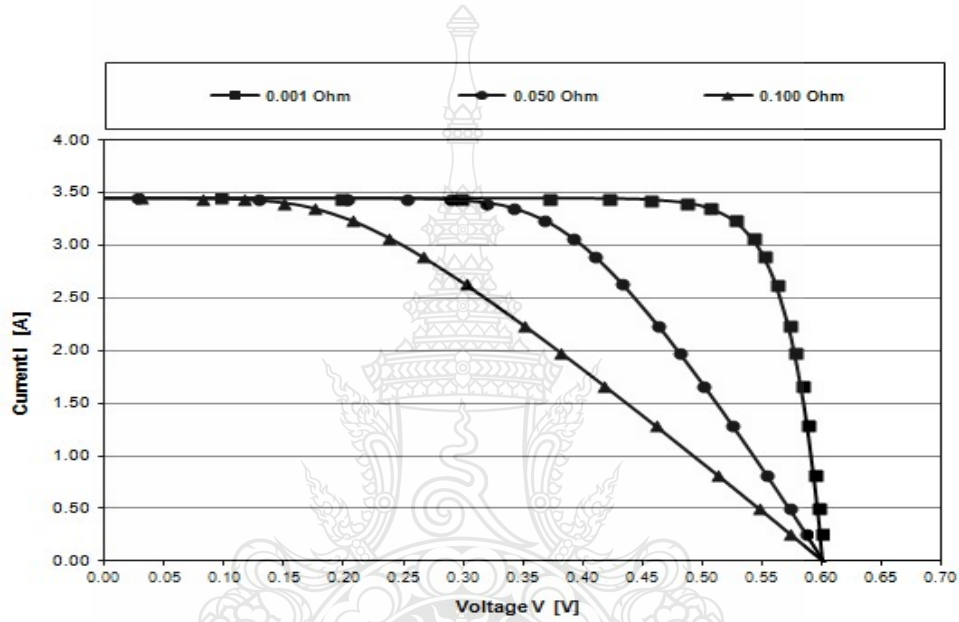


รูปที่ 2.26 วงจรเทียบเคียงของ เซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้งานจริง [21]

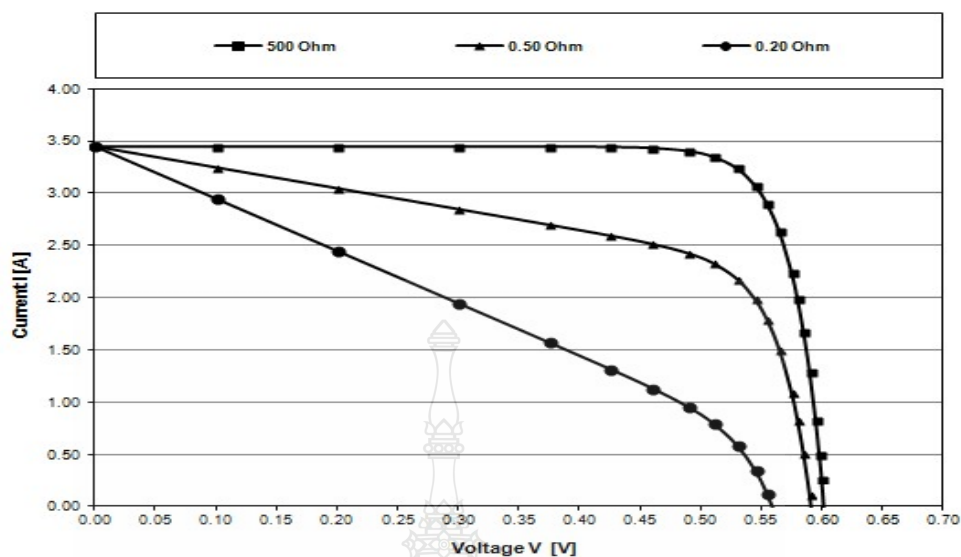
จากวงจรดังรูปที่ 2.26 จะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q}{k \cdot T} (V_{load} + I_{cell} \cdot R_s)} - 1 \right) - \frac{V_{load} + I_{cell} \cdot R_s}{R_p} \quad (2.24)$$

ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมเกิดจากความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้น และความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจากการต่อกับขั้วต่อภายนอก ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนานส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N Junction ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ แต่อย่างไรก็ดีการลดค่าความต้านทานอนุกรมลงก็มีลักษณะเช่นเดียวกับการลัดวงจร ค่าต่างๆ เหล่านี้ก็จะมามีผลกับค่าของ Fill Factor จะส่งผลให้ค่ากำลังต้านออกสูงสุดลดรูปที่ 2.26 คือผลของ R_s ส่วนรูปที่ 2.27 คือ ผลของ R_p



รูปที่ 2.27 กราฟเส้นโค้งของ I-V ที่มีค่าความต้านทานอนุกรมค่าต่างกัน [21]



รูปที่ 2.28 กราฟเส้นโค้งของ I-V ที่มีค่าความต้านทานขนานค่าต่าง [21]

2.11.3 ความสูญเสียต่างๆ ใน เซลล์แสงอาทิตย์ ความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนแสงจากการส่องแสงในอากาศไปยังสารกึ่งตัวนำเนื่องจากมีดัชนีการหักเหแสงที่ต่างกัน โดยความสูญเสียเหล่านี้ลดได้โดยการเคลือบผิวด้วยสารกันสะท้อนหรือปรับโครงสร้างของผิวเซลล์ อีกส่วนคือการสะท้อนของโลหะที่เชื่อมต่อด้านหน้าของแผงเซลล์

2.11.4 ความเข้มของแสงซึ่งลักษณะการส่องของแสงอาทิตย์ในช่วงกว้างๆ (Wide Spectrum) โฟตอนมีพลังงานไม่เท่ากัน โฟตอนที่มีพลังงานเพียงเล็กน้อยกว่า Band gap จะทำให้ไม่สามารถดูดซับและนำไปใช้ได้เนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ และจะไม่เกิดพันธะคู่ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล ในกรณีที่โฟตอนมีขนาดพลังงานมากกว่า Band gap หรือเท่ากับ Band gap เท่านั้นที่จะถูกนำไปใช้ได้

2.11.5 เนื่องจากกระแสโฟโต้จะเป็นสัดส่วนกันโดยตรงกับจำนวนโฟตอนที่ดูดซับได้ต่อหน่วยเวลา เมื่อกระแสโฟโต้เพิ่มขึ้น Band gap จะลดลง และ Band gap ก็เป็นตัวกำหนดแรงดันที่บริเวณรอยต่อ P-N Junction เมื่อ Band gap ที่มีขนาดเล็กลงจะเป็นผลให้แรงดันน้อยลงในกรณีที่ Band gap ขนาดใหญ่จะมีค่าแรงดันสูง แต่แสงอาทิตย์เพียงส่วนน้อยที่ดูดกลืนได้ก็จะเป็นผลให้เกิดกระแสโฟโต้ขึ้นมาเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์

2.11.6 กระแส Dark Current (I_0) มีค่ามากกว่าค่าในทางทฤษฎีทำให้แรงดันลดลงซึ่งเป็นไปตามสมการ

2.11.7 ประจุพาหะรวมตัวกันไม่หมด (Recombination) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่จุดที่มีความไม่สมบูรณ์ เช่น ความบกพร่องภายในผลึกหรือความบริสุทธิ์ ดังนั้นวัสดุที่นำมาทำจะต้องมีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์และมีความบริสุทธิ์ให้มากที่สุด ในทำนองเดียวกัน ผิวของวัสดุกึ่งตัวนำจะต้องอยู่ในโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรงทนต่อการรบกวนภายนอก f ค่า Fill Factor จะต้องมิต่ำกว่า 1 เสมอ (ในทางทฤษฎีค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ คือ 0.85)

2.11.8 ค่าความต้านทานอนุกรมและขนาดที่เกิดขึ้นส่งผลให้ค่า Fill Factor ลดลงจากค่าปกติในการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ “Watt Peak” (W_p) ที่ Standard Test Conditions (STC), ซึ่งมีความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 25°C และ AM 1.5 ดังนั้น “Peak Power” สามารถเกินได้ถ้าแสงและอุณหภูมิมากกว่าที่กำหนดและสามารถจะลดลงเช่นกัน

2.11.9 สรุปลักษณะสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณจำนวนแผงแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้

2.11.9.1 ความเข้มของแสง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่า เมื่อความเข้มของแสงสูงกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน 1000 W/m^2 จะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง

2.11.9.2 อุณหภูมิแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.4-0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25°C เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage หรือ (V_{oc}) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25°C จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25°C จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25°C เช่น อุณหภูมิ 30°C จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ($0.5\% \times 5^\circ\text{C}$) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่ V_{oc} จะลดลง 0.525 V ($21 \text{ V} \times 2.5\%$) เหลือเพียง 20.475 V ($21 \text{ V} - 0.525 \text{ V}$) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย

2.12 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์

2.12.1 เซลล์แสงอาทิตย์หรือที่เรียกกันทั่วไปโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) [21,10] คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากสารกึ่งตัวนำสำหรับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์หรือโฟตอนมาเป็น

พลังงานไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวสามารถเกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ในขั้นตอนเดียวโดยใช้กระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในแผงโซลาร์เซลล์ประกอบไปด้วย สารกึ่งตัวนำ ชนิด P-type และ N-type เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการกระตุ้นของอิเล็กตรอน เกิดอิเล็กตรอนอิสระ รวมทั้งเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมีการต่อขั้วทั้งสองข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดสมดุล ในทางไฟฟ้าเมื่อมีอิเล็กตรอนไหลก็ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งเป็น 2 ชนิดตามโครงสร้างการผลิต คือ แบบ crystalline silicon cell และ thin-film cell การเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีขนาดที่เหมาะสมและสะดวกกับการใช้งานโดยการขนานและอนุกรมเซลล์เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์ทั้ง 2 แบบถูกนำมาผลิตเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายประมาณ 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบจากแผงเซลล์หลายแผงต่อกันแบบขนานและอนุกรมเพื่อเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอ กับขนาดของระบบที่ต้องการ หน่วยวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์คือ วัตต์ต่อตารางเมตร W/m^2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตได้ 3 ชนิด คือ และแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลองและใช้งานจริงแตกต่างกันดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.29 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน [22]

ตารางที่ 2.4 ชนิดของแผงเซลล์แบ่งตามวัสดุและประสิทธิภาพการใช้งานทดลองและใช้งานจริง

วัสดุ	ประสิทธิภาพการใช้งาน	
	ในห้องทดลอง (%)	ในงานจริง (%)
Monocrystalline Silicon	24	14-17
Polycrystalline Silicon	18	13-15
Amorphous Silicon	13	5-7

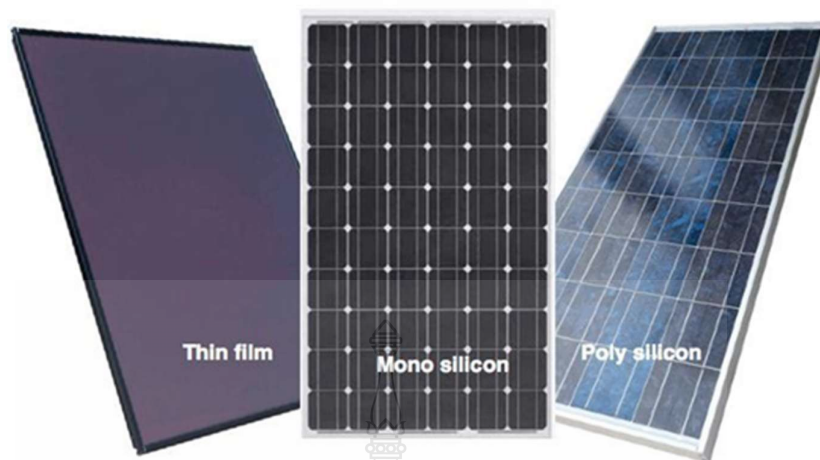
2.12.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ได้รับการพัฒนาเก่าแก่ที่สุด ผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน มีความหนาประมาณ 200-300 ไมครอนมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 20-22% แต่มีราคาแพง

2.12.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน (Multicrystalline Silicon Solar Cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน ผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ชนิดผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน มีความหนาประมาณ 180-220 ไมครอน มีราคาปานกลาง มีประสิทธิภาพประมาณ 17-20%

2.12.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) มีลักษณะเป็นฟิล์มบางหนาประมาณ 0.5-1.0 ไมครอน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลขซึ่งมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบาง เบาราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กไปจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร มีประสิทธิภาพประมาณ 11-13%

2.12.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar Cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงระดับ 30 % ขึ้นไป มีราคาแพงมาก ไม่นิยมนำมาใช้งานบนพื้นโลก จึงใช้งานสำหรับดาวเทียมเท่านั้น

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารประกอบตระกูลทองแดงอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ และตระกูลแคดเมียมเทลลูไรด์ มีการใช้งานน้อยอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 25 ปี ดังนั้นเมื่อลงทุนติดตั้งในครั้งแรกก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป การใช้งานไม่มีความสลับซับซ้อน และไม่อันตราย ประชาชนทั่วไปสามารถหาซื้อ และติดตั้งเพื่อใช้งานในครัวเรือนด้วยตนเอง การใช้งานแบบง่ายๆ อาจเริ่มจากการซื้ออุปกรณ์ชุดเซลล์แสงอาทิตย์สำเร็จรูปมาใช้งาน เพื่อให้เกิดการคุ้นเคย เช่น เส้าไฟส่องสว่างพลังงานแสงอาทิตย์ ชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์พลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการออกแบบระบบใหญ่ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้าน ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 2.30 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพแต่ละประเภท [23]

ตารางที่ 2.5 ความเข้มการแผ่รังสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะต่าง ๆ

สภาพอากาศ	ท้องฟ้าโปร่ง	ท้องฟ้ามีหมอกและเมฆ	ท้องฟ้าครึ้ม
การแผ่รังสีทั้งหมด	600...1000 W/m ²	200...400 W/m ²	50...150 W/m ²
ส่วนที่แผ่กระจาย	10...20 %	20...80 %	80...100 %

2.13 วัฏจักรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความเสียหายหรือหมดอายุการใช้งานจะเกิดเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในหัวข้อนี้จะพูดถึง อายุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อหมดอายุการใช้งาน กระบวนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อหมดอายุการใช้งาน [24]

2.13.1 อายุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการศึกษาพบว่าอายุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Life expectancy of solar panels) อยู่ที่ 30 ปี ตลอดช่วงอายุการใช้งาน ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจลดลงร้อยละ 20 ในช่วง 10-12 ปีแรก ประสิทธิภาพจะลดลงสูงสุดประมาณร้อยละ 10 และร้อยละ 20 เมื่อใช้งานไป 25 ปี ตัวเลขนี้ได้รับการยืนยันจากผู้ผลิตส่วนใหญ่ แต่จากประสบการณ์จริงพบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเพียงร้อยละ 6-8 เมื่อใช้งานไป 25 ปี ช่วงชีวิตการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงอาจนานกว่าที่มีการประมาณอย่างเป็นทางการ

หากเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพสูง การใช้งานอาจมากกว่า 30-40 ปี และยังคงสามารถทำงานได้หลังจากนั้นแม้ว่าประสิทธิภาพจะลดลงก็ตาม

2.13.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อหมดอายุการใช้งาน ในเชิงกฎหมายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานถูกจำแนกให้เป็น กากของเสีย ในกรณีของสหภาพยุโรป แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ (e-waste) ภายใต้กฎหมายการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า (Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive) เพิ่มเติมจากกรอบข้อบังคับอื่นๆ ผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องทำตามข้อกำหนดเฉพาะในกฎหมายและมาตรฐานการรีไซเคิลเพื่อทำให้เกิดความมั่นใจว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่กลายเป็นภาระต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อหมดอายุการใช้งานและด้วยเหตุนี้เองที่เทคโนโลยีรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงเกิดขึ้นมา ส่วนในประเทศไทย หาก (ร่าง) พระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และซากผลิตภัณฑ์อื่นซึ่งเป็นฉบับที่คณะรัฐมนตรีเห็นชอบในหลักการเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2558 ถูกนำมาใช้ ก็จะสามารถเป็นกรอบทางกฎหมายในการจัดวางการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานให้มีความยั่งยืนทางสังคมและสิ่งแวดล้อมได้

2.13.3 กระบวนการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดทั้งชนิดซิลิกอน (silicon based) และชนิดฟิล์มบาง (thin-film based) มีแนวทางการรีไซเคิลที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์นำเสนอออกมาในเชิงเทคโนโลยีแบบต่างๆ เทคโนโลยีบางแบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรีไซเคิลได้ถึงร้อยละ 96 และมุ่งที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต แม้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film) อาจมีส่วนประกอบของโลหะหนักอยู่บ้าง เช่น แคดเมียมหรือเทลลูไรด์ ข้อมูลจากงานวิจัยจำนวนมากยังไม่พบหลักฐานที่ชี้ว่ามีสารพิษรั่วไหลจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ กระบวนการรีไซเคิลต้องการเวลาในการดำเนินงานที่ครอบคลุมและต้องมีการวิจัยต่อไปเพื่อให้ บรรลุศักยภาพอย่างเต็มที่ในการนำเอาชิ้นส่วนทุกชิ้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มารีไซเคิล มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่หน่วยการออกแบบและหน่วยการรีไซเคิลจะต้องประสานงานกันอย่างใกล้ชิด ชิดโดยคำนึงถึงการออกแบบเชิงนิเวศ (e-co design)

2.13.4 การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อหมดอายุการใช้งาน แผ่นกระจกบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร้อยละ 90 และสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีส่วนประกอบของแร่หายาก ร้อยละ 95 สามารถนำมารีไซเคิลได้ การคาดการณ์ระบุแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็ว ทำให้ในยุโรปเริ่มมีกระบวนการรีไซเคิลเพื่อจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานด้วยความรับผิดชอบและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม บริษัทที่ผลิตแผ่นฟิล์ม First Solar เสนอโครงการรีไซเคิลขนาดใหญ่ที่จะเก็บแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานแล้วถึงร้อยละ 85 และนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลให้ได้มากกว่าร้อยละ 80 ของทั้งหมด โดยผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ในสหภาพยุโรปได้เสนอให้มี

การรีไซเคิลได้โดยสมัครใจ ในฝรั่งเศสกลุ่มอุตสาหกรรมการจัดการน้ำและของเสีย Veolia ก่อตั้งโรงงานรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แห่งแรกในยุโรป ทั้งนี้โรงงานยังมีเป้าหมายที่จะรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุแล้วมาจัดการอีกมากกว่าหลายพันตัน ส่วนกลุ่มความร่วมมือกันของอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ในสหรัฐอเมริกา Solar Energy Industries Association: SEIA กำลังร่วมมือกันกับทางยุโรปเพื่อพัฒนาโครงการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้ในสหรัฐอเมริกา เอเชียเรียกได้ว่าญี่ปุ่นเป็นประเทศที่มีการใช้พลังงานหมุนเวียนมากที่สุดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ก็กำลังวางแผนรับมือจัดการกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายต้นที่จะหมดอายุการใช้งานในอนาคต กว่า 10,000 ต้นในอนาคต กระทรวงสิ่งแวดล้อมได้ทำการวิจัยและเผยแพร่แนวทางการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อปี พ.ศ.2559 ทั้งนี้บริษัทผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ N P C ก็ตัดสินใจสร้างโรงงานรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาควบคู่กันอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีใหม่ๆจากโตชิบา ในการแยกสารกึ่งตัวนำออกจากแผ่นกระจก ทำให้รีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถึง 30,000 แผงต่อเดือน

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์ และคณะ [25] ทำการประเมินผลการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะการทดสอบกลางแจ้ง โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดผลึกเดี่ยว (Mono crystalline) จำนวน 1 แผง ชนิดผลึกซับซ้อน (Poly crystalline) จำนวน 1 แผง และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin-film) จำนวน 2 แผง นำมาทดสอบใช้งานกลางแจ้ง โดยใช้เวลาทดสอบเป็นระยะเวลา 365 วัน ที่ศูนย์พัฒนามาตรฐานและทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางขุนเทียน) ด้วยการตรวจสอบและการวัดผลแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลางแจ้ง โดยใช้วิธีตรวจสอบการเสื่อมสภาพ ด้วยสายตา (Visual inspection test) การวัดความเป็นฉนวน (Insulation test) การวัดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในสภาวะเปียกชื้น (Wet leakage current test) และการวัดค่าทางไฟฟ้าในสภาวะมาตรฐาน (Standard testing condition; STC) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อสิ้นสุดการทดสอบกลางแจ้งในช่วงเวลา 365วัน การวัดความเป็นฉนวน การวัดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในสภาวะเปียกชื้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผงผ่านมาตรฐานการทดสอบ แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก แสดงผลการเสื่อมสภาพด้านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Power maximum; Pmax) สูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์ม ดังนั้นสิ่งที่ต้องพิจารณาในเบื้องต้นในการเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรได้รับการรับรองมาตรฐานการทดสอบจากห้องปฏิบัติการทดสอบที่ได้รับมาตรฐานเบื้องต้น ได้แก่ มาตรฐาน IEC61215, IEC61646 และมาตรฐานห้องปฏิบัติการทดสอบ ISO 17025

พศวีร์ ศรีโหมด และคณะ [26] ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีการลดอุณหภูมิและเพิ่มความเข้มแสงให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการลดอุณหภูมิก็คือการนำน้ำหล่อเย็นอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสเพื่อลดอุณหภูมิ การเพิ่มความเข้มของแสงจะออกแบบแผ่นกระจกเงาสะท้อนเพื่อเพิ่มความเข้มของแสงที่ส่องไปยังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะใช้ระยะเวลาในการทดลองเป็นระยะเวลา 90 วัน บันทึกค่าเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นและระยะเวลาการคืนทุน โดยผลจากการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำน้ำหล่อเย็นมาลดอุณหภูมิมิมีการผลิตไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้งานแบบปกติเพิ่มขึ้น 21.62% แผงที่นำน้ำเย็นมาลดอุณหภูมิร่วมกับการเพิ่มความเข้มแสงมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้งานแบบปกติเพิ่มขึ้น 28.78% เมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน พบว่าการการใช้วิธีการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว สามารถคืนทุนได้เร็วที่สุดโดยมีระยะเวลาคืนทุน 8 ปี 3 เดือน

บุญเทียม เลียมพระจันทร์ และคณะ [27] ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางปรับเพิ่มสมรรถนะระบบโซลาร์เซลล์ที่แผงมีความสกปรก โดยความสกปรกที่เกาะติดบนแผงโซลาร์เซลล์นั้น ส่วนมากจะมาจากสภาพแวดล้อมและอากาศในท้องถิ่นที่ทำการติดตั้ง โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นถ้าแผงโซลาร์เซลล์มีความสกปรก จะส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าลดลงโดยปกติฝุ่นที่มีค่าระหว่าง 1 ไมโครเมตร ถึง 500 ไมโครเมตร สามารถเกาะที่หน้าแผงขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งโรงไฟฟ้า แผ่นที่สกปรกสามารถเกิด ขึ้นเองตามธรรมชาติและสามารถเกิดขึ้นจากฝีมือมนุษย์ ฝุ่นที่เกาะหนายอยู่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้เกิดจุดร้อน สามารถสร้างความเสียหายให้เซลล์บางส่วนได้ สำหรับการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สัมพันธ์กับปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ โดยปริมาณความเข้มสูงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะสูงตามไปด้วย ถ้าแผงมีสิ่งสกปรกมาบดบังก็จะส่งผลทำให้กำลังการผลิตลดลงได้ ในการทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีการศึกษาการทดลองทำความสะอาด 3 วิธีคือ การอัดอากาศขนาด 60 PSI การอัดอากาศขนาด 30 PSI และทำความสะอาดด้วยน้ำ และทำการวัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพื่อหาค่ากระแสที่ได้จากลักษณะตัวอย่างสามแบบคือ ฝุ่นขนาดเล็ก ฝุ่นขนาดกลางและฝุ่นขนาดใหญ่ พบว่าการทำการวัดกระแสก่อนทำความสะอาด จะได้ค่ากระแส 96.7% 90.3% และ 58.6% เมื่อทำความสะอาดด้วย วิธีที่หนึ่ง จะทำให้ค่ากระแสเพิ่มขึ้น แก๊สลิบแปดจุดสองเปอร์เซ็นต์ แก๊สลิบห้าจุดสามเปอร์เซ็นต์ และแปดเก้าเจ็ดสี่เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้วิธีที่สอง ผ่ากระแสเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันที่ กัดเก้าเปอร์เซ็นต์ และแบบที่สาม จะมีค่าใกล้เคียงเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ นั้นหมายถึงในแบบที่สามหรือการทำความสะอาดด้วยน้ำมีผลดีที่สุด แม้ว่าการทำความสะอาดด้วยน้ำจะดีที่สุด แต่ปริมาณของน้ำอาจไม่เพียงพอต่อการใช้ทำความสะอาดทั้งปี ทำให้มีผู้คิดค้นการทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การทำความสะอาดด้วยธรรมชาติ ฝนไม่มีค่าใช้จ่ายแต่มีความผันผวนตามฤดูกาล ความไม่แน่นอนเรื่องปริมาณน้ำฝนอาจทำให้ต้องมีการทำความสะอาดเพิ่มเติม การทำความสะอาดด้วย การขัด

สิ่งสกปรกออกจากผิวโดยใช้แปรงที่มีขนพิเศษที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันรอยขีดข่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บางคนยังมีการใช้น้ำประปาช่วยในการทำความสะอาด และขัดควบคู่กันไป และการทำความสะอาดด้วยเครื่องจักร วิธีการนี้ใช้เครื่องจักรทำความสะอาดแบบแห้งเพื่อการดำเนินการทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในการใช้เครื่องจักรแบบนี้จะช่วยประหยัดน้ำประปา และเป็นระบบที่ใช้สปริงเกอร์ที่ออกแบบมาช่วยทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง

นพพล สิทธิพล และคณะ [28] ทำการทดสอบความต้านทานฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นและมีมรสุมปกคลุมมากกว่า 6 เดือนต่อปี สภาพภูมิอากาศเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีรายงานว่าความชื้นเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพในระบบไฟฟ้าแรงสูง ความชื้นจะทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วไหลซึมผ่านลามิเนตและแผ่นหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงสู่ระบบกราวด์ และจะเกิด PID ขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เมื่อเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าสูง ในงานวิจัยนี้แสดงการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานมาเป็นระยะเวลาที่มากกว่าสองปี โดยจะทดสอบกระแสรั่วไหลในระดับสตรึง และทดสอบกระแสรั่วไหลแบบเปียกในระดับแผง แล้วเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมต่อระบบกราวด์แบบ Negative ground และ Floating ground โดยจากการทดสอบการลดลงของค่าความต้านทานฉนวนแบบ Negative ground และ Floating ground คือ $14.5 \text{ M}\Omega$, $11.0 \text{ M}\Omega$ และค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลต่อสตรึงคือ $68.9 \mu\text{A}$, $90.9 \mu\text{A}$ ตามลำดับ และผลการทดสอบกระแสไฟฟ้ารั่วไหลแบบเปียกต่อโมดูลมีค่าความต้านทานฉนวนเฉลี่ยอยู่ที่ $174 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}^2$, $133 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}^2$ และกระแสไฟรั่วเฉลี่ยต่อโมดูลคือ $5.75 \mu\text{A}$, $7.51 \mu\text{A}$ ตามลำดับ การทดสอบการรั่วไหลในรูปแบบการเชื่อมต่อเดียวกันสำหรับแต่ละโมดูลในสตรึงเพื่อยืนยันผลการทดสอบกระแสไฟรั่ว วงจรสมมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของ J.C. Hernandez, P.G. Vidal, and A. Medina แผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนานกับอาร์เรย์ PV ในรูปแบบเดียวกัน สำหรับการวัดความต้านทานของฉนวนเพื่อประเมินกระแสรั่วไหล ตั้งค่าไว้ที่ $1,000 \text{ Vdc}$ ในขณะที่โพรบบวกเชื่อมต่อกับขั้วลบของสตรึง PV และโพรบลบเชื่อมต่อกับโครงสร้างรองรับหรือสายกราวด์ ดำเนินการเป็นเวลา 2 นาทีโดยไม่มีแสง บันทึกค่าความต้านทานฉนวนสำหรับสตรึง PV แต่ละสตรึง วัดความต้านทานของฉนวนเพิ่มเติมเพื่อประเมินกระแสรั่วไหลแบบเปียก แผงเซลล์แสงอาทิตย์แช่ไว้ในถังเก็บน้ำในขณะที่โพรบบวกเชื่อมต่อกับขั้วลบของโมดูล และโพรบเชิงลบเชื่อมต่อกับโครงสร้างรองรับ เม็กโอห์มมิเตอร์ทำงานเป็นเวลา 2 นาทีโดยไม่มีแสงตกกระทบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บันทึกค่าความต้านทานฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยตามมาตรฐาน IEC 61215 ได้กำหนดค่าความต้านทานฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีค่าสูงกว่า $40 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}^2$ ในสภาวะเปียกชื้น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การเชื่อมต่อกราวด์แบบ Negative Ground แสดงค่ากระแสรั่วไหลและกระแส

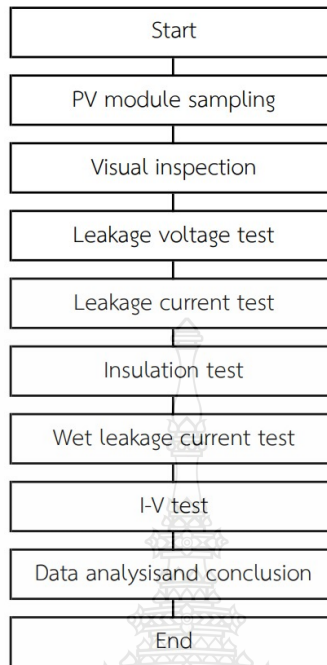
รั่วไหลแบบเปียกน้อยกว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การเชื่อมต่อกราวด์แบบ Floating Ground โดยการเชื่อมต่อกราวด์แบบ Floating Ground จะมีค่าความต้านทานฉนวนต่ำกว่า กระแสรั่วไหลเปียกสูงกว่าระบบอื่น พบว่ากระแสรั่วไหลเฉลี่ยของสตริง คือ 68.9 μA และ 90.9 μA ตามลำดับ นอกจากนี้ การทดสอบกระแสไฟฟ้ารั่วไหลแบบเปียกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยที่ 5.75 μA และ 7.51 μA ตามลำดับ การเชื่อมต่อกราวด์แบบ Negative Ground ความต้านทานของฉนวนที่ระดับโมดูล ระดับสตริง จะมีค่าลดลงภายใต้สภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรสมมูลของ J.C. Hernandez, P.G. Vidal, and A. Medina โดยใช้สูตร $R_{iso} = R_s + R_p / M \times N$ และสูตร $1/R_{iso} = 1 / (R_{s1} + R_{p1}) + 1 / (R_{s2} + R_{p2}) + 1 / (R_{s(M \times N)} + R_{p(M \times N)})$

Florian Roth และคณะ [29] ได้ทำการค้นคว้าและทดสอบความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบุว่ากราวด์แบบเปียกเป็นหนึ่งในสาเหตุความล้มเหลวที่พบบ่อยที่สุดในลำดับการทดสอบ IEC 61646 แม้ว่าขั้นตอนการทดสอบกราวด์แบบเปียกจะอธิบายไว้เกือบแม่นยำในมาตรฐาน IEC 61646 ย่อหน้า 10.15 แต่ค่าต่าง ๆ สำหรับกระแสรั่วไหลทำการทดสอบโดย Module Test and Reliability Center (MTRC) ที่ Oerlikon Solar ได้ทำการทดลองเพื่อค้นหาสาเหตุของความคลาดเคลื่อนตลอดจนพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตั้งค่าการทดลองแล้ว มีข้อบ่งชี้ที่ชัดเจนว่าพารามิเตอร์ที่มีปัจจัยต่อการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าคือ อุณหภูมิของน้ำที่นำมาแช่แผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดสอบ มีผลต่อการวัดขั้นสุดท้ายนั้นถูกประเมินต่ำกว่ามาตรฐาน IEC อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นทางหลักที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลผ่านกระจก มีการกล่าวถึงความหมายของการค้นพบเหล่านี้ พารามิเตอร์ต่อไปมีการวิเคราะห์ว่ามีอิทธิพลต่อกระแสรั่วไหลแบบเปียก / ความต้านทานที่วัดได้ การตั้งค่าอุปกรณ์ ความต้านทานของเหลว แรงตึงผิวของไหล ระดับของเหลว การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (V/s) และอุณหภูมิของเหลว ตามที่อธิบายไว้ใน IEC 61646 วรรค 10.15 มีจุดประสงค์หลักของการทดสอบกระแสรั่วไหลแบบเปียกคือ "การประเมินฉนวนของโมดูลภายใต้สภาวะการทำงานที่เปียกชื้น" ในการทดสอบตามมาตรฐานในหัวข้อ 10.15.2 และ 10.15.3 ซึ่งควรพิจารณาพารามิเตอร์ต่อต่างๆในการวัดดังต่อไปนี้ น้ำหรือสารละลายต้องทำให้พื้นผิวทั้งหมดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แช่อยู่ในสารละลาย โดยน้ำหรือสารละลายต้องมีค่าความต้านทานน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3,500 $\Omega\cdot\text{cm}$ อุณหภูมิของน้ำหรือสารละลายควรอยู่ที่ 22 องศาเซลเซียส ± 3 มีการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลหลายประการต่อการตรวจวัดกระแสรั่วไหลแบบเปียก อุณหภูมิของน้ำถูกระบุเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ช่วงอุณหภูมิที่อนุญาตที่ $22 \pm 3^\circ\text{C}$ ตามมาตรฐาน IEC ช่วยให้สามารถเปลี่ยนแปลงความต้านทานของฉนวนได้ตามลำดับ 50% ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลของโมดูลที่ไม่บุบสลายคือกระแสที่ไหลผ่านกระจก ผลลัพธ์เหล่านี้แนะนำการแก้ไขขั้นตอนการทดสอบ

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอกระบวนการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน เนื่องจากมีความกังวลเกี่ยวกับสมรรถนะในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนซึ่งมีระยะเวลาในการจมน้ำแตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 5 – 8 วัน 2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 8 – 12 วัน จากข้อมูลดังกล่าว พิจารณาแล้วพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มีการจมน้ำเกินกว่าเงื่อนไขที่กำหนดไว้ใน IP 67 ตามมาตรฐาน IEC 60529 Degrees of Protection Provided By Enclosures (IP Code) โดย IP 67 กำหนดให้ทำการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ที่จะทดสอบลงในน้ำโดยมีระดับน้ำสูงเหนือ อุปกรณ์ทดสอบ 1 เมตร เป็นเวลา 30 นาที จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีน้ำหรือความชื้นแทรกซึมเข้าไปในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ จึงดำเนินการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีขั้นตอนการทดสอบอยู่ 7 วิธี คือ 1) สุ่มเลือกกลุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความถูกต้องเหมาะสมตามหลักสถิติโดยอ้างอิงจากตาราง Krejcie & Morgan 2) ตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา 3) Leakage Voltage Test 4) Leakage Current Test 5) Insulation Test 6) Wet Leakage Current Test 7) I-V Test วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ ซึ่งขั้นตอนกระบวนการทดสอบดังกล่าว แสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการทดสอบ

3.1 วิธีการสุ่มเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การสุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการทดสอบ อ้างอิงจากตารางของ Krejcie & Morgan ซึ่งให้ความเชื่อมั่น 95% และผิดพลาดไม่เกิน 5% ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 โดยกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มจะถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้

- 3.1.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำไม่เกิน 8 วัน (กลุ่มที่ 1)
- 3.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำเกิน 8 วัน (กลุ่มที่ 2)
- 3.1.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่จมน้ำ (กลุ่มอ้างอิง)

ตารางที่ 3.1 ตาราง Krejcie & Margan [5]

Population	Sampled population	Population	Sampled population	Population	Sampled population
10	10	220	140	1200	291
15	14	230	144	1300	297
20	19	240	148	1400	302

ตารางที่ 3.1 ตาราง Krejcie & Margan [5]

Population	Sampled population	Population	Sampled population	Population	Sampled population
25	24	250	152	1500	306
30	29	260	155	1600	310
35	32	270	159	1700	313
40	36	280	162	1800	317
45	40	290	165	1900	320
50	44	300	169	2000	322
55	48	320	175	2200	327
60	52	340	181	2400	331
65	56	360	186	2600	335
70	59	380	191	2800	338
75	63	400	196	3000	341
80	66	420	201	3500	346
85	70	440	205	4000	351
90	73	460	210	4500	354
95	76	480	214	5000	357
100	80	500	217	6000	361
110	86	550	226	7000	364
120	92	600	234	8000	367
130	97	650	242	9000	368
140	103	700	248	10000	370
150	108	750	254	15000	375
160	113	800	260	20000	377
170	118	850	265	30000	379
180	123	900	269	40000	380
190	127	950	274	50000	381
200	132	1000	278	75000	382
210	136	1100	285	100000	384

สำหรับการสุ่มเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละกลุ่ม พื้นที่ในการสุ่มโดยให้มีการกระจายตัวของกลุ่มตัวอย่างครอบคลุมพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับจำนวนที่ทำการสุ่มเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำและจำนวนที่สุ่มแต่ละจุดแสดงอยู่ในตารางที่ 3.2 โดยการทดสอบ Leakage voltage test และ Leakage current test ได้มีการกำหนดให้มีการสุ่มกลุ่มตัวอย่างตามตารางของ Krejcie & Morgan

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำที่ทำการสุ่มและทดสอบในแต่ละการทดสอบ

ลำดับ	รายการ	กลุ่มที่ 1 (แผ่น)	กลุ่มที่ 2 (แผ่น)	กลุ่มอ้างอิง (แผ่น)	รวม (แผ่น)
1	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำ	73,558	38,240	-	111,798
2	จำนวนกลุ่มตัวอย่างตามตาราง Krejcie & Morgan	380	380	-	760
3	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สุ่ม	400	400	20	820
4	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตรวจสอบด้วยสายตา	400	400	20	820
5	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำ Leakage voltage test	400	400	20	820
6	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำ Insulation test	400	400	20	820
7	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำ Leakage current test	60	60	10	130
8	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำ Wet Leakage current test	60	60	10	130
9	จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำ I-V test	60	60	10	130

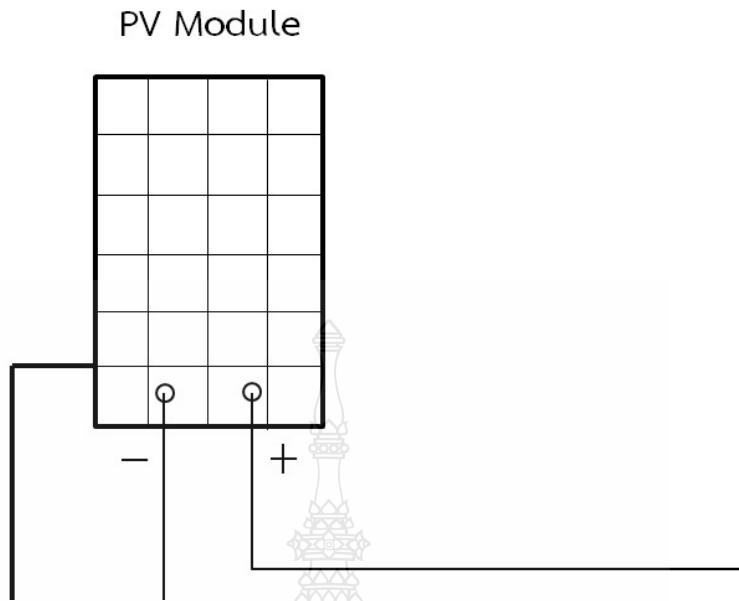
3.2 วิธีการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา

การตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตาตามมาตรฐาน IEC 61215 และ IEC 61646 จะทำการตรวจสอบในสภาพที่มีแสงสว่างเพียงพอเพื่อตรวจสอบความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังต่อไปนี้

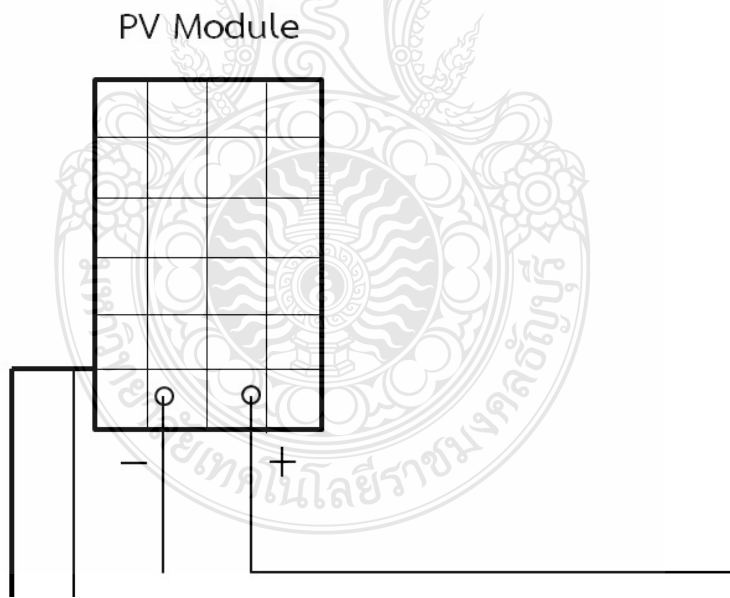
- 3.2.1 รอยแตก หัก บิดเบี้ยว ฉีกขาด ของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 3.2.2 รอยแตกของเซลล์แสงอาทิตย์
- 3.2.3 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผิดปกติ
- 3.2.4 การสัมผัสกันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกันเองหรือการสัมผัสกันของเซลล์แสงอาทิตย์กับเฟรม
- 3.2.5 ความผิดปกติของสารที่ใช้ในการยึดติดเช่น กาว EVA
- 3.2.6 ฟองอากาศใน EVA หรือการลอกตัวของ EVA กับวัสดุที่ยึดติด
- 3.2.7 พื้นผิวที่ผิดปกติของพื้นผิวพลาสติก
- 3.2.8 ความผิดปกติของชิ้นส่วนต่างๆ ที่อาจทำให้เกิดไฟฟ้ารั่วไหลได้
- 3.2.9 รอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 3.2.10 ความผิดปกติอื่นๆ

3.3 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test

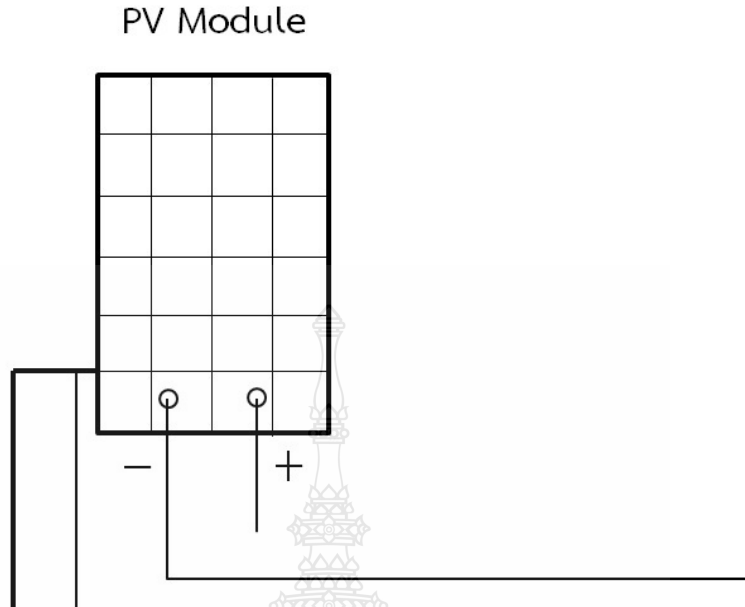
ในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test จะเริ่มด้วยการบันทึกค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากเครื่อง Irradiation and temperature meter จากนั้นใช้ Voltmeter ในย่านวัด DC วัดแรงดันระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อวัดค่า Vdc แล้วบันทึกค่า จากนั้นวัดแรงดันระหว่างขั้วบวกกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยขั้วบวกของ Voltmeter ต่อกับขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และขั้วลบของ Voltmeter ต่อกับเฟรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วบันทึกค่าแรงดันรั่วไหลระหว่างขั้วบวกกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นวัดแรงดันระหว่างขั้วลบกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยขั้วบวกของ Voltmeter ต่อกับขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และขั้วลบของ Voltmeter ต่อกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วบันทึกค่าแรงดันรั่วไหลระหว่างขั้วลบกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.2 วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test เพื่อตรวจวัดค่า Vdc



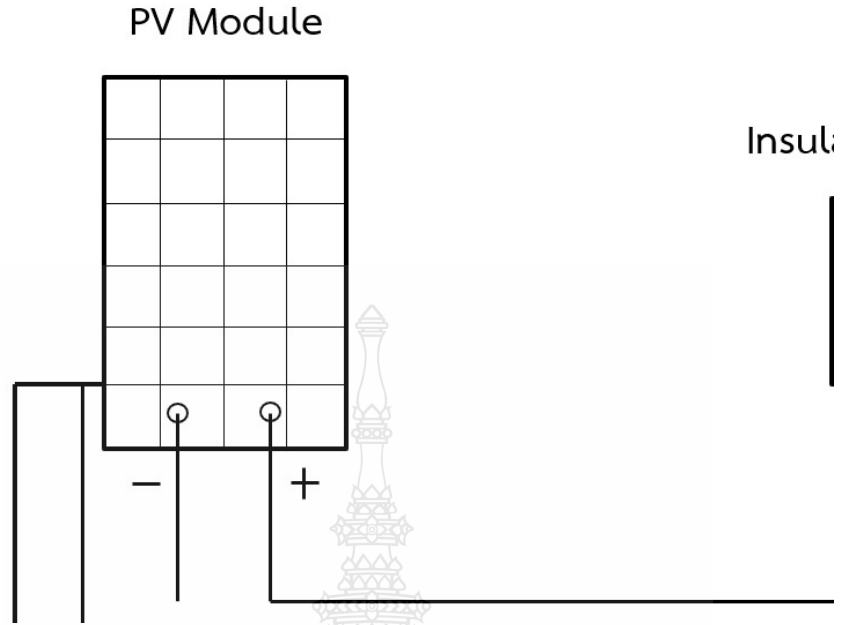
รูปที่ 3.3 วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test เพื่อตรวจวัดแรงดันรั่วไหลระหว่างขั้วบวกกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์



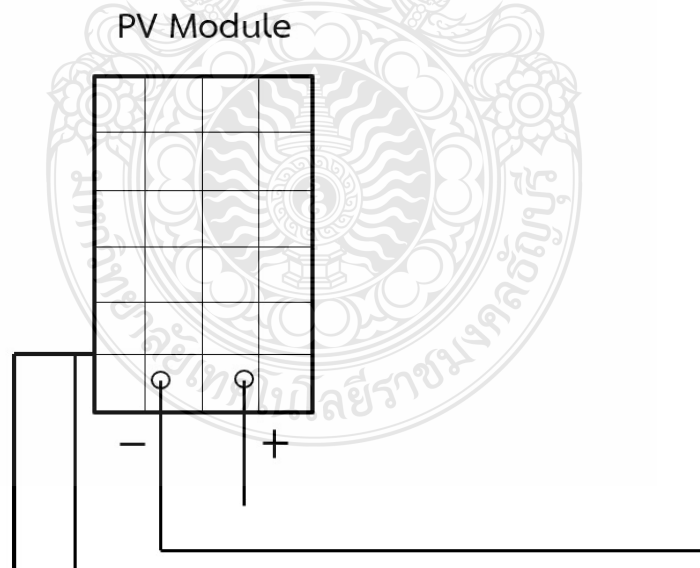
รูปที่ 3.4 วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test เพื่อตรวจวัดแรงดันรั่วไหลระหว่างขั้วลบกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.4 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test

ในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test จะต้องทำการวัดค่าในเวลา กลางคืนหรือต้องมีการปกคลุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ให้มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อ ป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้านแรงดันทดสอบของ เครื่องมือทดสอบ ในการทดสอบนี้จะทำการวัดค่าความต้านทานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยต่อขั้วบวก และโครงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของ Insulation tester ทดสอบที่แรงดัน 1000 Vdc เป็นเวลา 2 นาที แล้วบันทึกค่า จากนั้นต่อขั้วลบและโครงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับ ขั้วบวกและขั้วลบของ Insulation tester ทดสอบที่แรงดัน 1000 Vdc เป็นเวลา 2 นาที แล้วบันทึกค่า จากนั้นนำผลการทดสอบมาคำนวณหาค่าความต้านทาน Array แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจากมาตรฐาน IEC 62446 กำหนดให้ความต้านทาน Array แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องไม่ต่ำกว่า 1 M Ω



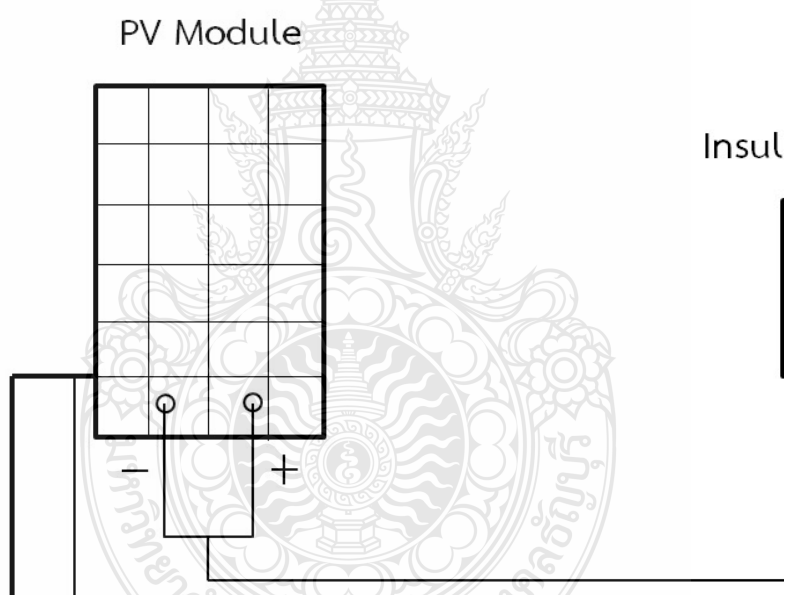
รูปที่ 3.5 วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test การทดสอบความต้านทานฉนวนขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับเฟรม



รูปที่ 3.6 วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test การทดสอบความต้านทานฉนวนขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับเฟรม

3.5 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage current test

ในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage current test จะต้องทำการวัดค่าในเวลากลางคืนหรือต้องมีการปกคลุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ให้มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อน จากแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้านแรงดันทดสอบของเครื่องมือทดสอบ ในการทดสอบนี้จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกับสายไฟฟ้าที่มีขั้วต่อที่สามารถต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เพื่อทำการช็อตขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำขั้วบวกของ Insulation tester ต่อเข้ากับสายดังกล่าวและนำขั้วลบของ Insulation tester ต่อเข้ากับเฟรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากนั้นทำการทดสอบแรงดันที่ 1000 Vdc เป็นเวลา 1 นาที แล้วบันทึกค่า โดย IEC 61215 และ IEC 61646 กำหนด Leakage current ต้องไม่เกิน 1 mAdc หรือเกิดการ Breakdown

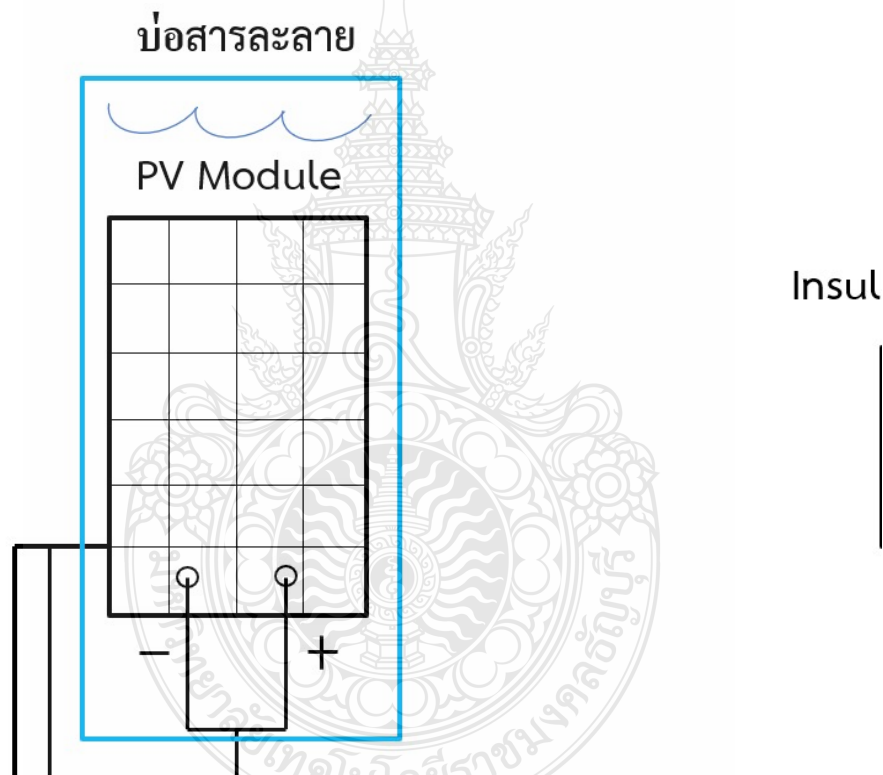


รูปที่ 3.7 วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage current test เพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของแผงเทียบกับโครงแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.6 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Wet leakage current test

ในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Wet leakage current test จะต้องทำการวัดค่าในเวลากลางคืนหรือต้องมีการปกคลุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ให้มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้านแรงดัน

ทดสอบของเครื่องมือทดสอบ ในการทดสอบนี้จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกับสายไฟฟ้าที่มีขั้วต่อที่สามารถต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพื่อทำการช็อตขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปแช่ในบ่อสารละลายที่มีความต้านทานไฟฟ้าไม่เกิน 3.5 kΩ cm อุณหภูมิสารละลาย 22 ± 3 °C โดยแช่แผงเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมสายไฟฟ้าที่ช็อตขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 5 นาที เพื่อให้สารละลายเข้าถึงทุกส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และสายไฟฟ้า จากนั้นต่อสายไฟฟ้าที่ช็อตขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับขั้วบวกของ Insulation tester ส่วนขั้วลบของ Insulation tester นำไปแช่ไว้ในสารละลาย จากนั้นทำการทดสอบที่แรงดัน 1000 Vdc เป็นเวลา 2 นาที แล้วบันทึกค่า

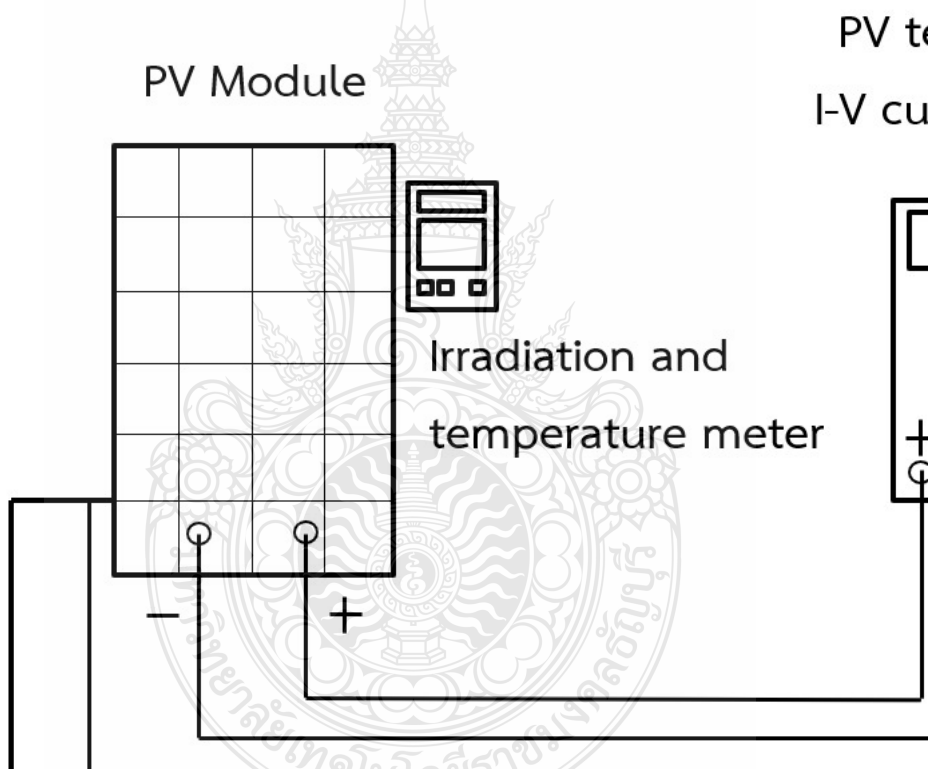


รูปที่ 3.8 วงจรสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Wet leakage current test

3.7 วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี I-V test

ในการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี I-V test จะต้องทำการวัดค่าในสภาวะที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ไม่ต่ำกว่า 700 W/m^2 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการแปลงค่าใน

สภาวะที่วัดจริงไปเป็นค่าที่ STC ในการทดสอบนี้จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทำความสะอาดให้เรียบร้อย ก่อนนำไปตั้งไว้กลางแจ้งโดยหันด้านหน้าแผงไปทางทิศใต้ จากนั้นตากแดดทิ้งไว้อย่างน้อยเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ จากนั้นทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยต่อขั้วบวกและขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของ PV tester with I-V curve tracing และวาง Irradiation and temperature meter ในระนาบเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแผงเข้าบริเวณใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการทดสอบ IV curve ตามโปรแกรมของเครื่อง



รูปที่ 3.9 วงจรสำหรับวิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี I-V test

3.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

ในส่วนของการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ จะนำผลการทดสอบในแต่ละการทดสอบข้างต้นมาทำการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมและทางสถิติเพื่อหาข้อสรุปว่าสภาพของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จมน้ำ ในกลุ่มที่ 1 ระยะเวลา 5 - 8 วัน จำนวน 73,558 แผ่นและกลุ่มที่ 2 ระยะเวลา 8 - 12 วัน จำนวน 38,240 แผ่นนั้นยังคงมีสมรรถนะและคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งานและยังมีความปลอดภัยในการใช้งานอยู่หรือไม่



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ จะนำผลการทดสอบในแต่ละการทดสอบข้างต้นมาทำการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมและทางสถิติเพื่อหาข้อสรุปว่าสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่โดนน้ำท่วม หลังจากน้ำลดลงแล้วนั้นยังคงสมรรถนะและคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งานอยู่หรือไม่

4.2 ผลการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา (Visual inspection)

จากการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตาตามมาตรฐาน IEC 61215 ในสถานะที่มีแสงสว่างเพียงพอของ ของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มได้ผลการตรวจสอบดังต่อไปนี้

3.1.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจมน้ำไม่เกิน 8 วัน จำนวน 400 แผ่น (กลุ่มที่ 1) ไม่พบความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผ่น

3.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจมน้ำเกิน 8 วัน จำนวน 400 แผ่น (กลุ่มที่ 2) ไม่พบความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผ่น

3.1.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งไม่จมน้ำ จำนวน 20 แผ่น (กลุ่มอ้างอิง) ไม่พบความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผ่น

4.3 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage voltage test

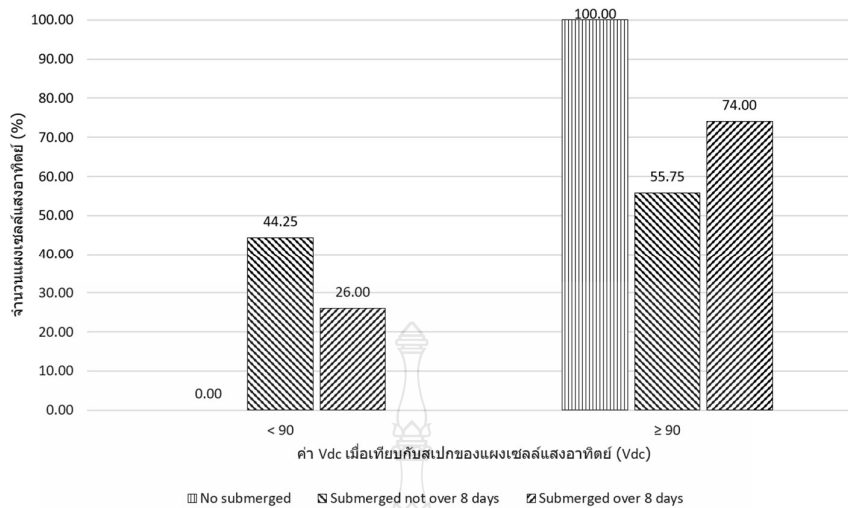
จากผลการทดสอบ Leakage voltage test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกสามารถแบ่งผลการทดสอบได้ 2 กลุ่มตามค่าที่ตรวจวัด

4.3.1 ค่า V_{OC} สรุปลค่า V_{OC} และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มีอยู่หลายรุ่นและแต่ละรุ่นมีค่า V_{OC} ไม่เท่ากัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบสมรรถนะและคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้จึงต้องใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ $V_{OC @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกเป็นหลักในการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 เมื่อวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ของ $V_{OC @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ $V_{OC @STC}$ เมื่อเทียบกับ

สเปกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 102.51% และมีค่าเฉลี่ยที่ 81.72% กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 98.61% และมีค่าเฉลี่ยที่ 70.64% และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 98.52 – 99.83% และมีค่าเฉลี่ยที่ 98.52% ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกสุ่มกลุ่มที่ 1 มีสมรรถนะและคุณภาพลดลงไปมากกว่าปกติพอสมควรโดยมีค่า V_{OC} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ย 18.28% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า V_{OC} กว้างถึง 102.51% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า V_{OC} ในกลุ่มตัวอย่างที่สูงมาก กลุ่มที่ 2 มีสมรรถนะและคุณภาพลดลงไปมากกว่าปกติค่อนข้างมากโดยมีค่า V_{OC} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ย 29.36% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า V_{OC} กว้างถึง 98.61% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า V_{OC} ในกลุ่มตัวอย่างที่สูงมาก และกลุ่มอ้างอิงมีสมรรถนะและคุณภาพแทบจะไม่ลดลงเลยโดยมีค่า V_{OC} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ยเพียง 1.48% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า V_{OC} แคบมากเพียง 1.31% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า V_{OC} ในกลุ่มตัวอย่างที่ต่ำมาก เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ของ $V_{OC@STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 11 พบว่ากลุ่มที่ 1 มีการกระจายตัวของค่า V_{OC} ที่หนาแน่นในช่วง >95% ซึ่งมีจำนวนถึง 46.50% และช่วง >60 – 65% ซึ่งมีจำนวนถึง 21.25% ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 10.00% กลุ่มที่ 2 มีการกระจายตัวของค่า V_{OC} ที่หนาแน่นในช่วง >60 – 65% ซึ่งมีจำนวนถึง 30.75% และช่วง >95% >65 – 70% ≤50% ซึ่งมีจำนวน 18.00% 14.50% 12.00% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 10.00% และกลุ่มอ้างอิงมีการกระจายตัวของค่า V_{OC} ทั้งหมดในช่วง >95%

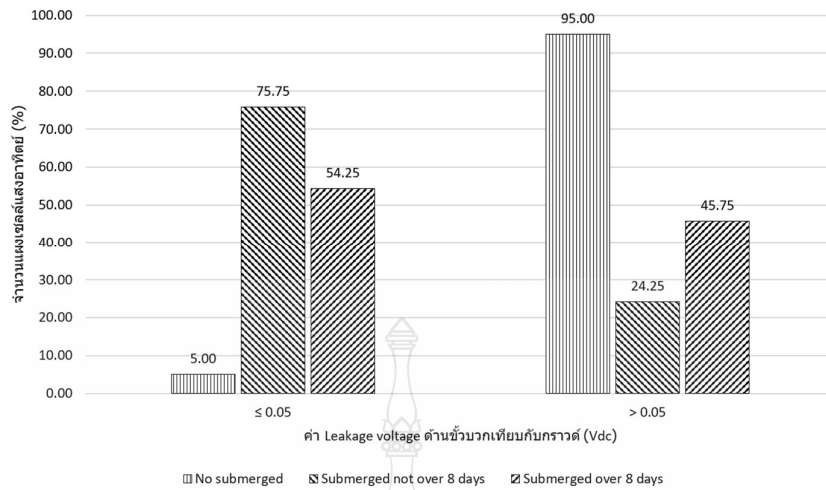
ตารางที่ 4.1 สรุปค่า V_{OC} และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือก

รายการ	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มอ้างอิง
1 ช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ทดสอบ (W/m^2)	466.00 – 856.00	514.00 – 940.00	860.00
2 ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ทดสอบเฉลี่ย (W/m^2)	674.95	719.70	860.00
3 ช่วงอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ($^{\circ}C$)	43.00 – 57.00	40.00 – 58.00	55.00
4 อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย ($^{\circ}C$)	50.80	50.35	55.00
5 ช่วงค่า V_{OC} ที่วัดได้ (V_{DC})	0.0 – 40.9	0.00 – 40.72	40.03 – 40.62
6 ค่า V_{OC} ที่วัดได้เฉลี่ย (V_{DC})	33.26	28.98	40.28
7 ช่วงค่า $V_{OC@STC}$ (V_{DC})	0.00 – 46.59	0.00 – 45.01	44.78 – 45.37
8 ค่า $V_{OC@STC}$ เฉลี่ย (V_{DC})	37.17	32.22	45.03
9 ช่วง % $V_{OC@STC}$ เมื่อเทียบกับสเปก (%)	0.00 – 102.51	0.00 – 98.61	98.52 – 99.83
10 % $V_{OC@STC}$ เฉลี่ยเมื่อเทียบกับสเปก (%)	81.72	70.64	98.52

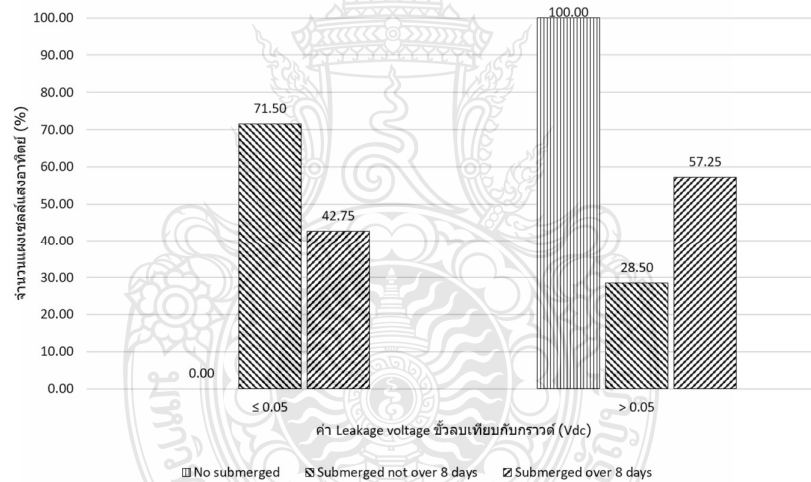


รูปที่ 4.1 กราฟค่าเปอร์เซ็นต์ของ $V_{OC@STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผง

4.3.2 ค่า Leakage voltage เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า Leakage voltage ของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่า Leakage voltage ด้านซ้ายบวกเทียบกับกราวด์ของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง $0.00 - 0.50 V_{DC}$ และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเฉลี่ยที่ $0.04 V_{DC}$ กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง $0.00 - 0.47 V_{DC}$ และมีค่าเฉลี่ยที่ $0.05 V_{DC}$ และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง $0.05 - 0.31 V_{DC}$ และมีค่าเฉลี่ยที่ $0.11 V_{DC}$ ด้านซ้ายลบเทียบกับกราวด์ของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง $0.00 - 0.97 V_{DC}$ และมีค่าเฉลี่ยที่ $0.05 V_{DC}$ กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง $0.00 - 0.86 V_{DC}$ และมีค่าเฉลี่ยที่ $0.06 V_{DC}$ และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง $0.06 - 0.30 V_{DC}$ และมีค่าเฉลี่ยที่ $0.12 V_{DC}$ จากข้อมูลเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มมีค่า Leakage voltage อยู่ในเกณฑ์ปกติ เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของค่า Leakage voltage ด้านซ้ายบวกเทียบกับกราวด์ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 และด้านซ้ายลบเทียบกับกราวด์ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าค่า Leakage voltage ด้านซ้ายบวกเทียบกับกราวด์และด้านซ้ายลบเทียบกับกราวด์ของกลุ่มที่ 1 และ 2 มีการกระจายตัวของค่า Leakage voltage ที่หนาแน่นในช่วง $\leq 0.05 - 0.10 V_{DC}$ ซึ่งมีจำนวน $\geq 92.00\%$ ในขณะที่ค่า Leakage voltage ด้านซ้ายบวกเทียบกับกราวด์และด้านซ้ายลบเทียบกับกราวด์ของกลุ่มอ้างอิงการกระจายตัวของค่า Leakage voltage ที่หนาแน่นในช่วง $> 0.05 - \geq 0.1.5 V_{DC}$ ซึ่งมีจำนวน $\geq 85.00\%$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มอ้างอิงมีการกระจายตัวของค่า Leakage voltage มากกว่ากลุ่มที่ 1 และ 2 เล็กน้อยเท่านั้น จากผลการทดสอบ Leakage voltage บ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มมีสมรรถนะและคุณภาพของฉนวนในเกณฑ์ปกติเมื่อใช้งานที่สภาวะแผงเซลล์แสงอาทิตย์แห้ง



รูปที่ 4.2 กราฟค่า Leakage voltage ด้านขั้วบวกเทียบกับกราวด์



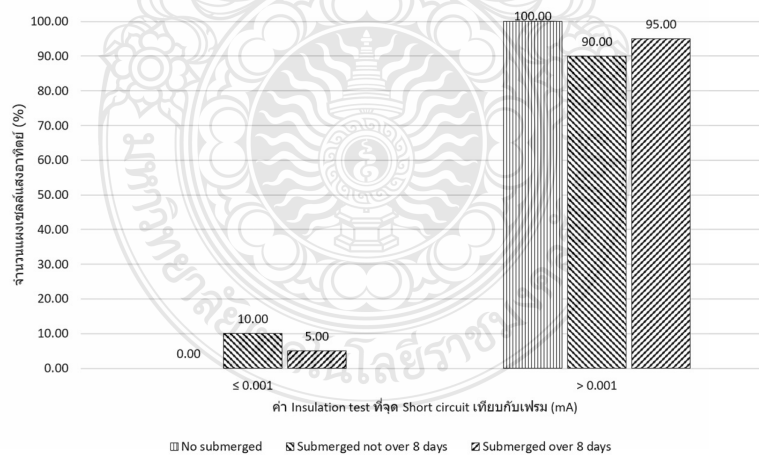
รูปที่ 4.3 กราฟค่า Leakage voltage ด้านขั้วลบเทียบกับกราวด์

4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Insulation test

จากผลการทดสอบ Leakage voltage test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกสามารถแบ่งผลการทดสอบได้ 2 กลุ่มตามค่าที่ตรวจวัด

4.4.1 ค่า Leakage current: เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า Leakage current ของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่า Leakage current ของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 0.02 mA_{DC} และมีค่าเฉลี่ยที่ 0.004 mA_{DC} โดยไม่มีการ Breakdown ของฉนวนแผงเซลล์

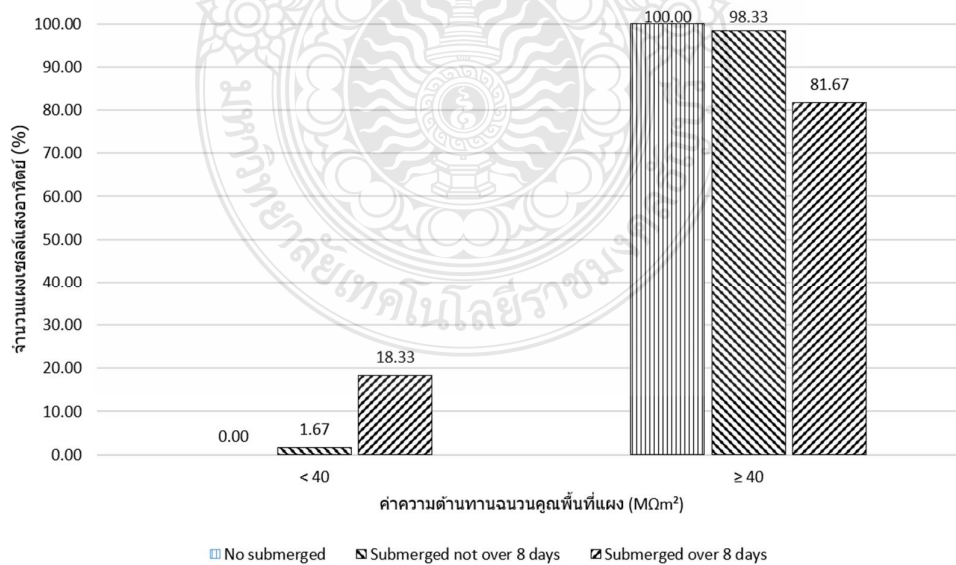
แสงอาทิตย์ กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 – 1.00 mA_{DC} และมีค่าเฉลี่ยที่ 0.027 mA_{DC} โดยมีการ Breakdown ของฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 0.002 – 0.004 mA_{DC} และมีค่าเฉลี่ยที่ 0.003 mA_{DC} โดยไม่มีการ Breakdown ของฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของค่า Leakage current ของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่ม ทั้ง 3 กลุ่มซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่ากลุ่มที่ 1 มีการกระจายตัวของค่า Leakage current ที่หนาแน่น ในช่วง >0.001 – 0.004 และ >0.004 – 0.007 mA_{DC} ซึ่งมีจำนวน 53.33% และ 28.33% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 10.00% กลุ่มที่ 2 มีการกระจายตัวของค่า Leakage current ที่หนาแน่นในช่วง >0.001 – 0.004 >0.004 – 0.007 และ >0.007 – 0.010 mA_{DC} ซึ่งมีจำนวน 36.67% 23.33% และ 16.67% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 10.00% และกลุ่มอ้างอิง มีการกระจายตัวของค่า Leakage current ที่หนาแน่นในช่วง >0.001 – 0.004 mA_{DC} ซึ่งมีจำนวน 100.00% จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่ม อ้างอิงมีการคงสภาพของฉนวนดีที่สุดในลำดับด้วยกลุ่มที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่าง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม สามารถทนแรงดันทดสอบที่ 1 kV_{DC} เป็นเวลา 1 นาที ได้ ตามมาตรฐาน IEC 61215 (Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval) เกือบทั้งหมด ยกเว้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มที่ 2 จำนวน 1.67% ซึ่งมีการ Breakdown ขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 4.4 กราฟค่า Insulation test ของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่ม

4.4.2. ค่าความต้านทานฉนวนคุณภาพพื้นที่แผง เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานฉนวนคุณภาพพื้นที่แผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่าความต้านทานฉนวนคุณภาพ

พื้นที่แผงของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 514.10 – 8148.00 MΩm² และมีค่าเฉลี่ยที่ 3445.80 MΩm² กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 11240.40 MΩm² และมีค่าเฉลี่ยที่ 3253.87 MΩm² และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 4017.74 – 6790.00 MΩm² และมีค่าเฉลี่ยที่ 5212.97 MΩm² เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณสมบัติแผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ากลุ่มที่ 1 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณสมบัติแผงที่หนาแน่นในช่วง >4000 – 5500 MΩm² >1000 – 2500 MΩm² และ >2500 – 4000 MΩm² ซึ่งมีจำนวนถึง 33.00% 33.00% และ 26.67% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 8.33% กลุ่มที่ 2 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณสมบัติแผงที่หนาแน่นในช่วง >1000 – 2500 MΩm² >4000 – 5500 MΩm² และ ≤1000 MΩm² ซึ่งมีจำนวนถึง 35.00% 23.33% และ 18.33% ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 13.33% และกลุ่มอ้างอิง มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณสมบัติแผงที่หนาแน่นในช่วง >4000 – 5500 MΩm² และ >5500 – 7000MΩm² ซึ่งมีจำนวนถึง 80.00% และ 20.00% ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงมีการคงสภาพของฉนวนดีที่สุดตามมาด้วยกลุ่มที่ 1 และ 2 ซึ่งมีการคงสภาพของฉนวนใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่ากลุ่มอ้างอิงพอสมควร นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มยังมีค่าความต้านทานฉนวนคุณสมบัติแผงสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ที่ต้องไม่ต่ำกว่า 40.00 MΩm² เกือบทั้งหมด ยกเว้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มที่ 2 จำนวน 1.67% ซึ่งมีการ Breakdown ขณะทำการทดสอบ



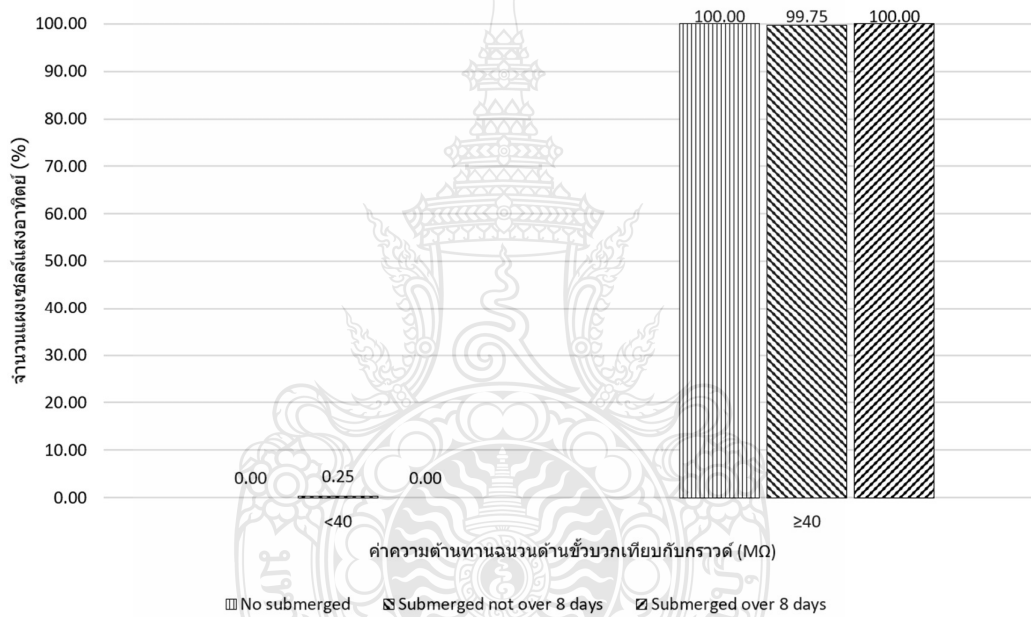
รูปที่ 4.5 กราฟค่าความต้านทานฉนวนคุณสมบัติแผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่ม

จากผลการทดสอบ Insulation test บ่งชี้ว่ากลุ่มอ้างอิงมีการคงสภาพของฉนวนดีที่สุดตามมาด้วยกลุ่มที่ 1 และ 2 ซึ่งมีการคงสภาพของฉนวนใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่ากลุ่มอ้างอิงพอสมควร นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มยังสามารถทนแรงดันทดสอบที่ 1 kV_{DC} เป็นเวลา 1 นาที และมีค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 เกือบทั้งหมดเมื่อใช้งานที่สภาวะแผงเซลล์แสงอาทิตย์แห้ง ยกเว้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มที่ 2 จำนวน 1.67% ซึ่งมีการ Breakdown ขณะทำการทดสอบ

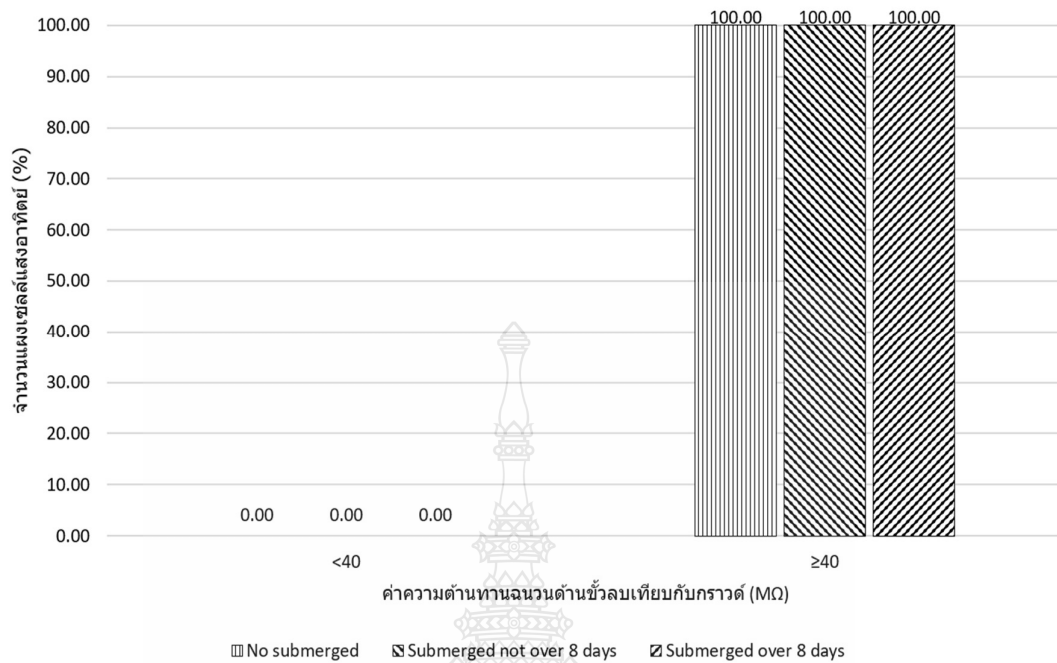
4.5 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Leakage current test

จากผลการทดสอบ Leakage current test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกพบว่าค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วบวกเทียบกับกราวด์ของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 260.00 – 4100.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 1699.53 M Ω กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 603.00 – 2860.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 1810.06 M Ω และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 2049.00 – 4500.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 3007.45 M Ω ส่วนค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วลบเทียบกับกราวด์ของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 165.00 – 4200.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 1890.49 M Ω กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 499.00 – 3600.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 2015.38 M Ω และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 2300.00 – 4700.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 3145.00 M Ω เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วบวกเทียบกับกราวด์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่ากลุ่มที่ 1 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนที่หนาแน่นในช่วง >1000 – 1500 M Ω >1500 – 2000 M Ω และ >2000 – 2500 M Ω ซึ่งมีจำนวนถึง 29.75% 27.25% และ 24.50% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 11.50% กลุ่มที่ 2 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนที่หนาแน่นในช่วง >1500 – 2000 M Ω >2000 – 2500 M Ω และ >1000 – 1500 M Ω ซึ่งมีจำนวนถึง 43.00% 35.75% และ 16.75% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 3.50% และกลุ่มอ้างอิง มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนที่หนาแน่นในช่วง >2500 – 3000 M Ω และ \geq 3000 M Ω ซึ่งมีจำนวนถึง 40.00% และ 40.00% ตามลำดับ ส่วนอีก 20% ที่เหลืออยู่ในช่วง >2000 – 2500 M Ω ส่วนการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วลบเทียบกับกราวด์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่ากลุ่มที่ 1 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนที่หนาแน่นในช่วง 1500 – 2000 M Ω >1000 – 1500 M Ω และ >2000 – 2500 M Ω ซึ่งมีจำนวนถึง 28.75% 22.50% และ 22.50% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 11.75% กลุ่มที่ 2 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนที่หนาแน่นในช่วง >2000 – 2500 M Ω >1500 – 2000 M Ω และ >1000 – 1500 M Ω ซึ่งมีจำนวนถึง 46.75% 27.00% และ

14.25% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 9.00% และกลุ่มตัวอย่าง มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนที่หนาแน่นในช่วง >2500 – 3000 MΩ และ ≥3000 MΩ ซึ่งมีจำนวนถึง 55.00% และ 40.00% ตามลำดับ ส่วนอีก 5.00% ที่เหลืออยู่ในช่วง >2000 – 2500 MΩ จากการวิเคราะห์ด้านบซีให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกสุ่มกลุ่มอ้างอิง มีการคงสภาพของฉนวนดีที่สุดและมีช่วงการกระจายของค่าความต้านทานฉนวนแคบสุดที่ประมาณ 2451 MΩ กลุ่มที่ 2 มีการคงสภาพของฉนวนรองลงมาและมีช่วงการกระจายของค่าความต้านทานฉนวนประมาณ 3101 MΩ และกลุ่มที่ 1 มีการคงสภาพของฉนวนแย่มากที่สุดและมีช่วงการกระจายของค่าความต้านทานฉนวนประมาณ 4035 MΩ



รูปที่ 4.6 กราฟค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วบวกเทียบกับกราวด์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

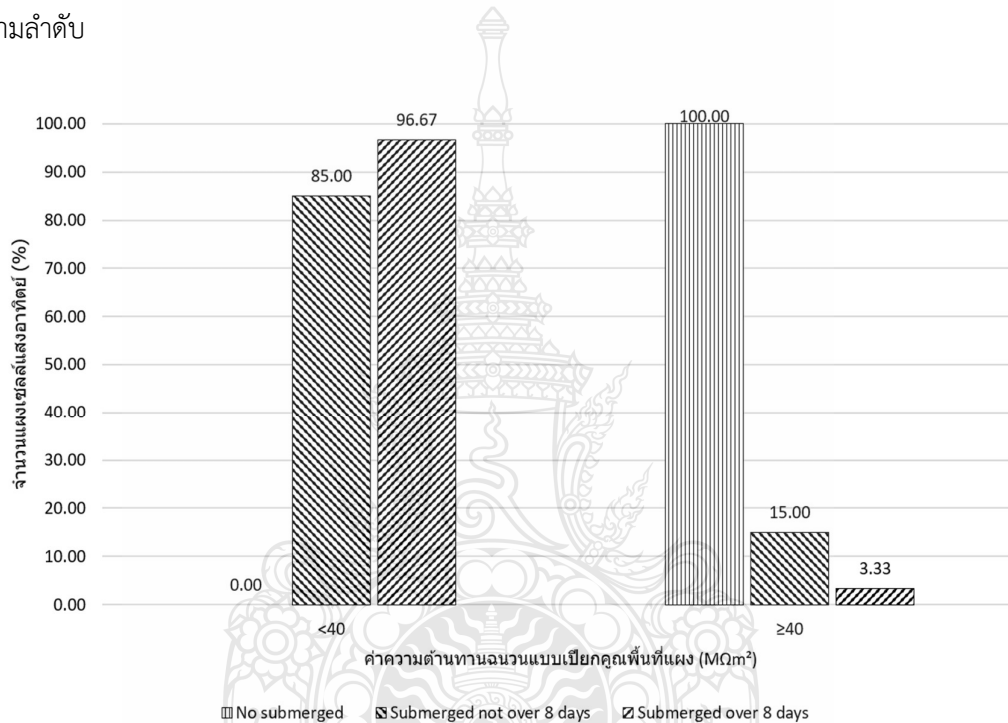


รูปที่ 4.7 กราฟค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วลบเทียบกับกราวด์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.6 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Wet leakage current test

จากผลการทดสอบ Wet leakage current test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกพบว่าค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 165.09 MΩm² และมีค่าเฉลี่ยที่ 28.40 MΩm² กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 126.94 MΩm² และมีค่าเฉลี่ยที่ 17.39 MΩm² และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 46.75 – 1245.48 MΩm² และมีค่าเฉลี่ยที่ 667.13 MΩm² เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มซึ่งแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่ากลุ่มที่ 1 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงที่หนาแน่นในช่วง <40 MΩm² ซึ่งมีจำนวนถึง 85.00% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 15.00% กลุ่มที่ 2 มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงที่หนาแน่นในช่วง <40 MΩm² ซึ่งมีจำนวนถึง 96.67% ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 3.33% และกลุ่มอ้างอิง มีการกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงที่หนาแน่นในช่วง ≥940 MΩm² >340 – 490 MΩm² และ >40 – 190 MΩm² ซึ่งมีจำนวนถึง 40.00% 30.00% และ 20.00% ตามลำดับส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 10.00% จากผลการ

วิเคราะห์จะเห็นได้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงมีการคงสภาพของฉนวนเมื่อแช่อยู่ในสารละลายที่ดีที่สุดและค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ที่ต้องไม่ต่ำกว่า 40.00 MΩm² ทุกแผง (100%) ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่สามารถคงสภาพของฉนวนเมื่อแช่อยู่ในสารละลายได้ โดยมีค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ที่ต้องไม่ต่ำกว่า 40.00 MΩm² เป็นจำนวนถึง 85.00% และ 96.67% ตามลำดับ นอกจากนี้กลุ่มที่ 1 และ 2 ยังมีแผง Breakdown ขณะทำการทดสอบจำนวน 5.00% และ 10.00% ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม

จากผลการทดสอบ Wet leakage current test บ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงเท่านั้นที่คงสภาพของฉนวนในสถานะที่แช่อยู่ในสารละลายให้มีค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ซึ่งต้องไม่ต่ำกว่า 40.00 MΩm² ได้ทุกแผง (100%) ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 จำนวน 85.00% และ 96.67% ตามลำดับไม่สามารถคงสภาพของฉนวนเมื่อแช่อยู่ในสารละลายให้มีค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงได้ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสถานะเปียกชื้น

4.7 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี I-V test

สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดสอบ I-V test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

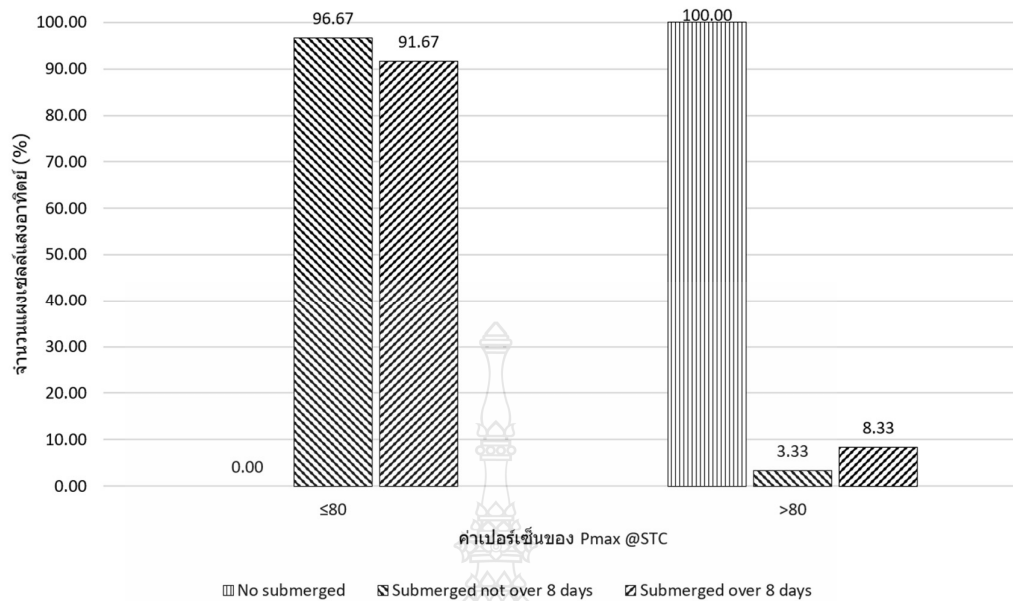
ตารางที่ 4.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดสอบ I-V test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือก

รายการ	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มอ้างอิง
1 ช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ทดสอบ (W/m ²)	714.30 – 935.10	498.80 – 930.00	851.50 – 878.70
2 ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ทดสอบเฉลี่ย (W/m ²)	806.78	851.16	851.50
3 ช่วงอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (°C)	46.04 – 64.19	45.05 – 63.50	58.15 – 60.95
4 อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย (°C)	58.39	54.30	59.70
5 ช่วงค่า V _{oc} ที่วัดได้ (V _{DC})	0.00 – 40.40	0.00 – 40.30	39.10 – 40.20
6 ค่า V _{oc} ที่วัดได้เฉลี่ย (V _{DC})	27.47	23.35	39.33
7 ช่วงค่า I _{sc} ที่ทำการวัดได้ (A _{DC})	0.00 – 8.35	0.00 – 8.33	7.59 – 7.94
8 ค่า I _{sc} ที่ทำการวัดได้เฉลี่ย (A _{DC})	6.72	6.02	7.84
9 ช่วงค่า V _{mpp} ที่ทำการวัดได้ (V _{DC})	0.00 – 34.93	0.00 – 31.53	30.32 – 31.48
10 ค่า V _{mpp} ที่ทำการวัดได้เฉลี่ย (V _{DC})	18.94	15.91	30.73
11 ช่วงค่า I _{mpp} ที่ทำการวัดได้ (A _{DC})	0.00 – 7.67	0.00 – 7.69	7.04 – 7.36
12 ค่า I _{mpp} ที่ทำการวัดได้เฉลี่ย (A _{DC})	6.24	5.57	7.25
13 ช่วงค่า P _{max} ที่ทำการวัดได้ (W _{DC})	0.00 – 230.90	0.00 – 236.20	216.60 – 225.90
14 ค่า P _{max} ที่ทำการวัดได้เฉลี่ย (W _{DC})	118.80	97.29	222.74
15 ช่วงค่า Voc @STC (V _{DC})	0.00 – 46.12	0.00 – 47.63	45.28 – 46.45
16 ค่า Voc @STC เฉลี่ย (V _{DC})	33.04	27.41	45.78
17 ช่วงค่า I _{sc} @STC (A _{DC})	0.00 – 8.87	0.00 – 9.30	8.75 – 8.98
18 ค่า I _{sc} @STC เฉลี่ย (A _{DC})	8.21	6.87	8.90
19 ช่วงค่า V _{mpp} @STC (V _{DC})	0.00 – 42.07	0.00 – 36.30	35.19 – 36.37
20 ค่า V _{mpp} @STC เฉลี่ย (V _{DC})	22.82	18.83	35.77
21 ช่วงค่า I _{mpp} @STC (A _{DC})	0.00 – 8.31	0.00 – 8.84	8.05 – 8.31
22 ค่า I _{mpp} @STC เฉลี่ย (A _{DC})	7.62	6.40	8.23
23 ช่วงค่า P _{max} @STC (W _{DC})	0.00 – 298.32	0.00 – 297.14	291.04 – 302.09
24 ค่า P _{max} @STC เฉลี่ย (W _{DC})	174.80	132.36	294.32

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดสอบ I-V test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่
ถูกสุ่มเลือก (ต่อ)

รายการ	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มอ้างอิง
25 ช่วงเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปก (%)	714.30 – 935.10	498.80 – 930.00	851.50 – 878.70
26 เปอร์เซ็นของ $P_{max @STC}$ เฉลี่ยเมื่อเทียบกับสเปก (%)	806.78	851.16	851.50

เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ภูน้ำท่วมมีอยู่หลายรุ่น และแต่ละรุ่นมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่เท่ากัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบสมรรถนะและคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้จึงต้องใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกเป็นหลักในการเปรียบเทียบ จากผลการทดสอบ I-V test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 96.23% และมีค่าเฉลี่ยที่ 56.01% โดยมี 1.67% ไม่มีแรงดันไฟฟ้าออก กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 92.86% และมีค่าเฉลี่ยที่ 42.27% โดยมี 5.00% ไม่มีแรงดันไฟฟ้าออก และกลุ่มอ้างอิงมีค่าอยู่ในช่วง 93.88 – 97.45% และมีค่าเฉลี่ยที่ 94.94% ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกสุ่มกลุ่มที่ 1 มีสมรรถนะและคุณภาพลดลงไปมากกว่าปกติค่อนข้างมากโดยมีค่า P_{max} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ย 43.99% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า P_{max} กว้างถึง 96.23% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า P_{max} ในกลุ่มตัวอย่างที่สูงมาก กลุ่มที่ 2 มีสมรรถนะและคุณภาพลดลงไปมากกว่าปกติมากโดยมีค่า P_{max} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ย 57.73% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า P_{max} กว้างถึง 92.86% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า P_{max} ในกลุ่มตัวอย่างที่สูงมาก และกลุ่มอ้างอิงมีสมรรถนะและคุณภาพลดลงไปเล็กน้อยโดยมีค่า P_{max} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ยเพียง 5.06% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า P_{max} แคบมากเพียง 3.57% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า P_{max} ในกลุ่มตัวอย่างที่ต่ำมาก เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 21 พบว่ากลุ่มที่ 1 มีการกระจายตัวของค่า P_{max} ที่หนาแน่นในช่วง >60 – 70 % ซึ่งมีจำนวนถึง 66.67% และช่วง >20 – 30% ซึ่งมีจำนวนถึง 11.67% ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 8.33% กลุ่มที่ 2 มีการกระจายตัวของค่า P_{max} ที่หนาแน่นในช่วง >60 – 70% >20 – 30% ≤10% และ >50 – 60% ซึ่งมีจำนวนถึง 26.67% 25.00% 18.33% และ 13.33% ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวในช่วงอื่นๆ มีจำนวนไม่เกิน 5.00% และกลุ่มอ้างอิงมีการกระจายตัวของค่า P_{max} ทั้งหมดในช่วง >90%



รูปที่ 4.9 กราฟค่าเปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดสอบ I-V test บ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงเท่านั้นที่มีกำลังไฟฟ้า สรรถนะ และคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดีที่สุดในค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax @STC เมื่อเทียบกับสเปกลดลงเฉลี่ยเพียง 5.06% อีกทั้งยังมีการกระจายของค่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax @STC เมื่อเทียบกับสเปกที่แคบมากเพียง 3.57% ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 มีกำลังไฟฟ้า สรรถนะ และคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงไปมากโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax @STC เมื่อเทียบกับสเปกลดลงเฉลี่ยถึง 43.99% และ 57.73% ตามลำดับ อีกทั้งยังมีการกระจายของค่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax @STC เมื่อเทียบกับสเปกที่กว้างมากเกินไป 92.80% ขึ้นไป ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

จากการทดสอบและการวิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีระยะเวลาในการจมน้ำแตกต่างกันและแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 5 – 8 วัน 2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นเวลา 8 – 12 วัน ซึ่งมีการจมน้ำเกินกว่าเงื่อนไขที่กำหนดไว้ใน IP 67 ตามมาตรฐาน IEC 60529 Degrees of Protection Provided By Enclosures (IP Code) โดย IP 67 กำหนดให้ทำการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ที่จะทดสอบลงในน้ำโดยมีระดับน้ำสูงเหนืออุปกรณ์ทดสอบ 1 เมตร เป็นเวลา 30 นาที จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีน้ำหรือความชื้นแทรกซึมเข้าไปในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ จึงดำเนินการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีขั้นตอนการทดสอบอยู่ 7 วิธี คือ 1) สุ่มเลือกกลุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความถูกต้องเหมาะสมตามหลักสถิติโดยอ้างอิงจากตาราง Krejcie & Morgan 2) ตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา 3) Leakage Voltage Test 4) Leakage Current Test 5) Insulation Test 6) Wet Leakage Current Test 7) I-V Test เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบแล้ว สามารถสรุปผลการทดสอบได้ในหัวข้อที่ 5.2

5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบทั้ง 7 วิธี ได้บ่งชี้ให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงเท่านั้นที่มีสมรรถนะและคุณภาพเหมาะสมในการนำไปใช้งานในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากมีสมรรถนะและคุณภาพไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61215 และ IEC 62446 ในหัวข้อ Wet leakage current test และ I-V Test

5.2.1 การตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา (Visual inspection) การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 61215 โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มเลือกมีสภาพทางกายภาพเป็นปกติไม่มีความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามที่ระบุในมาตรฐาน IEC 61215

5.2.2 Leakage voltage test การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะ คุณภาพและคุณภาพของฉนวนในสถานะแห้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้นผ่านค่าเปอร์เซ็นต์ของ $V_{OC @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกและค่า Leakage voltage โดยค่าเปอร์เซ็นต์ของ $V_{OC @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มตัวอย่างของแผง

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสุ่มกลุ่มที่ 1 มีค่า V_{OC} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ย 18.28% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า V_{OC} กว้างถึง 102.51% กลุ่มที่ 2 มีค่า V_{OC} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ย 29.36% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า V_{OC} กว้างถึง 98.61% และกลุ่มควบคุมมีค่า V_{OC} ที่ลดลงจากสเปกเฉลี่ยเพียง 1.48% และมีช่วงของการกระจายตัวของค่า V_{OC} แคบมากเพียง 1.31% ส่วนค่า Leakage voltage กลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มมีค่า Leakage voltage อยู่ในเกณฑ์ปกติ จากผลการทดสอบเหล่านี้ชี้ให้เห็นในเบื้องต้นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มควบคุมมีสมรรถนะและคุณภาพดีที่สุดในรองลงมาคือกลุ่มที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนและคุณภาพของฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้นพบว่าทั้ง 3 กลุ่มอยู่ในเกณฑ์ปกติ

5.2.3 Leakage current test การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะและคุณภาพของฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะแห้งเบื้องต้นผ่านค่าความต้านทานฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยค่าความต้านทานฉนวนด้านขั้วบวกและลบเทียบกับกราวด์ของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 165.00 – 4200.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 1699.53 M Ω และ 1890.49 M Ω ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 499.00 – 3600.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 1810.06 M Ω และ 2015.38 M Ω ตามลำดับ และกลุ่มควบคุมมีค่าอยู่ในช่วง 2049.00 – 4700.00 M Ω และมีค่าเฉลี่ยที่ 3007.45 M Ω และ 3145.00 M Ω ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาคำนวณค่าความต้านทานฉนวนของอะเรย์แผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มที่ 1 ได้เท่ากับ 0.59 M Ω กลุ่มที่ 2 ได้เท่ากับ 0.68 M Ω และกลุ่มควบคุมได้เท่ากับ 1.19 M Ω จากผลการทดสอบเหล่านี้บ่งชี้ว่ากลุ่มควบคุมมีการคงสภาพของฉนวนดีที่สุดในรองลงมาคือกลุ่มที่ 1 และ 2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานที่สถานะแผงเซลล์แสงอาทิตย์แห้ง รองลงมาเป็นกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามทั้งกลุ่มที่ 1 และ 2 ยังมีความต้านทานฉนวนต่ำกว่าที่กำหนดไว้ใน IEC 62446

5.2.4 Insulation test การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะและคุณภาพของฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะแห้งผ่านค่า Leakage current และ ค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผง โดยค่า Leakage current ของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 0.02 mA_{DC} และมีค่าเฉลี่ยที่ 0.004 mA_{DC} กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 – 1.00 mA_{DC} และมีค่าเฉลี่ยที่ 0.027 mA_{DC} โดยมีการ Breakdown ของฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง และกลุ่มควบคุมมีค่าอยู่ในช่วง 0.002 – 0.004 mA_{DC} และมีค่าเฉลี่ยที่ 0.003 mA_{DC} ส่วนค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 514.10 – 8148.00 M Ω m² และมีค่าเฉลี่ยที่ 3445.80 M Ω m² กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 11240.40 M Ω m² และมีค่าเฉลี่ยที่ 3253.87 M Ω m² และกลุ่มควบคุมมีค่าอยู่ในช่วง 4017.74 – 6790.00 M Ω m² และมีค่าเฉลี่ยที่ 5212.97 M Ω m² จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่ากลุ่มควบคุมมีการคงสภาพของฉนวนดีที่สุดในรองลงมาคือกลุ่มที่ 1 และ 2 ซึ่งมีการคงสภาพของฉนวนใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมพอสมควร นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 สามารถผ่าน

ข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 61215 เกือบทั้งหมดเมื่อใช้งานที่สภาวะแผงเซลล์แสงอาทิตย์แห้ง ยกเว้นของกลุ่มที่ 2 จำนวน 1.67% ซึ่งมีการ Breakdown ขณะทำการทดสอบ

5.2.5 Wet leakage current test การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะและคุณภาพของฉนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปียกชื้นผ่านค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผง โดยค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 165.09 $M\Omega m^2$ และมีค่าเฉลี่ยที่ 28.40 $M\Omega m^2$ กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 126.94 $M\Omega m^2$ และมีค่าเฉลี่ยที่ 17.39 $M\Omega m^2$ และกลุ่มควบคุมมีค่าอยู่ในช่วง 46.75 – 1245.48 $M\Omega m^2$ และมีค่าเฉลี่ยที่ 667.13 $M\Omega m^2$ นอกจากนี้กลุ่มที่ 1 และ 2 ยังมีแผง Breakdown ขณะทำการทดสอบจำนวน 5.00% และ 10.00% ตามลำดับ จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่ากลุ่มควบคุมเท่านั้นที่คงสภาพของฉนวนในสภาวะที่เปียกชื้นให้มีค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ซึ่งต้องไม่ต่ำกว่า 40.00 $M\Omega m^2$ ได้ทุกแผง (100%) ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่สามารถคงสภาพไว้ได้ โดยมีค่าความต้านทานฉนวนคุณพื้นที่แผงต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 จำนวน 85.00% และ 96.67% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูง

5.2.6 I-V test การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงกำลังไฟฟ้า สมรรถนะและคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกของกลุ่มที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 96.23% และมีค่าเฉลี่ยที่ 56.01% กลุ่มที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 – 92.86% และมีค่าเฉลี่ยที่ 42.27% และกลุ่มควบคุมมีค่าอยู่ในช่วง 93.88 – 97.45% และมีค่าเฉลี่ยที่ 94.94% จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่ากลุ่มควบคุมมีกำลังไฟฟ้า สมรรถนะและคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดีที่สุดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกลดลงเฉลี่ยเพียง 5.06% อีกทั้งยังมีการกระจายของค่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกที่แคบมากเพียง 3.57% ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกลดลงเฉลี่ยถึง 43.99% และ 57.73% ตามลำดับ อีกทั้งยังมีการกระจายของค่าค่าเปอร์เซ็นต์ของ $P_{max @STC}$ เมื่อเทียบกับสเปกที่กว้างมากเกินไป 92.80% ขึ้นไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการออกแบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ควรมีการพิจารณาเรื่องภัยน้ำท่วมจากธรรมชาติ เมื่อพิจารณาแล้วมีความเสี่ยงที่จะเกิดเหตุการณ์น้ำท่วม ควรมีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ้งเดียวกันกับที่ติดตั้งภายในโครงการ โดยควรติดตั้งไว้บนหลังคาหรือพื้นที่ที่น้ำจะท่วมไม่ถึงแน่นอน เพื่อไว้สำหรับเป็นกลุ่มอ้างอิง ในกรณีที่น้ำท่วมภายในพื้นที่โรงไฟฟ้าทั่วทั้งหมดยกเว้นพื้นที่ สำหรับเปรียบเทียบค่าการทดสอบต่าง ๆ ว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานหรือไม่

บรรณานุกรม

- [1] พวงรัตน์ ทวีรัตน์. (2543). **วิธีการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์** พิมพ์ครั้งที่ 8, กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] อีรุฒิ เอกะกุล, (2543). **ระเบียบวิธีวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์**. อุบลราชธานี: สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี.
- [3] จักรกฤษณ์ สำราญใจ. (27 พฤศจิกายน 2544). การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อการวิจัย. สืบค้นวันที่ 25 ธันวาคม 2551, จาก http://www.jakkrit.lpru.ac.th/pdf/27_11_44/9.pdf
- [4] Yamane, Taro. 1967. **Statistics, An Introductory Analysis**. 2nd Ed., New York : Harper and Row.
- [5] Robert V Krejcie and Early W. Morgan, **Educational and Psychological Measurement**, (n.p., 1970), 608-609.)
- [6] Cochran, W.G. (1977). **Sampling Techniques**. 3d ed. New York : John Wiley and Sons Inc. [7] U.S. Energy Information Administration
- [7] U.S. Energy Information Administration
- [8] มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย: ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา พ.ศ.2565
- [9] Fatma Ahmadi, Nabil Khalifa, Tahar Khir, and Ammar Ben Brahim, **Performance analysis of two gridconnected PV technologies in climatic operating Conditions of South West of Tunisia**, International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 2017
- [10] ธราธิป แสงกล้า และบุญยัง ปลั่งกลาง. **การวิเคราะห์การลดลงของสมรรถนะระหว่างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาและแบบติดตั้งบนพื้นดินขนาด 1 เมกะวัตต์**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [11] B. Shiva Kumar, K. Sudhakar. **Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India**, Energy Reports (2015) pp.184-192
- [12] Fatma Ahmadi, Nabil Khalifa, Tahar Khir, and Ammar Ben Brahim, **Performance analysis of two grid connected PV technologies in climatic operating Conditions of South West of Tunisia**, International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 2017

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [13] วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร,“หลักสูตรฝึกอบรมการ ออกแบบและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา”
- [14] Sheeraz Kirmani, Mohammad Kalimullah, **Degradation Analysis of a Rooftop Solar Photovoltaic System A Case Study**. Smart Grid and Renewable Energy, 2017, Aug,pp212-219
- [15] S. K. Morley. **Alternatives to accuracy and bias metrics based on percentage errors for radiation belt modeling applications**. LosAlamos National Laboratory.
- [16] Sheeraz Kirmani, Mohammad Kalimullah. **Degradation Analysis of a Rooftop SolarPhotovoltaic System—A Case Study**. Smart Grid and Renewable Energy, 2017, Aug,pp212-219
- [17] https://www.kpt-shop.com/products/A9L40601?locale=th_TH.
- [18] Erdem Elibol, Ozge Tuzun Ozmen, Nedim Tutkun and Oguz Koysal, **Outdoor performance analysis of different PV panel types**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.67, 2017, 651-661
- [19] Madhuchandrika Chattopadhyay and R Rajavel, **A Comparative Study on Performance of a Grid Connected Solar PV System installed in the Urban, Rural and Coastal region of India.**, Proceedings of the Second International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC 2018). 2018
- [20] Mohammed S. Benghanem 1 & Saleh N. Alamri, **Modeling of photovoltaic module and experimental determination of serial resistance**, Journal of taibaf university for science (JCUSI), 2009
- [21] บุญยั้ง ปลั่งกลาง. เอกสารการสอนระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [22] A.A. Babatunde, S. Abbasoglu, M. Senol. **Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants**. Renewable and Sustainable Energy Review 90.March 2018. pp.1017-1026

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [23] Chin Kim Gan and Pi Hua Tan, **System Performance Comparison Between Crystalline and Thin- Film Technologies under Different Installation Condition**. IEEE Conference on Clean Technology (CEAT), 2013, 362-367
- [24] <https://www.greenpeace.org/thailand/story/6609/solar-cell-mangement/>
- [25] นิติกรณม์ ศิลป์ศิริวานิชย์ และวสันต์ พลาสัย, **การประเมินผลการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะการทดสอบกลางแจ้ง**. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2563
- [26] พศวีร์ ศรีโหมด, เต็มพงษ์ ศรีเทศ, วิชาการ เองศรีธวัช และพงศกร เจริญสุข, **การศึกษาการเพิ่มสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์**. การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 43 28 – 30 ตุลาคม 2563
- [27] บุญเทียม เลี่ยมพระจันทร์, พงษ์ศักดิ์ ทามแก้ว, กฤติเดช บัวใหญ่ และกานต์ เกิดชื่น, **การศึกษาเพื่อหาแนวทางปรับเพิ่มสมรรถนะระบบโซลาร์เซลล์ที่แผงมีความสกปรก**. วารสารเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า EENET Journal Vol.1, No.1(1), Jan-Jun 2017
- [28] Nopphadol Sitthiphol, Chatchai Sirisamphanwong, Nipon Ketjoy และ Kobsak Sriprapha, **Insulation resistance and Leakage current in PV modules and strings with different grounding configurations**. ISSN: 1662-7482, Vol. 839, pp 114-118 Revised: 2016-01-23
- [29] Florian Roth, Stefan Krull, Jens Günster และ Ivan Sinicco, **IS THE IEC 61646 – 10.15 TEST RELIABLE?**. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany
- [30] Andrew J. Parnell. **Nanotechnology and the potential for a renewable solar future**. Nanotechnology Perceptions7 (2011) 180–187.
- [31] www.naichangmashare.com/
- [32] Copyright © 1996-2023 IndiaMART InterMESH Ltd. All rights reserved.
- [33] <https://thai.mcbscircuitbreakers.com/>
- [34] <https://en.sungrowpower.com/>
- [35] <https://www.lazada.co.th/>
- [36] <https://qtc-energy.com/>

บรรณานุกรม(ต่อ)

[37] <https://www.vr-master.com/>

[38] <https://www.solarpvonline.com/>



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดสอบและรายละเอียดอุปกรณ์

No submerged PV module

No.	Serial Number	Model	Irradiance (W/m ²)	Module temp (°C)	V _{oc} @Mes (VDC)	V _{oc} @STC (VDC)	% of Name plate	Leakage voltage + (VDC)	Leakage voltage - (VDC)	Leakage current + (mA ₂)	Leakage current - (mA ₂)
1	15BP6072 A1002652	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.37	45.12	99.28	0.097	0.142	3000	3200
2	15BP6072 A1000094	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.23	44.98	98.97	0.084	0.125	3100	3000
3	15BP6072 A1002817	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.05	44.80	98.57	0.093	0.076	2500	2800
4	15BP6072 A1002531	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.27	45.02	99.06	0.121	0.154	2800	2900
5	15BP6072 A1000130	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.62	45.37	99.83	0.160	0.120	2700	2600
6	15BP6072 A1005159	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.16	44.91	98.81	0.072	0.101	2500	2900
7	15BP6072 A1005368	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.03	44.78	98.52	0.092	0.059	3000	2900
8	15BP6072 A1005325	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.09	44.84	98.66	0.086	0.102	2300	2900
9	15BP6072 C2001244	JAP6-72-310/4BB	860	55	40.06	44.81	98.59	0.047	0.083	3300	3600
10	15BP6072 A1003360	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.07	44.82	98.61	0.310	0.300	2049	2900
11	15BP6072 C2001986	JAP6-72-310/4BB	860	55	40.08	44.83	98.63	0.059	0.110	4500	4700
12	15BP6072 A1002579	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.41	45.16	99.37	0.081	0.120	2600	3100
13	15BP6072 A1002555	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.46	45.21	99.48	0.101	0.139	3100	2900
14	15BP6072 A1002421	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.50	45.25	99.56	0.075	0.120	3000	3200
15	15BP6072 A1002541	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.37	45.12	99.28	0.079	0.131	2700	2900
16	15BP6072 A1005377	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.09	44.84	98.66	0.075	0.081	2600	2300
17	15BP6072 A1002591	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.34	45.09	99.21	0.093	0.108	3100	2800
18	15BP6072 A1000144	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.56	45.31	99.70	0.143	0.133	3800	3700
19	15BP6072 A1000100	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.35	45.10	99.23	0.117	0.121	3600	3800
20	15BP6072 A1000126	JAP6-72-310/3BB	860	55	40.40	45.15	99.34	0.143	0.132	3900	3800

Submerged PV module that not over 8 days

No.	Serial Number	Model	Irradiance (W/m ²)	Module temp (°C)	V _{∞@Mes} (VDC)	V _{∞@STC} (VDC)	%of Name plate	Leakage voltage +(VDC)	Leakage voltage -(VDC)	Leakage current +(mA)	Leakage current -(mA)
1	15AP607223123664	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.81	44.42	97.72	0.05	0.05	1576	2060
2	15AP607223123050	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.66	44.26	97.39	0.05	0.06	1734	2051
3	15AP607223122785	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.63	44.23	97.33	0.06	0.06	1898	2200
4	15AP607223122789	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.71	44.31	97.50	0.07	0.07	1804	2068
5	15BP6072A1007687	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.65	43.25	95.16	0.08	0.07	1362	1669
6	15BP6072A1007740	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.70	43.30	95.27	0.03	0.07	1459	1792
7	15BP6072A1008113	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.21	43.81	96.40	0.04	0.05	1571	1852
8	15BP6072A1007907	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.55	43.15	94.94	0.05	0.05	1389	1704
9	15BP6072A1007641	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.94	43.54	95.80	0.06	0.06	1413	1722
10	15BP6072A1007918	JAP6-72-310/3BB	856	54	25.85	30.37	66.83	0.07	0.08	1674	1943
11	15BP6072A1007986	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.69	43.29	95.25	0.12	0.18	1698	1883
12	15BP6072A1008048	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.67	43.27	95.20	0.14	0.15	1513	1738
13	15BP6072A1007116	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.08	43.68	96.11	0.12	0.16	1647	1815
14	15BP6072A1008022	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.72	43.32	95.31	0.08	0.12	1626	1724
15	15BP6072A1008020	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.79	43.39	95.47	0.09	0.07	1506	1662
16	15BP6072A1007616	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.20	43.80	96.37	0.08	0.13	1735	1930
17	15BP6072A1007596	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.87	43.47	95.64	0.09	0.09	1804	2038
18	15BP6072A1007917	JAP6-72-310/3BB	856	54	38.80	43.40	95.49	0.08	0.17	1805	2050
19	15AP607223122805	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.88	44.49	97.88	0.09	0.16	1867	1962
20	15BP6072A1007703	JAP6-72-310/3BB	856	54	39.10	43.70	96.15	0.08	0.11	1369	1691
21	15BP6072A1001239	JAP6-72-310/3BB	849	53	38.43	42.89	94.37	0.1	0.09	1773	1796

Submerged PV module that over 8 days

No.	Serial Number	Model	Irradiance (W/m ²)	Module temp (°C)	V _∞ @Mes (VDC)	V _∞ @STC (VDC)	%of Name plate	Leakage voltage +(VDC)	Leakage voltage -(VDC)	Leakage current +(mA)	Leakage current -(mA)
1	15CP6072Y1038699	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.74	44.40	96.90	0.010	0.010	1522	1508
2	15CP6072Y1038942	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.70	44.36	96.81	0.010	0.030	1915	2300
3	15CP6072Y1038781	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.57	44.23	96.52	0.010	0.030	1315	1680
4	15CP6072Y1038673	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.60	44.26	96.59	0.020	0.020	2200	2500
5	15CP6072Y1038672	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.49	44.15	96.35	0.010	0.020	1858	2000
6	15CP6072Y1038774	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.56	44.22	96.50	0.020	0.030	1747	1867
7	15CP6072Y1038812	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.60	44.26	96.59	0.030	0.030	1591	1534
8	15CP6072Y1038779	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.36	44.02	96.07	0.010	0.030	1503	1793
9	15CP6072Y1038958	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.37	44.03	96.09	0.030	0.030	1579	1675
10	15CP6072Y1038682	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.45	44.11	96.26	0.020	0.030	983	1620
11	15CP6072Y1038795	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.48	44.14	96.33	0.010	0.020	1380	1234
12	15CP6072Y1038589	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.69	44.35	96.79	0.020	0.010	1672	1146
13	15CP6072Y1036213	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.41	44.07	96.17	0.020	0.030	1512	1734
14	15CP6072Y1038679	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.47	44.13	96.31	0.020	0.020	1493	499
15	15CP6072Y1038814	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.38	44.04	96.11	0.020	0.020	1761	1365
16	15CP6072Y1038817	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.35	44.01	96.04	0.020	0.030	1929	2200
17	15CP6072Y1038816	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.51	44.17	96.39	0.010	0.020	1932	2300
18	15CP6072Y1038962	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.45	44.11	96.26	0.010	0.030	1949	2054
19	15CP6072Y1038787	JAP6-72-320/4BB	924	55	39.44	44.10	96.24	0.010	0.040	2136	2300
20	15CP6072Y1038648	JAP6-72-320/4BB	924	55	40.11	44.77	97.71	0.020	0.040	1738	1859
21	15CP6072Y1039314	JAP6-72-320/4BB	940	58	39.84	44.92	98.04	0.010	0.030	2392	1617



เอกสารแนบ 2

ข้อมูลการทดสอบ

Insulation test, Wet leakage current test และ I-V
test

No submerged PV module

No.	Serial Number	Model	Irr (W/m ²)	Tcell (C)	I-V mes						I-V STC						% of nameplate (W)	Insulation 3KV		Insulation 1KV (MED) (MED)	Wet leakage test (MED) (MED)	
					Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)	Impp (A)	Pmpp (W)	Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)	Impp (A)	Pmpp (W)	Break	No Break		m.A				
1	15BP6072.C200.1986	JAP6-72-310-4BB	878.7	60.8	39.2	7.86	30.7	7.24	222.1	222.1	46.42	8.75	36.35	8.05	292.8	94.45	√	0.002	2700	5238	197.6	383.344
2	15BP6072.A100.2579	JAP6-72-310-3BB	874.8	60.9	39.1	7.92	30.43	7.34	223.3	223.3	45.65	8.92	35.53	8.26	293.59	94.71	√	0.004	2071	4018	24.1	46.754
3	15BP6072.A100.2555	JAP6-72-310-3BB	867.3	60.95	39.2	7.89	30.54	7.32	223.5	223.5	45.81	8.97	35.7	8.31	296.74	95.72	√	0.003	2300	4462	32.7	63.438
4	15BP6072.A100.2421	JAP6-72-310-3BB	872.1	60.36	39.3	7.91	30.56	7.3	223	223	45.78	8.94	35.6	8.24	293.54	94.69	√	0.003	2300	4462	453	878.82
5	15BP6072.A100.2541	JAP6-72-310-3BB	872.1	60.16	39.1	7.89	30.56	7.32	223.6	223.6	45.53	8.92	35.59	8.27	294.28	94.93	√	0.003	2800	5432	507	983.58
6	15BP6072.A100.2652	JAP6-72-310-3BB	875.9	59.57	39.2	7.94	30.32	7.36	223.1	223.1	45.5	8.94	35.19	8.28	291.48	94.03	√	0.003	2600	5044	240	465.6
7	15BP6072.A100.0094	JAP6-72-310-3BB	872.6	58.89	39.1	7.94	30.74	7.27	223.6	223.6	45.28	8.98	35.61	8.22	292.7	94.42	√	0.003	3500	6790	523	1014.62
8	15BP6072.A100.2817	JAP6-72-310-3BB	851.5	58.65	39.2	7.59	30.78	7.04	216.6	216.6	45.47	8.79	35.7	8.15	291.04	93.88	√	0.003	3100	6014	609	1181.46
9	15BP6072.A100.2531	JAP6-72-310-3BB	861.4	58.54	39.7	7.74	31.14	7.15	222.7	222.7	45.93	8.86	36.03	8.19	294.98	95.15	√	0.003	2700	5238	642	1245.48
10	15BP6072.A100.0130	JAP6-72-310-3BB	852.1	58.15	40.2	7.67	31.48	7.17	225.9	225.9	46.45	8.88	36.37	8.31	302.09	97.45	√	0.002	2800	5432	210.4	408.176



Submerged PV module that not over 8 days

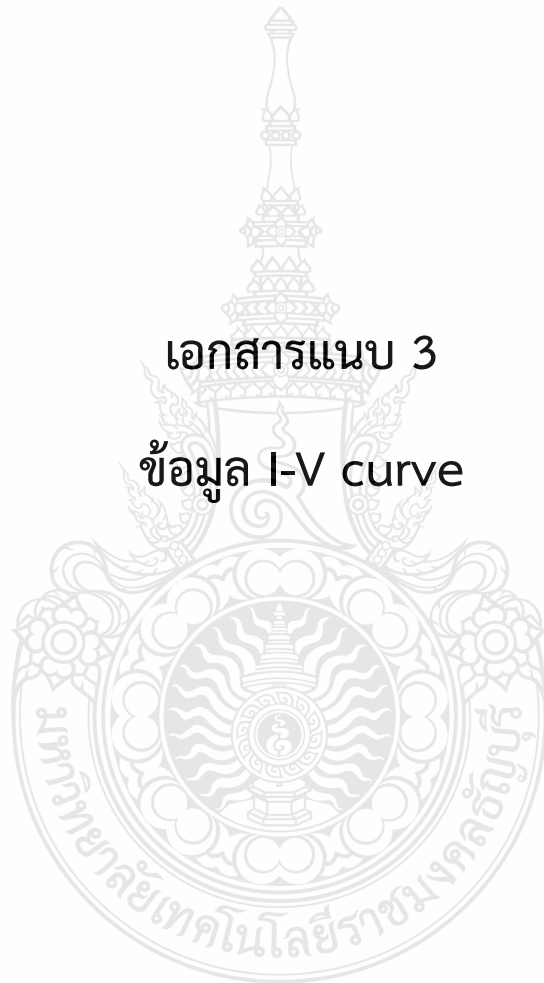
No.	Serial Number	Model	Irr (W/m ²)	Tcell (C)	I-V ms				I-V STC				% of nameplate (W)	Insulation 3KV		Insulation 1KV (ΔE ₂) (ΔE ₂ m ²)	Wet leakage test				
					Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)	Impp (A)	Pmpp (W)	Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)		Impp (A)	Pmpp (W)		Break	No Break	(ΔE ₂) (ΔE ₂ m ²)	(ΔE ₂) (ΔE ₂ m ²)	
1	15BP6072.A200.5370	JAP6-72-310-4BB	805.7	51.68	27.3	7	21.7	6.5	141.1	32.02	8.55	24.45	7.94	202.03	65.17	✓	0.007	685	1329	20.6	39.96
2	15BP6072.Y101.2522	JAP6-72-310-3BB	772.8	53.34	26.6	6.76	10.31	6.25	64.4	31.23	8.64	12.1	7.99	96.64	31.17	✓	0.003	2400	4656	51.2	99.33
3	15BP6072.A200.6951	JAP6-72-310-4BB	734.8	37.61	26	6.44	20.55	6.08	125	31.56	8.59	25.27	8.11	204.96	66.12	✓	0.004	999	1938	85.1	165.09
4	15BP6072.Y101.2382	JAP6-72-310-3BB	724.6	37.37	25.8	6.39	19.99	6	119.9	31.2	8.7	24.18	8.17	197.49	63.71	✓	0.002	2900	5626	8	15.32
5	15BP6072.Y101.2519	JAP6-72-310-3BB	729.3	54.28	31.6	6.34	9.26	5.92	54.8	37.13	8.58	10.88	8.02	87.23	28.14	✓	0.003	2118	4109	18.3	35.50
6	15BP6072.Y101.2326	JAP6-72-310-3BB	730.5	37.22	25.8	6.42	20	6.03	120.5	31.15	8.67	24.14	8.14	196.58	63.41	✓	0.002	2800	5492	4.4	8.54
7	15BP6072.Y101.2514	JAP6-72-310-3BB	734.6	37.03	26	6.46	19.95	6.07	121	31.32	8.68	24.04	8.15	195.91	63.20	✓	0.003	2128	4128	13.5	26.19
8	15BP6072.Y100.7083	JAP6-72-310-3BB	729.1	56.34	25.9	6.36	20.06	5.99	120.1	31.13	8.62	24.11	8.11	195.46	63.05	✓	0	2500	4850	4.7	9.12
9	15BP6072.Y101.2523	JAP6-72-310-3BB	731.5	55.55	26.4	6.51	20.31	6.16	125	31.55	8.79	24.27	8.31	201.67	65.05	✓	0.003	2017	3913	19.2	37.25
10	15BP6072.A202.4246	JAP6-72-310-3BB	729	55.21	26.1	6.29	20.43	5.94	121.4	31.19	8.52	24.41	8.05	196.59	63.42	✓	0.004	1000	1940	4.7	9.12
11	15BP6072.Y100.7296	JAP6-72-310-3BB	803.8	39.77	33.4	7	21.01	6.62	139.1	39.65	8.58	24.94	8.12	202.51	65.33	✓	0.005	1458	2829	11.7	22.70
12	15BP6072.A201.0340	JAP6-72-310-4BB	798.7	38.15	26.6	6.78	20.9	6.42	134.1	32.43	8.32	25.48	7.87	200.54	64.69	✓	0.006	758	1471	17.3	33.56
13	15BP6072.Y100.7297	JAP6-72-310-3BB	808.9	38.01	24.5	6.87	9.92	5.44	54	29.47	8.38	11.93	6.63	79.15	25.53	✓	0.004	1685	3269	14.3	27.74
14	15BP6072.A201.0349	JAP6-72-310-4BB	816.3	37.22	26.7	6.93	21.07	6.27	132.2	32.9	8.33	25.48	7.33	191.96	61.92	✓	0.006	861	1670	11.5	22.31
15	15BP6072.A203.3822	JAP6-72-310-3BB	798.1	56.49	26.9	6.86	21.03	6.39	134.4	31.95	8.48	24.98	7.91	197.47	63.70	✓	0.007	839	1628	17.2	33.37
16	15BP6072.A101.9615	JAP6-72-310-3BB	813.9	39.18	35.1	7.06	21.28	6.5	138.5	41.34	8.55	25.07	7.87	197.4	63.68	✓	0.001	1629	3160	5.2	10.09
17	15BP6072.A203.3824	JAP6-72-310-3BB	819.8	60.51	26.1	7.03	20.01	6.57	131.4	31.61	8.45	24.23	7.9	191.37	61.73	✓	0.01	812	1575	5.3	10.28
18	15BP6072.A203.4005	JAP6-72-310-3BB	808.8	38.84	26.4	6.96	20.48	6.43	131.7	31.72	8.48	24.61	7.84	192.96	62.25	✓	0.006	1019	1977	4.2	8.15
19	15BP6072.A203.3833	JAP6-72-310-3BB	750.6	38.15	26.4	6.28	21.4	5.62	120.3	31.88	8.25	25.84	7.39	190.92	61.59	✓	0.006	671	1302	1.8	3.49
20	15BP6072.A200.7992	JAP6-72-310-4BB	798.4	37.66	26.6	6.79	20.73	6.51	134.9	32.34	8.34	25.21	7.99	201.37	64.96	✓	0.005	831	1612	2.3	4.46
21	15BP6072.A201.0329	JAP6-72-310-4BB	785.7	63.16	31	5.91	22.22	5.51	122.4	38.42	7.35	27.54	6.85	188.64	60.85	✓	0.007	613	1189	3.8	7.37
22	15BP6072.A200.9222	JAP6-72-310-4BB	792.1	63.21	13.1	5.98	9.97	5.67	56.6	17.52	7.37	13.34	6.99	91.28	30.09	✓	0.005	1091	2117	12.8	24.83
23	15BP6072.A200.0321	JAP6-72-310-4BB	714.3	61	26.6	6.32	21.32	6.02	128.4	33.39	8.65	26.76	8.24	220.63	71.17	✓	0.007	729	1414	6.2	12.03
24	15BP6072.Y101.1253	JAP6-72-310-3BB	797.2	61.05	25.9	6.72	20.23	6.23	126	31.58	8.3	24.67	7.7	189.91	61.26	✓	0.014	2500	4850	11.8	22.89
25	15BP6072.A201.2605	JAP6-72-310-4BB	800.6	61.49	26.2	6.78	20.35	6.12	124.5	32.6	8.28	25.32	7.47	189.1	61.00	✓	0.007	568	1102	4.5	8.73
26	15BP6072.A200.1904	JAP6-72-310-4BB	801.8	55.99	32	7.08	9.45	6.35	60	37.46	8.72	11.07	7.82	86.48	27.90	✓	0.004	1035	2008	8.5	16.49
27	15BP6072.A200.9330	JAP6-72-310-4BB	799.7	62.72	26.2	6.2	20.71	5.95	123.2	32.84	7.58	25.96	7.26	188.57	60.83	✓	0.005	645	1251	11.4	22.12
28	15BP6072.Y100.4563	JAP6-72-310-3BB	797.7	63.01	33.4	6.18	20.2	5.81	117.3	40.28	7.63	24.35	7.17	174.57	56.31	✓	0.002	2090	4055	51.3	99.52
29	15BP6072.Y101.2637	JAP6-72-310-3BB	791.4	61.49	30.3	6.4	10.1	6.02	60.8	36.6	7.97	12.2	7.5	91.46	29.50	✓	0.004	790	1533	3.1	6.01
30	15BP6072.Y101.2563	JAP6-72-310-3BB	785.1	55.26	14.9	6.94	10.24	6.33	64.8	18.26	8.73	12.54	7.97	99.9	32.23	✓	0.005	1888	3663	5.5	10.67

Submerged PV module that over 8 days

No.	Serial Number	Model	Irr (W/m ²)	Tcell (C)	I-V ms				I-V STC				% of nameplate (W)	Insulation 3kV		Insulation 1kV (ΔΩ) (ΔΩ/m ²)	Wet leakage test (ΔΩ) (ΔΩ/m ²)	
					Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)	Impp (A)	Pmpp (W)	Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)		Impp (A)	Pmpp (W)			Break
1	15BM6072.A202.1061	JAM6-72-320-4BB	890.3	61.88	40.3	8.06	22.15	7.46	165.1	47.63	8.85	26.18	8.18	214.14	66.92	0	0	0
2	15BM6072.A201.8840	JAM6-72-320-4BB	894.2	62.57	26.5	8.09	20.62	7.55	155.7	32.6	8.83	25.37	8.24	209.14	65.36	0	0	0
3	15BM6072.A201.8480	JAM6-72-320-4BB	904.5	63.4	26.5	8.23	20.65	7.64	157.7	32.72	8.88	25.5	8.24	210.11	65.66	0	0	0
4	15BM6072.A202.2337	JAM6-72-320-4BB	908.4	63.45	39.4	8.3	21.41	7.66	164	46.89	8.91	25.49	8.23	209.66	65.52	0	0	0
5	15BM6072.A202.0088	JAM6-72-320-4BB	897.9	63.5	26.3	8.12	20.43	7.55	154.2	32.54	8.82	25.38	8.2	207.37	64.80	0	0	0
6	15BM6072.A202.0090	JAM6-72-320-4BB	889.5	63.5	31.4	8.14	21.52	7.5	161.4	38.26	8.9	26.22	8.23	215.75	67.42	0	0	0
7	15BM6072.A202.0094	JAM6-72-320-4BB	887.8	63.4	26.4	8.11	20.61	7.52	155.1	32.67	8.92	25.51	8.27	211	65.94	0	0	0
8	15BM6072.A202.2701	JAM6-72-320-4BB	889	63.16	26.3	8.11	20.49	7.47	153.1	32.51	8.9	25.33	8.2	207.8	64.94	0	0	0
9	15BM6072.A201.8631	JAM6-72-320-4BB	885.1	62.81	26.5	8.14	20.53	7.5	154	32.69	8.98	25.32	8.27	209.46	65.46	0	0	0
10	15BM6072.A202.5985	JAM6-72-320-4BB	897.5	63.21	26.4	8.24	20.75	7.59	157.5	32.6	8.96	25.62	8.25	211.44	66.08	0	0	0
11	15BM6072.A202.4800	JAM6-72-320-4BB	930	47.2	33.1	8.33	10.26	7.59	77.9	36.83	8.84	11.42	8.04	91.85	28.70	0	0	0
12	15BM6072.A201.7403	JAM6-72-320-4BB	922.8	46.23	13.2	8.33	9.71	7.69	74.7	15.24	8.9	11.21	8.23	92.24	28.83	0	0	0
13	15BM6072.A202.2661	JAM6-72-320-4BB	928.6	45.94	5.6	0.01	2.33	0.01	0	6.62	0.01	2.99	0.01	0.04	0.01	0	0	0
14	15BM6072.A201.8374	JAM6-72-320-4BB	897.6	55.99	39.7	8.09	31.53	7.49	236.2	45.71	8.84	36.3	8.19	397.14	92.86	0	0	0
15	15BM6072.A201.8611	JAM6-72-320-4BB	895.3	55.06	39.7	8.09	31.22	7.52	234.7	45.54	8.87	35.81	8.24	394.96	92.18	0	0	0
16	15BF6072.A102.2920	JAP6-72-305-3BB	895	54.96	31.3	7.34	18.48	7.14	131.9	36.61	8.65	21.28	7.87	167.54	54.93	0	0	0
17	15BF6072.A101.6110	JAP6-72-305-3BB	896.6	54.87	25.6	7.81	19.5	7.19	140.2	39.86	8.6	22.75	7.92	180.19	59.08	0	0	0
18	15BF6072.A102.5771	JAP6-72-305-3BB	916.5	45.79	12.7	8.02	9.07	7.35	66.6	14.51	8.68	10.36	7.95	82.34	27.00	0	0	0
19	15BF6072.A102.6335	JAP6-72-305-3BB	914.4	48.05	37.2	8.02	20.57	7.38	151.8	40.61	8.7	22.46	8	179.72	58.92	0	0	0
20	15BF6072.A203.5547	JAP6-72-305-3BB	921.4	46.18	12.9	8.1	9.38	7.4	69.5	14.75	8.72	10.73	7.97	85.49	28.03	0	0	0
21	15BF6072.A101.8003	JAP6-72-305-3BB	668.3	61.34	26	6.31	20.1	6	120.6	32.39	9.3	25.04	8.84	221.45	72.61	0	0	0
22	15BF6072.A102.9966	JAP6-72-305-3BB	835.9	63.16	26.5	6.94	20.38	6.43	132.3	32.44	8.17	25.19	7.57	190.76	62.54	0	0	0
23	15BF6072.A103.0154	JAP6-72-305-3BB	744.8	58.65	25.8	6.52	19.81	6.01	119.1	31.32	8.63	24.05	7.96	191.4	62.75	0	0	0
24	15BF6072.A202.8387	JAP6-72-305-3BB	752.9	62.23	25.6	5.92	21.06	5.23	110.1	31.64	7.75	26.04	6.83	177.94	58.34	0	0	0
25	15BF6072.A202.9934	JAP6-72-305-3BB	780.7	62.23	25.8	5.83	20.2	5.47	110.5	31.74	7.36	24.85	6.9	171.44	56.21	0	0	0
26	15BF6072.A203.7320	JAP6-72-305-3BB	776.1	62.42	25.4	5.74	20.13	5.52	111.1	31.34	7.28	24.84	7	173.86	57.00	0	0	0
27	15BF6072.A202.9930	JAP6-72-305-3BB	760.8	62.27	26	5.98	20.46	5.75	117.7	32.07	7.74	25.24	7.44	187.84	61.59	0	0	0
28	15BF6072.A203.1229	JAP6-72-305-3BB	737.9	58.84	25.6	6.3	19.96	5.84	116.5	31.16	8.42	24.3	7.8	189.5	62.13	0	0	0
29	15BF6072.A203.6971	JAP6-72-305-3BB	743.1	61.39	26.1	5.92	21.59	5.57	120.3	32.11	7.84	26.56	7.38	196.14	64.31	0	0	0
30	15BF6072.A203.7122	JAP6-72-305-3BB	801.8	62.76	33.5	5.96	21.32	5.6	119.5	40.32	7.32	25.67	6.88	176.64	57.91	0	0	0

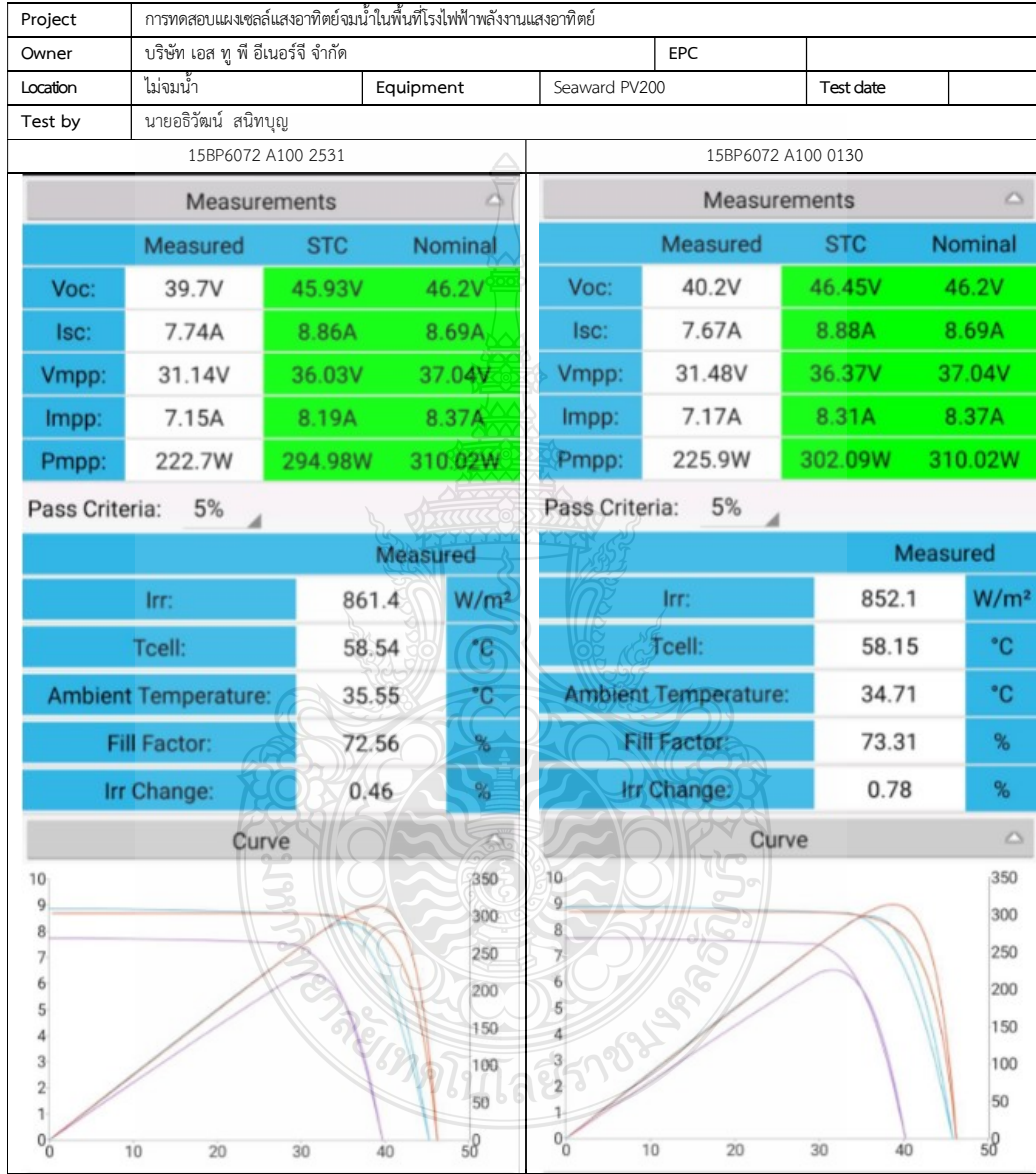
เอกสารแนบ 3

ข้อมูล I-V curve



I-V Testing as IEC 61829

No submerged PV module



Submerged PV module that not over 8 days



Submerged PV module that over 8 days

Project	การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์		
Owner	บริษัท เอส ทู พี อินอร์จี้ จำกัด	EPC	
Location	จมจก	Equipment	Seaward PV200
Test date			
Test by	นายอชิวัฒน์ สนิทบุญ		
	15BP6072 Y101 4791		15AP6072 Y106 7168
Measurements		Measurements	
	Measured	STC	Nominal
Voc:	23.4V	28.3V	46.42V
Isc:	1.62A	2.28A	8.74A
Vmpp:	19.68V	23.8V	37.28V
Impp:	1.43A	2.02A	8.45A
Pmpp:	28.1W	48.04W	315.02W
Pass Criteria: 10%		Pass Criteria: 10%	
Measured		Measured	
Irr:	699.7	703	W/m ²
Tcell:	55.36	54.47	°C
Ambient Temperature:	39.11	38.76	°C
Fill Factor:	74.4	73.59	%
Irr Change:	0.01	0.59	%
Curve		Curve	

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	เครื่องมือวัด	รุ่น	Serial No.	ใบรับรองเลขที่
1	True-RMS Digital Multimeter	Fluke 177	36170268	EL201598
2	True RMS AC/DC Clamp Meter	Fluke 376	34340074WA	EL192155
3	Insulation Resistance Tester	Fluke 1507	35820204WS	EL192144
4	10kV Insulation Resistance Tester	Metrel MI 3200	15031200	-
5	Irradiation and temperature meter	Seaward SS200R	28H-0720	SEA215835S
6	PV tester with I-V curve tracing	Seaward PV200	24H-0750	SEA216675S



TECHNICAL DATA

Fluke 170 Series True-rms Digital Multimeters



Fluke 170 Series DMMs are the industry-standard troubleshooting tools for electrical and electronic systems

Fluke 170 Series digital multimeters are the preferred solutions for professional technicians around the world. They include the features you need to troubleshoot and repair electrical and electronic systems, combined with Fluke's unparalleled reputation for ruggedness, reliability and accuracy.

All 170 Series DMMs are true-rms responding. In today's electrical environment full of harmonics and variable speed drives, these DMMs will provide accurate ac voltage and current readings on complex, non-sinusoidal signals.

Fluke pioneered the analog bar graph in DMMs and it remains the industry standard today. For signals that change over time, the bar graph can be easier to understand than changing numbers.

Fluke 170 Series DMMs all carry a limited lifetime warranty. When your job depends on your tools, make sure a Fluke 170 Series DMM is on your toolbelt.

EXCEPTIONAL EASE-OF-USE, RUGGEDNESS AND RELIABILITY

The Fluke 175, 177 and 179 are the perfect choice for everyday use when your job depends on your meter

INCREASED ACCURACY WITH TRUE-RMS MEASUREMENTS

Get accurate voltage and current readings when measuring complex ac signals

EASY UNDERSTANDING OF CHANGING SIGNALS

An analog bar graph makes it easy to see trends in fluctuating signals

TEMPERATURE MEASUREMENTS AT YOUR FINGERTIPS (179 ONLY)

Built-in thermometer conveniently allows you to take temperature readings without having to carry a separate instrument



FLUKE®

376 True-rms AC/DC Clamp Meter with iFlex™

Work horse clamps with increased
performance and flexibility

The new Fluke 376 Clamp Meter offers improved performance perfect for a wide range of current measurement situations. With true-rms ac voltage and current measurements, the Fluke 376 can read up to 1000 V and 1000 A in both ac and dc modes. Additionally, the Fluke 376 includes the new iFlex™ flexible current probe expanding the measurement range to 2500 A ac while providing increased display flexibility, ability to measure around awkward sized conductors and improved wire access. The Fluke 376 is the direct replacement for the Fluke 337 Clamp Meter.



Technical Data

Measurement capability

- 1000 A ac and dc current measurement with fixed jaw
- 2500 A ac current measurement with iFlex™ flexible current probe
- 1000 V ac and dc voltage measurement
- True-rms ac voltage and current for accurate measurements on non-linear signals
- Frequency measurement to 500 Hz with both jaw and iFlex™
- 60 k Ω resistance measurement with continuity detection
- Min, max, average and inrush recording to capture variations automatically
- 500 mV dc measurement range to interface with other accessories
- 1000 μ F capacitance measurement

Features

- iFlex™ flexible current probe expands the measurement range to 2500 A ac while providing increased display flexibility, ability to measure awkward sized conductors and improved wire access
- CAT IV 600 V, CAT III 1000 V safety rating
- Integrated low pass filter and state of the art signal processing allows for use in noisy electrical environments while providing stable readings

FLUKE®

1507/1503 Insulation Testers

Technical Data



The Fluke 1507 and 1503 Insulation Testers are compact, rugged, reliable, and easy to use. With their multiple test voltages, they are ideal for many troubleshooting, commissioning, and preventative maintenance applications. Additional features, like the remote probe on these tools save both time and money when performing tests.

Features and benefits:

- Insulation test range:
 - 1507: 0.01 MΩ to 10 GΩ
 - 1503: 0.1 MΩ to 2000 MΩ
- Insulation test voltages:
 - 1507: 50 V, 100 V, 250 V, 500 V, 1000 V
 - 1503: 500 V, 1000 V
- Save both time and money with Automatic calculation of Polarization Index and Dielectric Absorption Ratio
- Make repetitive tests simple and easy with the 1507's Compare (Pass/Fail) function (only available on the 1507)
- Repetitive or hard-to-reach testing is easy with the remote test probe
- Live circuit detection prevents insulation test if voltage > 30 V is detected for added user protection
- Auto-discharge of capacitive voltage for added user protection
- AC/DC voltage: 0.1 V to 600 V
- 200 mA Continuity
- Resistance: 0.01 Ω to 20.00 KΩ
- Save battery power with auto power off
- Read measurements easily with large, backlit display
- CAT IV 600 V overvoltage category rating for added user protection
- Remote probe, test leads, probes and alligator clips included with each tester
- Accepts optional Fluke TPAK magnetic hanging system to free your hands for other work
- Four AA alkaline batteries (NEDA 15 A or IEC LR6) for at least 1000 insulation tests
- One-year warranty

Shop for Fluke products online at: www.MyFlukeStore.com 1.877.766.5412

MI 3200 TeraOhm 10 kV



10 kV Insulation, Voltage & Faultfinding tester



- **Automated testing** - PI, DD, DAR calculations with automated resistance ranging (AR). All data is displayed during one single measurement.
- **Fault Finding** - Fully programmable Step-Voltage and Withstanding Voltage test functions to assist in diagnosing faults in insulation.
- **R(t) graph** - Real time resistance against time graph plotting facility to graphically illustrate the response of a material to an applied test voltage.
- **Faster testing** - High 5 mA charging current quickly charges capacitive loads.
- **Accurate** - Selectable noise rejection filters (up to 5 mA) and shielded cables as standard ensure accurate readings.
- **Safe** - High CAT IV, 600 V voltage protection
- **Portable** - Lightweight 5,5 kg design with carry handle.

The new MI 3200 TeraOhm 10 kV insulation tester is a portable instrument intended to measure insulation resistance through the use of high voltage DC test voltages up to 10 kV. The large LCD screen allows real-time R(t) graphs to be displayed. Results can be stored and downloaded to a computer via USB and RS232 connections with the help of the optional HVLink software. The high quality instrument, shielded test leads and quality accessories included in the standard set enables you to perform your testing effectively.



APPLICATION:

- Testing insulation resistance of rotating machinery and cables,
- Production line periodic testing and maintenance,
- Troubleshooting and analysis of all kinds of insulation problems.
- Effective readings in high noise environments such as high voltage substations and switchyards.
- Diagnostic testing

STANDARDS:

Instruments operation:
IEC/EN61557-2

Electromagnetic compatibility:
EN 61326 class B

Safety:
EN 61010-1 (instrument)
EN 61010-031(accessories)

PV200

The most compact I-V curve tracer around.



The **PV200** is a compact & cost effective I-V curve tracer that uses simple push button operation making it an efficient and versatile tester for PV systems. 999 datasets can be stored on the instrument and once downloaded to the SolarCert software comparison to the standard test conditions can be made.

The tester measures ground (earth) continuity, open circuit voltage, short circuit current, maximum power point voltage, current and power (with AC/DC clamp). The instrument will also give you the fill factor of the PV module or system under test.

The PV200 has a separate 1kV insulation resistance test function, eliminating the need for a separate, expensive device. Meanwhile the high contrast display on the device is clearly visible in direct sunlight.

The unit can also wirelessly capture and record real-time irradiance, ambient temperature and PV module temperature from the Solar Survey 200R. Using the Solar Survey 200R your data can be converted to standard test conditions, in SolarCerts, for you to compare to the manufacturer's published data.

These are just a few of the reasons we believe you'll want to invest in our **PV200**.

Why buy the PV200?

- > **Small and Compact** - Robust, affordable, handheld PV diagnostic tool.
- > **Compliant** - with IEC 62446 and IEC 61829.
- > **Fast and accurate testing** - 1 button operation makes testing quicker and more controlled.
- > **Compare to standard test conditions** - Using the SolarCert software.
- > **Instantly view detailed I-V curves anywhere** - Using the PVMobile Android app.
- > **Free online product training and support.**

To see the **PV200** for yourself, request your live online demonstration today at sewardsolar.com/PV200

T: +44 (0) 191 587 8741 E: sales@seward.com

TESTED, TRUSTED... WORLDWIDE.





ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่

1. อธิวัฒน์ สนิทบุญ และบุญยัง ปลั่งกลาง, การวิเคราะห์ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



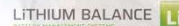
การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45

The 45th Electrical Engineering Conference (EECON-45)

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
Srinakharinwirot University



วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565
ณ ศูนย์ราชการสิริสวัสดิ์ อำเภอเมือง
จังหวัดนครนายก



คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กรรมการสภาวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

1	ศาสตราจารย์ ดร.ประยูทธ	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2	ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
3	ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5	รองศาสตราจารย์ ดร.อิศคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
6	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย	ทรีญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
7	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดชา	วิไลรัตน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
8	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทินิจ	เทพสาธร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
9	อาจารย์ธนวิชญ์	ชุลิกาวีthy	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กรรมการสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)

1	รองศาสตราจารย์ ดร.อิศคม	ฤกษ์บุตร	นายกสมาคม
2	ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	อุปนายก คนที่ 1
3	อาจารย์ธนวิชญ์	ชุลิกาวีthy	อุปนายก คนที่ 2
4	ศาสตราจารย์ ดร.ประยูทธ	อัครเอกผาลิน	กรรมการ
5	รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน	ปิยรัตน์	กรรมการ
6	อาจารย์บุญช่วย	ทรัพย์มนชัย	กรรมการ
7	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย	ทรีญวโรดม	กรรมการ
8	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดชา	วิไลรัตน์	กรรมการ
9	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์	คงรัตน์ประเสริฐ	กรรมการ
10	อาจารย์ ดร.จิรพัฒน์	แสงทอง	กรรมการ
11	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ	รักไทยเจริญชีพ	กรรมการและประชาสัมพันธ์
12	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทินิจ	เทพสาธร	กรรมการและปฏิคม
13	อาจารย์วรภรณ์	ลือใจ	กรรมการและนายทะเบียน
14	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แคทริยา	สุวรรณศรี	กรรมการและเหรียญกษาปณ์
15	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาตร	แสงเงิน	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕

ประธาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา कुमारักษ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขานุการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กรรมการสามัญ

1. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินไหว
2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์บุญช่วย ทรัพย์มนชัย
3. มหาวิทยาลัยขอนแก่น รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษ เฉยไสย
4. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ วิระสันติ
5. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ
6. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อาจารย์มงคล แซ่เจีย
7. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย มุจจลินทวิมุตติ
8. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสร ไชยชาวงค์
9. มหาวิทยาลัยมหิดล อาจารย์ ดร.สุพรรณ ทิพย์ทิพากร
10. มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกดา สงฆ์จันทร์
11. มหาวิทยาลัยรังสิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนา นริศนภานภรณ์
12. มหาวิทยาลัยศรีปทุม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ อินท่าไม้
13. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา कुमारักษ์
14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยพร หล่อทองคำ
15. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อาจารย์ ดร.ปรีดี โอวาทชัยพงศ์
16. มหาวิทยาลัยพะเยา รองศาสตราจารย์ ดร.จงลักษณ์ ทาหะชา
17. มหาวิทยาลัยสยาม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ นาราชภูรี
18. มหาวิทยาลัยกรุงเทพ รองศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา ชัยบุตร
19. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บงกช สุขอนันต์
20. มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐพร ฤทธิ์นุ้ม
21. มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ สือเฉย
22. มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต อาจารย์ ดร.ชาติ ฤทธิ์หิรัญ
23. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรดี พฤติศรีณนันท
24. มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฎิภาณ เกิดลาภ
25. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิยมชัย

คณะกรรมการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕

กรรมการสามัญ (ต่อ)

- | | |
|---|---|
| 26.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง |
| 27.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร | รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว |
| 28.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ |
| 29.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน | รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เกิดชื่น |
| 30.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักดิ์วัฒน์ จันทร์ตรี |
| 31.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ | อาจารย์สุธี รุกขพันธุ์ |
| 32.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน |
| 33.มหาวิทยาลัยศิลปากร | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ วงศ์พร้อมมูล |
| 34.มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ | อาจารย์ ดร.ทัศน์ัย ภาธรรัตน์ |
| 35.ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ | ดร.สิรินทร์ อินทร์สวาท |

กรรมการสมทบ

- | | |
|--|--|
| 1. สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ เรืองศิริ |
| 2. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ อัครมงคลรักษ์ |
| 3. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา | อาจารย์สุทัศน์ อุ่ทอง |
| 4. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพงษ์ ฉิมเพชร |



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาของบทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕

มหาวิทยาลัยมหิดล

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมาภุชชี
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์
CM รองศาสตราจารย์ ดร.พงศธร
CT อาจารย์ ดร.พัฒนาช
EL รศ.ดร.สุรโชค
DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย
PH รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมินท์
BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชง
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษญา

สิงหวิไล
เยรบุดร
เศรษฐีธร
พัฒนะศรี
ธนพิทักษ์
ชันยากร
กิระวานิช
เลิศมนรัตน์
อัครสกุลเกียรติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

PW รองศาสตราจารย์ ดร.กิติ
PE รองศาสตราจารย์ ดร.ทองพล
CM รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์
CT รองศาสตราจารย์ ดร.ทองพัน
EL รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์
DS รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ
PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ
BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรเมศวร์
CP รองศาสตราจารย์ ดร.นิตยา
GN รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย

ชยะกุลศิริ
อารีรักษ์
อุทาสกุล
อารีรักษ์
ศรีแก้ว
อัครกมล
พึงสุวรรณรักษ์
ท้อแก้ว
เกิดประสพ
กุลรวานิชพงษ์

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

PW รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูเกียรติ
CM รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์
CT รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา
EL รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพงศ์
DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์
PH รองศาสตราจารย์ สิริวิชัย
BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.อ.ไชโย
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย

สื่อเอย
พงษ์พานิช
มนต์ประภัสสร
พวงดาวเรือง
ชัยสายัณห์
สิริไปราณานนท์
ทัตสวณ
เพียงพรานทอง
ธรรมรัตน์ ร.น.
แชลี

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

PW อาจารย์ ดร.วรภัทร
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษม
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันต์ชัย
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเชษฐ์
EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุกนันทน์
CP อาจารย์ ดร.ภคพงศ์
DS อาจารย์ ดร.อภิวัฒน์
PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ณัฐพร
BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์
GN รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย

กอนแก้ว
อุทัยโชฟ้า
รัตนนนท์
อินทร์เนตร
ตันวรรณรักษ์
อมรกุล
แสงโนรี
ฤทธิ์นุ้ม
มานิตพรสุทธิ์
ฉิมฉวี

มหาวิทยาลัยพะเยา

PW รองศาสตราจารย์ ดร.จงลักษณ์
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิเดช
PE อาจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์
DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาทิพย์
GN รองศาสตราจารย์ ดร.เชวศักดิ์

พาหะชา
วิราศรีศิริกุล
อมรเดชาพล
จันทร์คง
รักเป็นไทย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์
CT อาจารย์ ดร.ภมร
EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์
CP อาจารย์ ดร.โสภณ
GN อาจารย์ ดร.กัณธิดา

แก้วอ่อน
ศิลาพันธ์
วงศ์พร้อมมูล
ผู้มีจรรยา
พันธุ์เจริญ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาของบทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕ (ต่อ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์
 PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจ็ดกุล
 CM ศาสตราจารย์ ดร.วาทิต
 CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชิน
 EL รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ดิศ
 DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี
 PH รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี
 BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาภรณ์
 GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานะ

แสงวงศ์วานิชย์
 โสภานันต์
 เบญจพลกุล
 อรณสวัสดิ์วงศ์
 รัตนธรรมพันธ์
 อัครกุล
 อรัณวิทย์
 วรสุชีพ
 ชีระมงคลศรี
 ศรัยหรรค์ศักดิ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

PW ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย
 PE รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเชษฐ์
 CM ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย
 CT ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย
 EL รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์
 DS รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์
 PH รองศาสตราจารย์ ดร.สุริภณ
 BE รองศาสตราจารย์ ดร.ชูชาติ
 GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์

งามหรุ
 ชันเงิน
 ทรัพย์นิธิ
 ธีวรุจา
 ฐิติรุ่งเรือง
 กิตติธรรกุล
 เอื้อไพบูลย์
 สมควรพาณิชย์
 ปินพรวิรุจน์
 ชมภูอินโหว

มหาวิทยาลัยนเรศวร

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยนัย
 PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์
 CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์
 CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มูชิตา
 EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมขวัญ
 DS รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ
 BE อาจารย์ ดร.สุรพล นาแต่เนียง
 PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาตร
 GN รองศาสตราจารย์ ดร.พนัส

ภาชนะพรธรม์
 จันทรมินทร์
 กานต์ประชา
 สงฆ์จันทร์
 กิระวิทยา
 ธิยะมงคล
 แยมเม้น
 เจริญสุข
 แสงเงิน
 นัถฤทธิ

มหาวิทยาลัยรังสิต

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนา
 PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย
 CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล
 CT รองศาสตราจารย์ ดร.อดิธิรักษ์
 EL รองศาสตราจารย์ มนูญ
 CP รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงอาทิตย์
 PH อาจารย์ ดร.เสด็จิตต์
 BE รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส
 GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์

นิรัชฌนาภรณ์
 ทรัพย์สิงห์
 งามจรรยาภรณ์
 กาญจนกุลพิทย
 พ่วงพล
 ศรีมูล
 เพ็ชรประสาน
 สังวรศิลป์
 สุขสาตร

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

PW รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน
 PE รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล
 CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญญา
 EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริพงษ์
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ
 DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา
 BE รองศาสตราจารย์ ดร.พีชพันธุ์
 GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์

ปิยรัตน์
 ธราธิร์เศรษฐ์
 ชัยปัญญา
 ฉายสินธ์
 รอดอัมพร
 คุณารักษ์
 เจริญพงษ์
 มาตรา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยพร
 CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิตรี
 CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย
 EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวา
 DS รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพล
 GN รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม

หล่อทองคำ
 บุญเวช
 มลายเวช
 ปวรางกูร
 ศรีประโมง
 ยุกฤษิตานนท์
 ฤกษ์บุตร

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาของบทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕ (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

PW รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข
PE รองศาสตราจารย์ นภัทร
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร
CT รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา
EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพบูลย์
DS รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ
High School Special
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ

อุณหเลขกะ
วิจันเทพินทร์
ศรีวิฒนพล
สาคะรังค์
เกียรติสุขคณาธร
อุดมพรชากุล

อาชีวะพนิช

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฎิภาณ

เกิดลาภ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

PWรองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย
EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ
DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเสฏฐ์
BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิฐอาร์ญ
RE รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์

ภูมิภิตติพิชญ์
พันธ์คง
รักเหลื่อ
ศุภพิทักษ์สกุล
เรืองวารี
ศรีรินทร์ฉัตร
วิชัยพาณิชย์
แดงอม
ปิติมล
ปลั่งกลาง
แหงมงาม

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

PW รองศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ
PE ศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธราดล
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญศรี
EL รองศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์
CP รองศาสตราจารย์ ดร.ศันสนีย์
DS รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์
PH รองศาสตราจารย์ ดร.อุกฤษฏ์
BE รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษมศักดิ์

นุชประยูร
ข้าสุวรรณ
โกมลมีศรี
แก้วคำอ้าย
เอื้อตรงจิตต์
ธีรอำพน
มันคง
ธีรอำพน
อุทัยชนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

PW รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยรินทร์
CM ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา
EL รองศาสตราจารย์ ดร.จิระศักดิ์
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรัญญู
DS รองศาสตราจารย์ ดร.วิไลพร
PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรินทร์
BE รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดล

สิริสำราญบุกุล
อัศวโรดม
อัครเอกพาลิน
กุดถลาง
ชาญวุฒิธรรม
วงษ์เสรี
แชลล์
รัตนะวิศ
ยิ้มมัน
วิวัชรโกเศศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

PW รองศาสตราจารย์ชัยณรงค์
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราโมทย์
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์

วิเศษศักดิ์วิชัย
กมลขันติธร
อนันต์วราพงษ์
คงรัตนประเสริฐ

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

PW รองศาสตราจารย์ ดร.นิตย
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์เดช
GN อาจารย์ ดร.ชัยพร

เพชรรักษ์
จางอิสระกุล
กัรติพรานนท์
เขมะภาตะพันธ์

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาของบทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕ (ต่อ)

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

PE รองศาสตราจารย์ ดร.ไพบุลย์
 CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตามพัสเมษ
 CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ
 DS รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ
 PH รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย
 BE รองศาสตราจารย์ ดร.นภดล
 GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยศวีย์

นาคมหาลาสินธุ์
 บุญยะเวศ
 วรพจน์พิศุทธิ์
 พฤกษ์อรุณ
 โชคชัยธรรม
 ไพจิตรโรจนา
 อุทัยภักดี
 วีระกำแหง

มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา
 CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์
 CT อาจารย์ ดร.อัศรพงษ์
 EL รองศาสตราจารย์ สกรานต์
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์
 DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศาล
 PH รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์
 BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์
 GN อาจารย์ ดร.ศิริชัย

ชัยบุตร
 ยุบลโกศล
 เอกสิริ
 กันทวงศ์
 สุราษฎร์กุล
 พัฒน์ชู
 แสงอุดมเลิศ
 สุขโพธารมณ์
 เต็มโชคเกษม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

PW อาจารย์ ดร.เชิดชัย
 PE อาจารย์ ดร.ปิยสวัสดิ์
 CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิจ
 CT รองศาสตราจารย์ ดร.วันจักรี
 EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล
 DS อาจารย์ ดร.สันติ
 PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย
 BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเสริม
 GN ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์

ประภาณวัชรินทร์
 นวรัตน์ ณ อยู่ธยา
 กำหอม
 เล่นวารี
 จิรเสรีอมรกุล
 จิรจิต
 นุราช
 ภัทธนันท์
 แก้วกำเนิดพงษ์
 จ้างไทย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัยเชษฐ
 PE รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรจน์
 CM รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริจิตรา
 CT รองศาสตราจารย์ ดร.เขาวลิต
 EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ
 CP รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล
 DS ศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพงศ์
 PH อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์
 BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต
 GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชิระ

ฤกษ์ปรีดาพงศ์
 ศิริสุขประเสริฐ
 เจริญลาภนพรัตน์
 มิตรสันติสุข
 การะเกตุ
 รักษาพัชรวงศ์
 อารีกุล
 รพีศักดิ์
 ธนเทพาย
 จงบุรี

มหาวิทยาลัยสยาม

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์
 PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ
 CM พลโท ดร.สมพงษ์
 EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิภาวัลย์
 CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พกกิจ
 DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทัศน์ัย
 GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไวยพจน์

โสทรโยม
 นาราชภูรี
 ตัมลสวัสดิ์
 นาคทรัพย์
 สุวัฒน์
 พลอยสุวรรณ
 ศุภบวรเสถียร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

PW อาจารย์ ดร.พลสิทธิ์
 PE อาจารย์ ดร.วฤทธิ์
 CM รองศาสตราจารย์ ดร.วิกรม
 CT รองศาสตราจารย์ คนดิด
 EL รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุมาศ
 CP อาจารย์ ดร.กิตติคุณ
 DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังกกฤตว์
 BE รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย
 GN อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์

ศานติประพันธ์
 วิชกุล
 อีรภาพจรเดช
 เจษฎ์พัฒนานนท์
 คำลัดดี
 ทองพูล
 ดวงสร้อยทอง
 พฤกษ์ภัทรานต์
 วงษ์โสฬนากุล

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาของบทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕ (ต่อ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รองฤทธิ์
PE รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษ
CM รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมินทร์
EL รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวดี
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรารัตน์
DS รองศาสตราจารย์ ดร.อานุกาฬ
PH รองศาสตราจารย์ ดร.อาคม
BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยั้ง

ฉัตรถาวร
เฉยไสย
อิมถวิล
อาจฤทธิ์
ชัยมูล
เรืองชัยจตุพร
มีสมบูรณ์
แก้วระวีง
เจริญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์
PE รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต
CT อาจารย์ ดร.อนันต์
EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา
CP อาจารย์ ดร.ขวัญชัย
DS อาจารย์ ดร.นพดล
GN อาจารย์ ดร.ยุพดี

ทิพจร
คำน่าน
แก้วดวงตา
วงษ์จันทร์
ยิ่งชัย
เอื้อวิริยานุกูล
มนเฑียร
หัตถลิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

PW อาจารย์ ดร.วินัย
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อติศักดิ์
EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎาพร
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรฤกษ์
DS อาจารย์ ดร.ชัยพิชิต
PH อาจารย์ติสพล
BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร
GN อาจารย์สุธี

พรพจน์รัตนกุล
โพทองคำ
นุกูลเจริญลาภ
แข็งสารกิจ
สถานทรัพย์
เขยชื่น
คำพิมพ์
ฉ่ำเฉียวกุล
ปานยินดี
รุกขพันธุ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

PW รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร
CM เรืออากาศตรี ดร.พลกฤษณ์
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์
EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุรภัทร
DS อาจารย์ ดร.ฉัตรแก้ว
PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส

รักไทยเจริญชีพ
วุฒิพัฒน์พันธุ์
จริยตันติเวทย์
พันธุระ
สุดคนึง
อยู่สุข
จริยตันติเวทย์
คุณขาว
บุญเกียรติทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

PW รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิจ
CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์
CT รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี
CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนอมศักดิ์
GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภฤติเดช
DS อาจารย์ ดร.ประจวบ
PH อาจารย์ ดร.นิธิโรจน์

เกิดชื่น
ศรีธ
วงศ์ไทรรัตน์
ระวิกุล
โสภณ
บัวใหญ่
อินระวงค์
พรสุวรรณเจริญ

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

PW อาจารย์ ดร.ชาติ
PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชิต
CM อาจารย์บัญชา
CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฏฐธรรม
EL อาจารย์ธีรยุทธ
CP อาจารย์ ดร.ประภาส
DS รองศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์
BE อาจารย์ทรงพล
GN รองศาสตราจารย์วิญญู

ฤทธิ์ธีรฤ
เจริญ
บุรพัฒน์ศิริ
เกิดลำปางค์
จันทร์แจ่ม
ผ่องสนาม
โกคาร์ตน์กุล
รอดทอง
แสวงสินลิกิจ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาของบทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕ (ต่อ)

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

- PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรชัย
- PE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิมิต
- CM อาจารย์เสมา
- CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ
- EL ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทศวีร์
- CP อาจารย์ ดร.วนายุทธิ์
- DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เอกชัย
- PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เต็มพงษ์
- BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปรากฏฤต
- GN ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิซุขาร

- จอนัฐพัฒนกุล
- บุญภิรมย์
- พัฒน์ธิม
- อินทามิ
- ศรีโหมต
- แสนเงิน
- ดีศิริ
- ศรีเทศ
- เหลียงประดิษฐ์
- เยงศรีธวัช

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

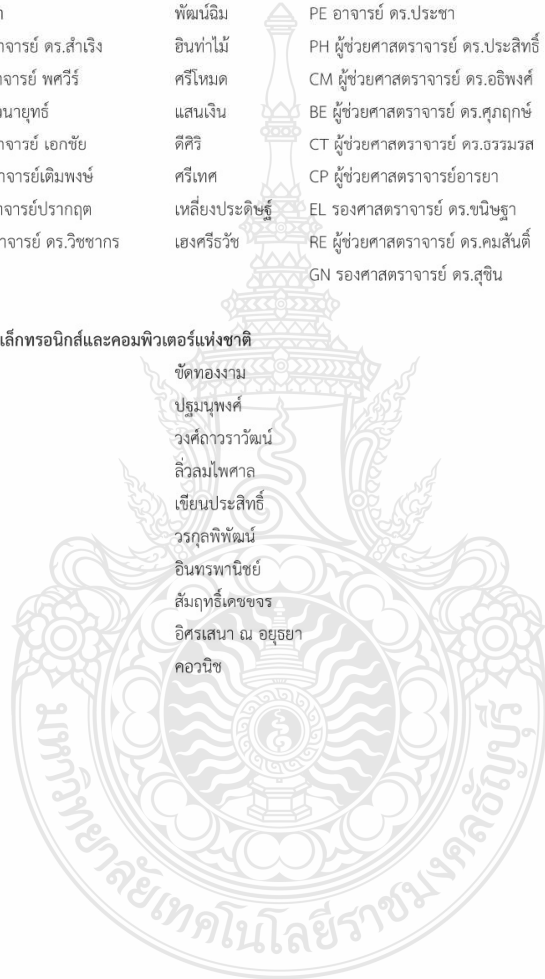
- PW ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสันต์
- DS ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรการ
- PE อาจารย์ ดร.ประชา
- PH ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์
- CM ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อธิพงษ์
- BE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์
- CT ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมวล
- CP ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อารยา
- EL รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา
- RE ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสันต์
- GN รองศาสตราจารย์ ดร.สุชิน

- ดาโรจน์
- วงศ์สายเชื้อ
- คำภักดี
- นศรราช
- สุริยา
- จันทร์จรัสจิตต์
- รักธรรม
- พลอเรนซ์
- แก้วแดง
- ดาโรจน์
- ไตรรงค์จิตเมฆา

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

- PW ดร.เจษฎา
- PE คุณสุทัศน์
- CM คุณกิตติ
- CT คุณอุตม
- EL ดร.ราชพร
- CP ดร.ชาลี
- DS ดร.อภิชาติ
- PH ดร.ศรันย์
- BE ดร.พศิน
- GN ดร.วุฒิภัทร

- ชิตทองงาม
- ปฐมบุพผศ
- วงศ์ถาวรวัฒน์
- ลิวิมลไพศาล
- เขียนประสิทธิ์
- วรกุลพัฒน์
- อินทรพานิชย์
- สัมฤทธิ์เดชขจร
- อิศรเสนา ณ อยุธยา
- คovanิช



คณะกรรมการดำเนินการจัดประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ	รอตอัมพร	ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา	คุณารักษ์	ประธานจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญญา	ชัยปัญญา	เลขานุการจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน	ปิยรัตน์
รองศาสตราจารย์ ดร.ทิฆัมภ์	เจริญพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา	คุณารักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำคุณ	ศรีสนิท
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์	มาตรา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล	ชูรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขไมพร	สุขแจ่มศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์	ฉายสินธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยณรงค์	คล้ายมณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรชัย	วิริยะสุทธิวงศ์
อาจารย์อาคม	ม่วงเขาแดง
อาจารย์สุทธิพันธ์	อักษรเนียม
อาจารย์นาวิ	รุจิตามพ์
อาจารย์ธานีรินทร์	ดวงจันทร์

คณะกรรมการฝ่ายพิธีการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์	จ้อยกลิต
อาจารย์ ดร.ปรารถนา	ประชานุรักษ์
นางสาวมาลี	สอนตา
นางสาวณิชาพัชร	พุทธเมธา
นางพะเยาว์	บุญโฉม
นางสุธิดา	วงศ์อารี
นางสาวจันทราภรณ์	พุนดี

กรรมการดำเนินการจัดประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕ (ต่อ)

คณะกรรมการฝ่ายจัดการรายได้

รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน	ปิยรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุณิศา	คุณารักษ์
นางสาวมาลี	สอนดา
นางสาววันวิสาข์	โกสินทร์
นางสาววิไล	ปรีชา
นางสาวลินดา	นิลพัท

คณะกรรมการฝ่ายลงทะเบียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์	นายสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวณ	ชูรัตน์
นางสาวยอดแก้ว	ผู้ภักดี
นางสาวศิริวรรณ	ดับทุกษ์
นางธิดา	ศรีกิ่งพาน
นางสาวณิชาพัชร	พุทธเมธา
นางพะเยาว์	บุญโถม
นางสุธิดา	วงษ์อารี

คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และประชาสัมพันธ์

อาจารย์ธานินทร์	ดวงจันทร์
อาจารย์สุทธิพันธ์	อักษรเนียม
นายณัฐกาญจน์	ไชยสมบุญณ์
นางธิดา	ศรีกิ่งพาน
นายกนก	สุขพูล
นางชนิษฐา	แก้วล้วน

กรรมการดำเนินการจัดประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕ (ต่อ)

คณะกรรมการฝ่ายยานพาหนะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิตร์	มาตรา
นางสาวมาลี	สอนดา
นางสาววิไล	ปรีชา
นายประพันธ์	บุญโถม
นายธเนตต์	จันทร์โชติ
นางชนิษฐา	แก้วล้วน

คณะกรรมการฝ่ายประเมินผล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา	कुमारักษ์
นางสาวมาลี	สอนดา
นางชนิษฐา	แก้วล้วน



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย	เดชอำนาจ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล	กาญจนชูชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.นิสาชล	ตั้งเสงี่ยมวิสัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาภรณ์	ธีรมงคลศรีมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์	บาลมงคล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร.ณพงศ์	ปนิธานธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์บุญช่วย	ทรัพย์มนชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณิภัทร	ภูมิภาค	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรโชค	ธนพิทักษ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย	ชั้นยากร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์	เยรบุดร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชชะ	จุลชาติ	มหาวิทยาลัยมหิดล
อาจารย์ ดร.สุพรรณ	ทิพย์ทิพากร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติการ	นันทสุข	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	วรพจน์พิศุทธิ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.นรารัตน์	เรืองชัยจตุพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ประมินทร์	อาจฤทธิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพิชญ์	มีสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงกฤษฏี	จงอุดมการณ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.พีระยศ	แสนโกษณ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร.อัจฉรา	ทิเชฐจำเริญ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.จงลักษณ์	พาหะชา	มหาวิทยาลัยพะเยา
รองศาสตราจารย์ ดร.เชวศักดิ์	รักเป็นไทย	มหาวิทยาลัยพะเยา
อาจารย์ ดร.วฤทธิ์	วิชกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อาจารย์ ดร.มงคล	แข่งเจีย	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีรวัจน์	มีสุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภภาพรรณ	สุวรรณสว่าง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัยรัตน์	มาติะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัดน์	ครั้งตันประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์	กมลขันดิธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร.ยุทธนา	จงเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	เมฆลอย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนนท์	นำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

อาจารย์ ดร.เดือนแรม	แห่งเกี่ยว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนะปะนีย์	ตรีรัตนภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักวี	หะยะมิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุศักดิ์	บิสลาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิทธิ์	วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกครอง	วงศ์คุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุสลี	สุทธีวีร์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาวนันต์	จำเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์	จันทร์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสิมันต์	สิทธิกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
อาจารย์ ดร.จิรพัฒน์	แสงทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
อาจารย์ ดร.วินัย	ศิวารวม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
อาจารย์ณัฐพงศ์	จันทร์แดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะพงศ์	พันธ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย	เมืองประทุม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชชัย	พุ่มพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.ศรัณย์	คัมภีร์ภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.มงคล	दानันท์ประทีป	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์	กานต์ประชา	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
รองศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์	จันทร์มินทร์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	เรืองสินชัยวานิช	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาต	แสงเงิน	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยนัย	ภาชนะพรรณม	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุขิตา	สงฆ์จันทร์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิมล	วัฒนวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร	เดชศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์	ภัทรมาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล	จิรจรีด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์	กันทวงศ์	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยั้ง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์วัฒนา	พันธ์ลำเจียก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติพงศ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเสฏฐ์	วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โพธิ์ชัย	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พร้อมศักดิ์	อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนชिरินทร์	ราชบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.ศศิรมย์	พานทอง	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชิน	ไตรรงค์จิตเมฆา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์	จันทร์จรัสจิตต์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพงศ์	สุรียา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บงกช	สุขอนันต์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อาจารย์ ดร.นักรบ	จินาพร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ	สื่อเอย	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชโย	ธรรมรัตน์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
อาจารย์ ดร.อิทธิพงศ์	ชัยสายันท์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ	เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิฏญา	คุณขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร	วุฒิพัฒน์พันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุรฉกร	อยู่สุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ	คุณรัชนีศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฎา	ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.	พวงนาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร.พลิชฐ์	สุวรรณกิงคาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร.อานนท์	สิงห์เสถียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร.ธนรัตน์	ต้นมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร.ยุทธนา	โสครินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร.เกรียงไกร	เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย	ฉิมขวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา	อุซารสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพร	ณรงค์ฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ	พึงสุวรรณรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดารัตน์	ขวัญอ่อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล	รัตนนิยมชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีญา	กาญจนวัฒนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์	ภูผาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อาจารย์ ดร.คมศักดิ์	ศรีวิสุทธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

อาจารย์ ดร.สุภาพร	บุญฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อาจารย์ ดร.สำราญ	สันทาลุนัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนา	นิรัคชนาภรณ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย	ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยรังสิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์	ศุขสารท	มหาวิทยาลัยรังสิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร	ปานอินดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกรกฤษ	เชยชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤษ	บุญยิ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์	นุกุลเจริญลาภ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชานันท์	วงศ์ศิริธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค	โพทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัทธ์	อานมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ปรัชญา	มงคลไวย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ดิศพล	ฉ่ำเฉียวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์พลการ	พรหมเมตร์	มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
อาจารย์ ดร.พัชรี	กองภาค	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา	สุนทรวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร.มรกต	การดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร.กฤตชัย	บุญศิวนนท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุภชัย	ปลายเนตร	มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน	ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์	มาตรา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา	คุณารักษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญา	ชัยปัญญา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล	ชรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำคุณ	ศรีสินี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์	ฉายสินธ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยณรงค์	คล้ายมณี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรชัย	วิริยะสุทิววงศ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์อานันท์	ดวงจันทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์สุทธิพันธ์	อักษรเนียม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์วันวี	รุจิตามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ	เรื่องศิริ	สถาบันเทคโนโลยีจิดรลดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ	เกิดลาภ	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ	อินท่าไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรชัย	จูนุวัฒน์กุล	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.ตनुพล	คำปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ	อุดมพรชากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา	กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.สัตดาภูมิ	ไทยพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.ปิยะภัทร	พ่วงศรี	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน





กำหนดจัดงาน และนำเสนอบทความ
การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๕

วันที่ 16 พฤศจิกายน 2565					
08.30 - 14.30 น.	ลงทะเบียน				
09.00 - 10.30 น.	การนำเสนอบทความ				
Room	อินทนิล 1	อินทนิล 2	อินทนิล 3	อินทนิล 4	อินทนิล 5
Paper Sequence					
10.30 - 10.45 น.	การนำเสนอเป็นกลุ่มย่อยของผู้ประกอบการ				
10.45 - 12.00 น.	พักรับประทานอาหารว่าง				
12.00 - 12.00 น.	การนำเสนอเป็นกลุ่มย่อยของผู้ประกอบการ (ต่อ)				
12.00 - 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน				
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความ 1.				
Room	อินทนิล 1	อินทนิล 2	อินทนิล 3	อินทนิล 4	อินทนิล 5
Session	GN1	CP1	EL1	PW1	CM1
Paper Sequence	IGN-1, GN-1 - GN-5	CP-1 - CP-4	RE-1, EL-2 - EL-5	IPW-1, PW-1 - PW-5	CM-1 - CM-5
Session Chair	ผศ.วิรัชพงษ์ ภายสิงห์	อ.ดร.ภุชญา เลื่องทาสธิตย์	ผศ.ชัยณรงค์ คดีชัยเมธี	ผศ.ดร.บุษยามา คงเงิน	ผศ.ดร.พิชญภา ชัยปัญญา
14.30 - 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง				
14.45 - 16.30 น.	การนำเสนอบทความ 2.				
Room	อินทนิล 1	อินทนิล 2	อินทนิล 3	อินทนิล 4	อินทนิล 5
Session	GN2	CP2	DS1	PW2	CM2
Paper Sequence	IGN-2, GN-6 - GN-10	CP-6 - CP-9	DS-1 - DS-5	PW-6 - PW-11	CM-6 - CM-10
Session Chair	ผศ.ดร.วิวัฒน์ ครุรัตน์ประเสริฐ	ผศ.ดร.ประมวล ฐิตัน	อ.สุเชิษณ์ อักษรนิยม	รศ.ดร.กานต์ เกิดชื่น	ผศ.ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา
17.00 - 18.00 น.	พักผ่อนตามอัธยาศัย				
18.00 - 21.00 น.	งานเลี้ยงต้อนรับ (Welcome Party)				

รายชื่อบทความสาขาไฟฟ้ากำลัง			
หมายเลข	ลำดับ	ชื่อบทความ	หน้าที่
บทความ	บทความ		
P02598	iPW-1	เครื่องมือสำหรับการจำลองเพื่อการจัดการระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ (บทความรับเชิญ)	86
P02373	PW-1	การวิเคราะห์ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	90
P02377	PW-2	อิทธิพลของจุดเปลี่ยนแปลงของตัวประมาณเอ็มทิวไปสเวปปี-ฮูเบอร์ที่มีต่อการประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง	94
P02380	PW-3	การคำนวณการไหลผนวกไหลคอมเตอรืเหนียวนำโดยใช้ข้อมูลผู้ผลิต	98
P02382	PW-4	การออกแบบระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไพธอน	102
P02383	PW-5	การศึกษาความสัมพันธ์ของภาระโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล และอุณหภูมิภายในหม้อแปลงระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	106
P02388	PW-6	การระบุตำแหน่งความผิดปกติในสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเปรียบเทียบวิธีคำนวณอิมพีแดนซ์ และคำนวณด้วยวิธีคลื่นสะท้อนแบบปลายเดียว	110
P02392	PW-7	การวิเคราะห์ความเหมาะสมในการจัดการพลังงานด้วยโซล่าเซลล์	114
P02393	PW-8	การพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าในสถานการณ์โควิด-19	118
P02397	PW-9	การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติ	122
P02402	PW-10	การควบคุมอินเวอร์เตอร์เครื่องปรับอากาศสำหรับเพิ่มแรงเฉื่อยเสมือนของไมโครกริด	126
P02403	PW-11	การควบคุมประสานกันของ HVDC และเครื่องปรับอากาศด้วยตัวควบคุม PID ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำเสถียรภาพความถี่ระบบไฟฟ้ากำลังเชื่อมโยงหลายพื้นที่	130
P02411	PW-12	การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าอย่างเหมาะสมสำหรับการเลือกกับดักเครื่องในการป้องกันฟ้าผ่าที่มีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่าย 22 kV โดยวิธีการประเมินดัชนีความเสี่ยงหาคำนวณน่าจะเป็น	134
P02420	PW-13	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งร่วมกับการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบสถานีขาร์จรถยนต์ไฟฟ้า	138
P02431	PW-14	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีสำหรับวงจรองกำลังแยกที่แบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส	142
P02433	PW-15	การตอบสนองเชิงพลวัตของตัวควบคุมกระแสสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวนำสามเฟส	146
P02436	PW-16	ผลกระทบของนาโนแกรฟีนต่อการยับยั้งการเสื่อมสภาพของฉนวนอีพ็อกซีเรซิน	150
P02454	PW-17	การประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำ (กังหันน้ำแบบเทอร์โบ)	154
P02478	PW-19	การประเมินศักยภาพของผลกระทบจากมุมต่อค่าไดอะแกรมการสูญเสียของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา	159
P02481	PW-20	การวางแผนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	163

การวิเคราะห์ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Analysis of Testing Submerged Solar Panels in a Solar Power Plant

อธีวัฒน์ สนิทบุญ และ บุญยัง ปลั่งกลาง¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

athiwat_s@mail.rmutt.ac.th¹, boonyang.p@en.rmutt.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำและแช่น้ำลึก และมีระยะเวลาเกินกว่าที่มาตรฐาน IP67 กำหนดไว้ว่าสามารถป้องกันน้ำที่ระดับความลึก 1 เมตร ระยะเวลา 30 นาที เป็นมาตรฐานที่ผู้ทำการทดสอบให้หลักประกันไว้ เพื่อวิเคราะห์ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีคุณสมบัติเชิงสมรรถนะและความปลอดภัย เหมาะสมกับการใช้งานอยู่หรือไม่ โดยมีขั้นตอนหลัก ๆ อยู่ 8 ขั้นตอนคือ สุ่มเลือกกลุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความถูกต้องเหมาะสมตามหลักสถิติ โดยอ้างอิงจากราง Krejcie & Morgan โดยมีการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา การตรวจสอบอื่น เช่น Leakage Voltage Test, Leakage Current Test, Insulation Test, Wet Leakage Current Test และ I-V Test จากผลการวิเคราะห์พบว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงเท่านั้นที่มีสมรรถนะและคุณภาพเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax@STC เมื่อเทียบกับ Specification ลดลงเฉลี่ย 43.99% และ 57.73% ตามลำดับ และค่าความต้านทานฉนวนของพื้นที่แผงของกลุ่มที่ 1 และ 2 จำนวน 85.00% และ 96.67% ไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสภาวะเปียกชื้น

คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำ การทดสอบฉนวน ทดสอบ I-V

Abstract

This paper presents an inspection analysis of submerged solar panels that had been submerged in water and exceeded the IP67 standard time limitation to be protected against water at a depth of 1 meter for 30 minutes. The standard was used to guarantee by the testers. The analysis was used to inspect that weather the solar panels were in the good performance, safety feature, and still suitable for the use or not. There were 8 main steps for the inspection by randomly selecting the sample of solar panels that were statistically accurate based on the Krejcie & Morgan table including: visual inspection of the solar panels, Leakage Voltage Test, Leakage Current Test, Insulation Test, Wet Leakage Current Test, and I-V Test. From the analysis results, only the samples of solar panels in the reference group were the good performance, good quality, and suitable for use, while the group 1 and 2

were unsuitable for use due to the percentage of Pmax@STC. The average Pmax@STC decreased of 43.99% and 57.73% respectively. The insulation resistance multiplied by panel area of the group 1 and 2 were 85.00% and 96.67%, therefore, they were not suitable for use in wet conditions.

Keywords: Submerged Solar Panel, Insulation Test, I-V Test

1. บทนำ



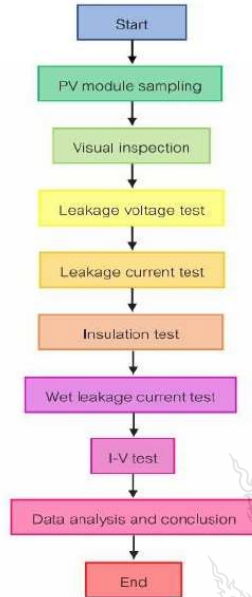
รูปที่ 1. พื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำเสนอ

จากเหตุการณ์น้ำท่วม โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้เกิดความเสียหายแก่โรงไฟฟ้า โดยเฉพาะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจมน้ำเป็นเวลานานมากกว่า 5 วัน หลังจากน้ำลดได้ทำการปรับปรุงโรงไฟฟ้าให้สามารถขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ได้ แต่มีความกังวลเกี่ยวกับสมรรถนะและความปลอดภัยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำเป็นชนิดผลึกรวมซิลิคอน ซึ่งมีระยะเวลาในการจมน้ำแตกต่างกันสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ จมน้ำ 5 - 8 วัน จำนวน 73,558 แผ่นและจมน้ำ 10 - 12 วัน จำนวน 38,240 แผ่น จากข้อมูลดังกล่าวพิจารณาแล้วพบว่ามีการจมน้ำเกินกว่าเงื่อนไขที่กำหนดไว้ใน IP 67 โดยกำหนดให้ทำการทดสอบแซลูปกรณที่จะทดสอบลงในน้ำระดับสูงเหนืออุปกรณ 1 เมตร 30 นาที จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีน้ำหรือความชื้นแทรกซึมเข้าไปในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นจึงมีกระบวนการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จมน้ำว่ายังมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานอยู่หรือไม่

2. กระบวนการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำ



กระบวนการตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำมีขั้นตอนหลัก ๆ อยู่ 8 ขั้นตอนซึ่งลำดับขั้นตอนการทดสอบดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ

2.1 การสุ่มเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การสุ่มตัวอย่างซึ่งใช้ในกระบวนการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จมน้ำ โดยอ้างอิงจากตารางของ Krejcie & Morgan [1] ซึ่งให้ความเชื่อมั่น 95% และผิดพลาดไม่เกิน 5% โดยกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

- 2.1.1 แผงจมน้ำไม่เกิน 8 วัน (กลุ่มที่ 1)
- 2.1.2 แผงจมน้ำเกิน 8 วัน (กลุ่มที่ 2)
- 2.1.3 แผงไม่จมน้ำ (กลุ่มอ้างอิง)

2.2 ตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา

การตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตาตามมาตรฐาน IEC 61215 จะทำการตรวจสอบในสภาวะที่มีแสงสว่างเพียงพอเพื่อตรวจสอบความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้ รอยแตก หัก บิดเบี้ยว ลักษณะ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผิดปกติ การสัมผัสกันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกันเองหรือการสัมผัสกันของเซลล์แสงอาทิตย์กับเฟรม ความผิดปกติของสารที่ใช้ยึดติดเช่น กาว EVA ฟองอากาศใน EVA หรือการลอกตัวของ EVA กับวัสดุที่ยึดติดพื้นผิวที่ผิดปกติของพื้นผิวพลาสติก ความผิดปกติของ

ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่อาจทำให้เกิดไฟฟ้ารั่วไหลได้ รอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ความผิดปกติอื่น ๆ

2.3 Leakage Voltage Test

ในการทำการทดสอบ Leakage Voltage Test จะเริ่มด้วยการบันทึกค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากเครื่อง Irradiation and temperature meter จากนั้นใช้ Voltmeter ย่าน DC วัดค่าแรงดันระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อวัดค่า V_{oc} แล้วบันทึกค่า จากนั้นวัดแรงดันระหว่างขั้วบวกกับโครงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยขั้วบวกของ Voltmeter ต่อกับขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และขั้วลบของ Voltmeter ต่อกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วบันทึกค่าแรงดันรั่วไหลระหว่างขั้วบวกกับเฟรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และวัดแรงดันระหว่างขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับโครงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีการในลักษณะเดียวกันกับการวัดแรงดันขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.4 Leakage Current Test

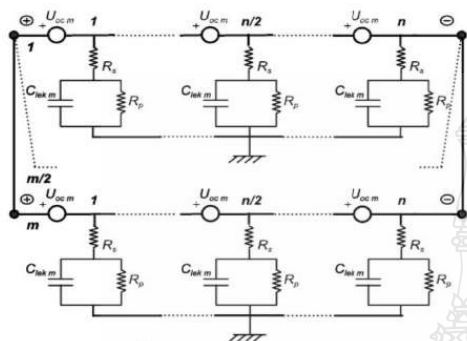
ในการทดสอบ Leakage Current Test จะต้องทำการวัดค่าในเวลากลางคืนหรือต้องมีการปกคลุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ให้มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะดันแรงดันทดสอบของเครื่องมือทดสอบ ในการทดสอบนี้จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกับสายไฟฟ้าที่มีขั้วต่อที่สามารถสอดเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เพื่อทำการช้อนขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำขั้วบวกของ Insulation tester ต่อเข้ากับสายดังกล่าวและนำขั้วลบของ Insulation tester ต่อเข้ากับเฟรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากนั้นทำการทดสอบแรงดันที่ 3000 Vdc เป็นเวลา 1 นาทีแล้วบันทึกค่า โดย IEC 61215 และ IEC 61646 กำหนด Leakage current ต้องไม่เกิน 1 mAdc หรือเกิดการ Breakdown

2.5 Insulation Test

ในการทดสอบ Insulation Test จะต้องทำการวัดค่าในเวลากลางคืนหรือต้องมีการปกคลุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ให้มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะดันแรงดันทดสอบของเครื่องมือทดสอบ ในการทดสอบจะทำการวัดค่าความต้านทานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยต่อขั้วบวกและโครงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของ Insulation tester ทดสอบที่แรงดัน 1000 Vdc เป็นเวลา 2 นาที แล้วบันทึกค่า จากนั้นต่อขั้วลบและโครงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของ Insulation tester ทดสอบที่แรงดัน 1000 Vdc เป็นเวลา 2 นาที แล้วบันทึกค่า จากนั้นนำผลการทดสอบมาคำนวณหาค่าความต้านทาน Array แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจากมาตรฐาน IEC 62446 กำหนดให้



ความต้านทาน Array แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องไม่ต่ำกว่า 1 MΩ ในการคำนวณนี้ใช้วงจรสมมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสมมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

จากวงจรสมมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค่าความต้านทาน Array แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จาก

$$(1/R_{tot}) = (1/(R_{s1} + R_{p1})) + (1/(R_{s2} + R_{p2})) + \dots + (1/(R_{s,m \times n} + R_{p,m \times n})) \quad (1)$$

2.6 Wet Leakage Current Test

ในการทำการทดสอบ Wet Leakage Current Test จะต้องทำการวัดค่าในเวลากลางคืนหรือต้องมีการปกคลุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ให้มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้านแรงดันทดสอบของเครื่องมือทดสอบ ในการทดสอบนี้จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกับสายไฟฟ้าที่มีขั้วต่อที่สามารถต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เพื่อทำการช็อดขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปแช่ในบ่อสารละลายที่มีความต้านทานไฟฟ้าไม่เกิน 3.5 kΩ อุณหภูมิสารละลาย 22 ± 3 °C จากนั้นต่อสายไฟฟ้าที่ช็อดขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับขั้วบวกของ Insulation tester ส่วนขั้วลบของ Insulation tester นี้ไปแช่ไว้ในสารละลาย แซ่แผงเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมสายไฟฟ้าที่ช็อดขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 5 นาที เพื่อให้ น้ำแทรกซึมเข้าไปถึงทุกส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการทดสอบที่แรงดัน 1000 Vdc เป็นเวลา 2 นาที แล้วบันทึกค่า โดย IEC 61215 และ IEC 61646 กำหนดความต้านทานฉนวนคูณพื้นที่แผงชนิดผลึกรวมซิลิคอนต้องไม่ต่ำกว่า 40 MΩm² และ ไม่ Breakdown

2.7 I-V Test

ในการทดสอบ I-V Test จะต้องทำการวัดค่าในสภาวะที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์ไม่ต่ำกว่า 700 W/m² เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการแปลงค่าที่วัดจริงเป็นค่า STC ในการทดสอบนี้จะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทำความสะอาดแล้วนำไปตั้งไว้กลางแดดหันหน้าแผงไป

ทางทิศใต้ จากนั้นตากแดดไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิแผงคงที่ จากนั้นวัดค่าโดยต่อขั้วบวกและขั้วลบของแผงเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของ PV tester with I-V curve tracing 713 Irradiation and temperature meter ในระนาบเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแผงเข้าบริเวณใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการทดสอบ I-V ตามโปรแกรมของเครื่อง

3. ผลการทดสอบ

3.1 การตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสายตา

จากการตรวจสอบพบว่ากลุ่มของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม (กลุ่มที่ 1) จมน้ำเกิน 8 วัน, (กลุ่มที่ 2) จมน้ำไม่เกิน 8 วัน, (กลุ่มอ้างอิง) ไม่จมน้ำ ไม่พบความผิดปกติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผง

3.2 Leakage Voltage Test

เมื่อวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ Voc @STC เทียบกับ Spec ของแผงพบว่า แผงกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่ 81.72% กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยที่ 70.64% และกลุ่มอ้างอิงก็มีค่าเฉลี่ยที่ 98.54% ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงที่ถูกสุ่มกลุ่มที่ 1 มีสมรรถนะลดลงไปมากโดยมีค่า Voc ที่ลดลงจาก Spec เฉลี่ย 18.28% กลุ่มที่ 2 มีสมรรถนะลดลงไปมากโดยมีค่า Voc ที่ลดลงจาก Spec เฉลี่ย 29.36% ผลการทดสอบในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปค่า Voc และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้ง 3 กลุ่มที่สุ่ม

ลำดับ	รายการ	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มอ้างอิง
1	ช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ทดสอบ (W/m ²)	466.00 - 856.00	514.00 - 940.00	914.00
2	ความเข้มรังสีอาทิตย์ทดสอบเฉลี่ย (W/m ²)	674.95	719.70	914.00
3	ช่วงอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (°C)	43.00 - 57.00	40.00 - 58.00	60.00
4	อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย (°C)	50.80	50.35	60.00
5	แรงดัน Voc ที่การวัดได้ (VDC)	0.00 - 40.9	0.00 - 40.72	38.80 - 40.25
6	ค่า V _{oc} ที่การวัดได้เฉลี่ย (VDC)	33.26	28.94	39.39
7	ช่วงค่า V _{oc} @STC (VDC)	0.00 - 46.59	0.00 - 45.01	44.28 - 45.64
8	ค่า V _{oc} @STC เฉลี่ย (VDC)	37.17	32.22	44.79
9	ช่วงเปอร์เซ็นต์ V _{oc} @STC เมื่อเทียบกับแบบ (%)	0.00 - 102.51	0.00 - 98.61	97.43 - 100.43
10	เปอร์เซ็นต์ V _{oc} @STC เฉลี่ยเมื่อเทียบกับแบบ (%)	81.72	70.64	98.54

3.3 Leakage Current Test

จากผลการทดสอบเมื่อทำการวิเคราะห์ค่า Leakage Current ของกลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มพบว่า กลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่ 0.004 mAdc โดยไม่มีการ Breakdown ของฉนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยที่ 0.027 mAdc โดยมีการ Breakdown ของฉนวนแผง 1 แผง และกลุ่มอ้างอิงก็มีค่าเฉลี่ยที่ 0.003 mAdc ไม่มีการ Breakdown จากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงก็มีการคงสภาพของฉนวนดีที่สุดตามมาด้วยกลุ่ม 1 และ 2 ซึ่งมีการคงสภาพของฉนวนใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่ากลุ่มอ้างอิงก็พอสมควรนอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่มยังสามารถทนแรงดัน

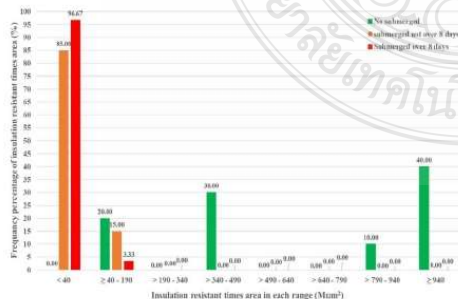
ทดสอบที่ 3 kVdc เป็นเวลา 1 นาที ยกเว้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มที่ 2 จำนวน 1.67% ซึ่งมีการ Breakdown ขณะทำการทดสอบ โดยมาตรฐาน IEC 61215 และ IEC 61646 กำหนด Leakage current ต้องไม่เกิน 1 mA/dc หรือเกิดการ Breakdown

3.4 Insulation test

จากผลการทดสอบ Insulation test ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้ง 3 กลุ่มที่ถูกสุ่มพบว่าความต้านทานฉนวนด้านข้างวัดเทียบกับกราวด์ของกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่ 1699.53 MΩ กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยที่ 1810.06 MΩ กลุ่มอ้างอิงที่มีค่าเฉลี่ยที่ 2354.60 MΩ ส่วนค่าความต้านทานฉนวนด้านลบเทียบกับกราวด์กลุ่มที่ 1 ค่าเฉลี่ยที่ 1890.49 MΩ กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยที่ 2015.38 MΩ กลุ่มอ้างอิงที่มีค่าเฉลี่ยที่ 2640.30 MΩ จากสมการที่ (1) สามารถคำนวณค่าความต้านทานฉนวนของ Array แผงเซลล์แสงอาทิตย์ กลุ่มที่ 1 ได้เท่ากับ 0.59 MΩ กลุ่มที่ 2 ได้เท่ากับ 0.68 MΩ กลุ่มอ้างอิงได้เท่ากับ 1.01 MΩ เมื่อนำค่าความต้านทานทั้ง 3 กลุ่มมาวิเคราะห์พบว่ากลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีการคงสภาพของฉนวนต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 62446 พอสวมครว ส่วนกลุ่มอ้างอิงก็ยังมีคงสภาพของฉนวนที่มากกว่ามาตรฐาน IEC 62446 กำหนดไว้ที่ 1 MΩ

3.5 Wet Leakage Current Test

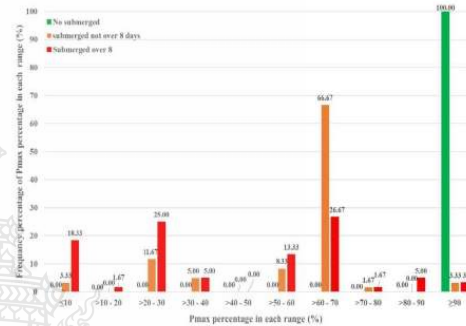
จากผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่าความต้านทานฉนวนจุดพื้นที่แห้งของกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่ 28.40 MΩm² กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยที่ 17.39 MΩm² และกลุ่มอ้างอิงที่มีค่าเฉลี่ยที่ 667.13 MΩm² จากข้อมูลบ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงที่นั่นที่คงสภาพของฉนวนในสภาวะที่แห้งอยู่ในสภาวะสายมีค่าความต้านทานฉนวนจุดพื้นที่แห้งสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ซึ่งต้องไม่ต่ำกว่า 40.00 MΩm² ได้ทุกแผง 100% ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 จำนวน 85.00% และ 96.67% ไม่สามารถคงสภาพฉนวนเมื่อแช่อยู่ในสภาวะลายให้มีค่าความต้านทานฉนวนจุดพื้นที่แห้งได้ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61215 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสภาวะเปียกชื้น



รูปที่ 4 การกระจายตัวของค่าความต้านทานฉนวนจุดพื้นที่แห้งของกลุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม

3.6 I-V Test

ผลการทดสอบบ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงในกลุ่มควบคุมเท่านั้นที่มีกำลังไฟฟ้า สมรรถนะ และคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax@STC เมื่อเทียบกับ Spec ลดลงเพียง 5.06% ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 มีกำลังไฟฟ้า สมรรถนะ และคุณภาพของแผงลดลงไปมาก โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax@STC เมื่อเทียบกับ Spec ลดลงถึง 43.99% และ 57.73% ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 5 การกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax @STC เมื่อเทียบกับ Spec ของกลุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสุ่มทั้ง 3 กลุ่ม

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบได้บ่งชี้ให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มอ้างอิงที่นั่นที่มีสมรรถนะและคุณภาพเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ของ Pmax@STC เมื่อเทียบกับ Specification ลดลงถึง 43.99% และ 57.73% ตามลำดับและค่าความต้านทานฉนวนจุดพื้นที่แห้งของกลุ่มที่ 1 และ 2 จำนวน 85.00% และ 96.67% ไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสภาวะเปียกชื้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้เนื่องจากได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและพื้นที่จากบริษัทเอส ที อีเนอร์จี จำกัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert V Krejcie and Early W. Morgan, Educational and Psychological Measurement, (n.p., 1970), 608-609.)
- [2] IEC 60529 Degrees of Protection Provided By Enclosures
- [3] J.C.Herna'ndez, P.G. Vidal, and A. Medina, Characterization of the insulation and leakage current of PV generators: Relevance for human safety, 2010, Renewable Energy, 35 : 593-610

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายอิวัฒน์ สนิทบุญ
วัน เดือน ปีเกิด 16 มีนาคม 2536
ที่อยู่ 110 หมู่ 17 ต.ประสุข อ.ชุมพวง
จังหวัดนครราชสีมา 30270
การศึกษา ปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน วิศวกรไฟฟ้า
บริษัท มาทีเล โซลาร์ จำกัด
พ.ศ.2563 ถึง ปัจจุบัน
วิชาชีพ ภาควิศวกรไฟฟ้า
เบอร์โทรศัพท์ 09-5776-0450
อีเมล athiwat_s@mail.rmutt.ac.th

