ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สาย เพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

Wireless Monitoring and Performance Analysis System for Solar Panels with Predictive Maintenance Capabilities

ภัคพงศ์ คำกุล

PHUKKHAPONG KHAMKHUN

ธนภัทท์ แสงแก้ว

THANAPUT SANGKAEW

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2568

Wireless Monitoring and Performance Analysis System for Solar Panels with Predictive Maintenance Capabilities

MR.PHUKKHAPONG KHAMKHUN

MR.THANAPUT SANGKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR2025

คณะวิศวกรรมศาสตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจาคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ

หัวขอปริญญานิพนธ	ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สายเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน
นักศึกษา	ภัคพงศ์ คำกุล **รหัสนักศึกษา** 65010809 ธนภัทท์ แสงแก้ว **รหัสนักศึกษา** 65010416
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อาจารยผูควบคุมปริญญานิพนธ์

_____

(ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

หัวขอปริญญานิพนธ ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สายเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

นักศึกษา ภัคพงศ์ คำกุล **รหัสนักศึกษา** 65010809
ธนภัทท์ แสงแก้ว **รหัสนักศึกษา** 65010416

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2568

อาจารยผูควบคุมปริญญานิพนธ์ ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและตรวจสอบระบบบันทึกข้อมูลต้นทุนต่ำ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพีสามสอง ที่มีสัญญาณไร้สายในตัว เป็นแกนหลักในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์สมรรถนะแบบทันที ผ่านกูเกิลชีต ผลการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจำลองสัญญาณยืนยันถึงความเที่ยงตรงของระบบวัดค่า โดยค่าที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล 12 บิต มีความสอดคล้องสูงกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ซึ่งเป็นการยืนยันความสำเร็จของการสอบเทียบเบื้องต้น นอกจากนี้ ระบบยังประสบความสำเร็จในการดำเนินการส่งชุดข้อมูลขึ้นสู่คลาวด์ได้อย่างต่อเนื่องและทันที ซึ่งยืนยันความน่าเชื่อถือเชิงปริมาณของระบบ อย่างไรก็ตาม ข้อวิจารณ์คือการทดลองขั้นต่อไปจำเป็นต้องพิจารณาถึงความท้าทายจากความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปลงสัญญาณ และการจัดการสัญญาณรบกวน เมื่อนำไปใช้ในการทดสอบวัสดุไวแสง เช่น ภาวะหน่วง ได้อย่างแม่นยำ

Project Title	Wireless Monitoring and Performance Analysis System for Solar Panels with Predictive Maintenance Capabilities
Student	MR.PHUKKHAPONG KHAMKHUN MR.THANAPUT SANGKAEW
Degree	Bachelor of Engineering in Electronics Engineering
Year	2025
Project Advisor	Assist. Prof. Dr. Weera Pengchan

ABSTRACT

This project focuses on the development and validation of a low-cost data logging system using the ESP32 microcontroller with built-in wireless connectivity as the core for measuring the voltage and current of solar cells, to support instantaneous performance analysis via Google Sheets. Initial test results using a power supply to simulate the signal confirmed the precision of the measurement system, where the values obtained from the 12-bit Analog-to-Digital Converter showed high concordance with the reference measurement instrument, confirming the success of the preliminary calibration. Furthermore, the system successfully conducted continuous and instantaneous transmission of the data set to the cloud, confirming the system's quantitative reliability. However, a critique is that the next experimental phase needs to consider the challenges posed by the non-linearity of the signal converter and noise management when applied to testing photoactive materials, such as hysteresis, with accuracy.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธเรื่อง"ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สายเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน" เล่มนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องให้โครงงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระ เพ็งจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และให้ความช่วยเหลือในทุกขั้นตอนของการจัดทำโครงงาน จึงทำให้โครงงานเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และให้แนวทางอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนร่วมสถาบันทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านความคิดเห็นและแลกเปลี่ยนแนวคิดทางวิชาการ จนทำให้ข้าพเจ้าได้รับมุมมองที่กว้างขึ้นในการศึกษาครั้งนี้

ภัคพงศ์ คำกุล

ธนภัทท์ แสงแก้ว

สารบัญ

บทหน้า

บทคัดย่อ I

สารบัญ IV

สารบัญรูปภาพ VII

บทที่ 1 1

บทนำ 1

1.1 กล่าวนำ 1

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา 3

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่จะใช้ในโครงงาน 4

1.5 ขอบเขตของโครงงาน 5

1.6 รายละเอียดขั้นตอนของโครงงาน 6

บทที่ 2 7

หลักการทางวิศวกรรมของระบบตรวจวัดไร้สายและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน 7

2.1 กล่าวนำ 7

2.2 หลักการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 7

2.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ 8

2.2.2 ลักษณะเฉพาะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์สุริยะ 11

2.3 การวัดค่าทางไฟฟ้าและพารามิเตอร์ด้านพลังงาน 16

2.3.1 การจำแนกลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะด้วยเส้นโค้งกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (I-V Curve) 16

2.3.2 การวัดเส้นโค้งความหนาแน่นกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (J-V Curve) ด้วยเครื่อง Source Measure Unit (SMU) 17

2.4 ประเภทของเซลล์สุริยะ 20

2.4.1 เซลล์สุริยะยุคแรก 20

2.4.2 เซลล์สุริยะยุคที่ 2 21
2.4.3 เซลล์สุริยะยุคที่ 3 22
บทที่ 3 26
การออกแบบวงจร 26
3.1 บทนำ 26
3.2 วงจร ESP32 27
3.3ชั้นการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Layer) 29
3.3.1ชั้นการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Layer) 30
3.3.2 ชั้นการจัดเก็บบนคลาวด์ (Cloud Storage via Google Sheets) 30
3.3.3ชั้นการแสดงผล — Progressive Web App (PWA) 31
บทที่ 4 33
ผลการดำเนินงาน 33
4.1 คุณสมบัติที่ต้องการ 33
4.1.1 ความแม่นยำเชิงปริมาณสูงในการวัดค่า (High Quantitative Accuracy) 33
4.1.2 การส่งข้อมูลแบบทันทีและต่อเนื่อง (Instantaneous and Continuous Data Logging) 33
4.2 ผลการทดลอง 34
4.2.1 การทดลองวัดค่ากระแส (ค่าที่ได้ขึ้นมาใน Google Sheet) 34
4.2.2 การทดลองวัดค่าแรงดัน (ค่าที่ได้ขึ้นมาใน Google Sheet) 35
4.3 ผลการตรวจวัดผ่านระบบ Monitoring (Dashboard) 35
4.3.1 การแสดงผลแรงดันไฟฟ้า (Voltage) 36
4.3.2 การแสดงผลกำลังไฟฟ้า (Power) 36
4.3.4 การแสดงผลผ่านdashboard(PWA) 37
4.3.3 การแสดงผลความเข้มแสง (Solar Intensity) 37
4.3.4 การทดสอบกับแผง 1 แผง (1 Panel) 38

4.3.5 การทดสอบกับแผง 2 แผง (2 Panels) 38

4.3.6 การทดสอบกับแผง 3 แผง (3 Panels) 38

4.3.7 การทดสอบ 1 แผงกับโหลด 20Ω 39

4.3.8 การทดสอบ 3 แผงกับโหลด 30Ω ระยะยาว 39

บทที่ 5 40

สรุปผลการดำเนินงาน 40

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 40

5.1.1 การทำงานของระบบ 40

5.1.2 ผลการทดลองที่ได้ 40

5.1.3 ผลสรุปด้านระบบสื่อสารและ IoT 41

5.1.4 ผลสรุปด้านซอฟต์แวร์และการแสดงผล 41

5.2 วิจารณ์ผลการดำเนินงาน 41

5.3 บทสรุป 43

บรรณนุกรม 44

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แถบชั้นพลังงานของ โลหะ ฉนวน และ สารกึ่งตัวนำ 8
รูปที่ 2.2การทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์: ก) โฟตอนถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำ ข) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำไฟฟ้า ทิ้งโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์ ค) อิเล็กตรอนและโฮลถูกส่งไปยังขั้วไฟฟ้าเพื่อเก็บรวบรวม 9
รูปที่ 2.3การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ เริ่มเมื่อโฟตอนถูกดูดกลืนโดยวัสดุแรก ทำให้เกิดเอ็กซิตอนขึ้น จากนั้นเอ็กซิตอนจะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อกับวัสดุที่สองซึ่งมีระดับพลังงานต่างกัน ส่งผลให้อิเล็กตรอน (หรือโฮล) เคลื่อนย้ายไปยังวัสดุที่สองและ 9
รูปที่ 2.4ข้อมูลนี้แสดงถึงความเข้มรังสีและฟลักซ์โฟตอนจากดวงอาทิตย์ โดยมีเส้นสีเขียวบ่งชี้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพลังงานช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 930 นาโนเมตร ข้อมูลนี้ได้มาจากห้องปฏิบัติการพลังงานหมุนเวียนแห่งชาติ (NREL) 11
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ AM0 และ AM1.5 ข้อมูลโดยห้องปฏิบัติการพลังงานหมุนเวียนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory) โกลเดน โคโลราโด 12
รูปที่ 2.6กราฟ IV-เคิร์ฟของเซลล์แสงอาทิตย์: แสดง Jsc, Voc, Jmp, Vmp, Pmax และ FF 13
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสัญลักษณ์ต่าง ๆ สอดคล้องกับสัญลักษณ์ในสมการไดโอดของช็อคลีย์ที่ปรับแก้แล้ว 15
รูปที่ 2.8 เส้นโค้ง J-V ทั่วไปสำหรับเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ต้นแบบ 19
รูปที่ 2.9 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ 19
รูปที่ 2.10 เซลล์สุริยะแบบซิลิคอน 20
รูปที่ 2.11 แผงโซลาร์เซลล์ แกลเลียมอาร์เซไนด์ บนยานสำรวจดาวอังคาร สปิริต (Spirit) ภาพโดย NASA/JPL-Caltech/Cornell 21
รูปที่ 2.12 โครงสร้างและการทำงานของเซลล์สุริยะย้อมสีโฟตอนจะถูกดูดกลืนโดยสีย้อมจากนั้นอิเล็กตรอนและ โฮลที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายโอนไปยังโครงรองรับออกไซด์ และ อิเล็กโทรไลต์ 23
รูปที่ 2.13 เซลล์สุริยะเพอรอฟสไกต์ 25

รูปที่ 3.1**แผนผังวงจร** 26
รูปที่ 3.2**PCB Layout** 27
รูปที่ 3. 3 **system blockdiagram** 27
รูปที่ 3.4 **Esp32/ Software block diagram** 28
รูปที่ 3.5 บอร์ด ESP32 29

รูปที่ 3.6Website 32
รูปที่ 3.7 PWA.....32

รูปที่ 4.1แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละเฟส (v1, v2, v3) ตามช่วงเวลา 36
รูปที่ 4.2แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Power) ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ P = IV.....36
รูปที่ 4.3การแสดงผลผ่านdashboard(PWA) 37
รูปที่ 4.4แสดงค่าความเข้มแสง (Lux) ที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์สภาพแวดล้อม 37
รูปที่ 4.5แสดงผลกราฟ Voltage 1 panel (V1/V2/V3) และ Temperature ตามช่วงเวลา 38
รูปที่ 4.6แสดงผลกราฟ Voltage 2 panel (V1/V2/V3) และ Temperature ตามช่วงเวลา 38
รูปที่ 4.7แสดงผลกราฟ Voltage 3 panel (V1/V2/V3) และ Temperature ตามช่วงเวลา 39
รูปที่ 4.8 แสดงกำลังไฟฟ้า 1 panel เมื่อต่อโหลด20Ω 39
รูปที่ 4.9แสดงกำลังไฟฟ้า 3 panel เมื่อต่อโหลด30Ω.....39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบัน การเพิ่มขึ้นของประชากรและภาคอุตสาหกรรมส่งผลให้ความต้องการพลังงานทั่วโลกพุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดแรงกดดันต่อทรัพยากรพลังงานฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด และนำไปสู่ความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยเหตุนี้ การเปลี่ยนผ่านสู่แหล่งพลังงานหมุนเวียนจึงกลายเป็นยุทธศาสตร์สำคัญในการสร้างความมั่นคงทางพลังงานและความยั่งยืน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและมีการติดตั้งใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน การเฝ้าระวังและบำรุงรักษาสภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจจับความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น

โครงงานนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สาย โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสนับสนุนแนวคิดการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Predictive Maintenance) โดยระบบจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสำคัญจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง อาทิ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเข้มแสง ผ่านอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณแผงข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งแบบไร้สายไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์เพื่อจัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่าย พร้อมทั้งสร้างกลไกการแจ้งเตือนอัตโนมัติเมื่อตรวจพบค่าที่ผิดปกติหรือบ่งชี้ถึงปัญหาด้านประสิทธิภาพ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลสถานะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แบบเรียลไทม์ และดำเนินการบำรุงรักษาได้อย่างทันท่วงที ก่อนที่ปัญหาจะบานปลายจนส่งผลกระทบต่อการผลิตพลังงาน

ผลลัพธ์จากโครงงานนี้ไม่เพียงแต่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโดยรวมจากการเปลี่ยนจากการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขไปสู่เชิงป้องกัน อันเป็นการเสริมสร้างความยั่งยืนของแหล่งพลังงานสะอาด และสนับสนุนการบรรลุเป้าหมายด้านพลังงานหมุนเวียนของประเทศ การพัฒนาระบบดังกล่าวจะเป็นต้นแบบและองค์ความรู้สำคัญที่สามารถนำไปต่อยอดในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเฝ้าระวังและบริหารจัดการระบบพลังงานหมุนเวียนให้มีความก้าวหน้ายิ่งขึ้นในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สาย โดยมุ่งเน้นความสามารถในการสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ระบบที่พัฒนาขึ้นจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสำคัญจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง อาทิ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเข้มแสง เพื่อนำมาประมวลผลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน รวมถึงระบุสภาวะความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ ระบบจะถูกออกแบบให้สามารถส่งผ่านข้อมูลที่ได้ไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์โดยใช้การเชื่อมต่อไร้สาย เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลและเฝ้าระวังสถานะของแผงได้จากระยะไกล

อีกหนึ่งเป้าหมายสำคัญของการศึกษานี้คือการพัฒนากลไกการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อระบุและแจ้งเตือนความผิดปกติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างอัตโนมัติ ระบบจะประเมินค่าประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลงไปหรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อยู่นอกเหนือจากเกณฑ์ที่กำหนด เพื่อส่งการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานผ่านหน้าเว็บหรือช่องทางที่เหมาะสม การดำเนินการนี้จะช่วยให้สามารถบำรุงรักษาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงทีก่อนที่ความเสียหายจะขยายวงกว้างและส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการผลิตพลังงานของระบบโดยรวม นอกจากนี้ การศึกษาจะครอบคลุมถึงการออกแบบกล่องบรรจุฮาร์ดแวร์ให้เหมาะสมกับการติดตั้งบริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และการทดสอบระบบในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อยืนยันความเสถียรและความน่าเชื่อถือในการทำงาน

ท้ายที่สุด การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อเสริมสร้างทักษะและความรู้ความสามารถด้านวิศวกรรมในการออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ การเขียนโปรแกรมฝังตัว การพัฒนาระบบสื่อสารไร้สาย การจัดการข้อมูลบนแพลตฟอร์มคลาวด์ และการสร้างส่วนต่อประสานผู้ใช้เพื่อการแสดงผล นอกจากนี้ ยังมุ่งหวังให้ผลลัพธ์จากโครงงานนี้เป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยีสำหรับการเฝ้าระวังและบริหารจัดการระบบพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มความยั่งยืนของพลังงานสะอาดในระดับอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ในอนาคต.

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การศึกษานี้ตั้งสมมติฐานว่า ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สายที่พัฒนาขึ้น จะสามารถเก็บรวบรวมข้อมูลสำคัญด้านการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ อาทิ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเข้มแสง และสามารถส่งผ่านข้อมูลเหล่านี้ไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์ได้โดยผ่านการเชื่อมต่อไร้สายอย่างมีเสถียรภาพ ข้อมูลที่ถูกส่งและจัดเก็บอย่างต่อเนื่องนี้ จะสามารถนำมาใช้ในการประมวลผลและวิเคราะห์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของแผง และบ่งชี้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิผล

นอกจากนี้ เราสมมติฐานว่า การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จะช่วยให้สามารถตรวจจับแนวโน้มหรือสภาวะที่บ่งชี้ถึงปัญหาที่กำลังจะเกิดขึ้นกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติที่สามารถแจ้งให้ผู้ใช้งานทราบถึงปัญหาได้ทันที ส่งผลให้สามารถดำเนินการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้อย่างทันท่วงที การดำเนินการดังกล่าวจะช่วยลดระยะเวลาที่แผงหยุดทำงาน ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่ไม่คาดคิด และยืดอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวมให้ยาวนานขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความคุ้มค่าและประสิทธิภาพในการผลิตพลังงาน

ท้ายที่สุด การออกแบบและพัฒนาโครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่เหมาะสมกับการติดตั้งบริเวณด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเขียนชุดคำสั่งฝังตัวที่ทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการสร้างแพลตฟอร์มซอฟต์แวร์สำหรับการจัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูล จะสามารถดำเนินการได้อย่างเป็นรูปธรรม และระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีความเสถียร สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง และขยายผลเพื่อเฝ้าระวังแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหลายแผงได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต.

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่จะใช้ในโครงงาน

โครงงานนี้อิงตามทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญหลายประการ เพื่อให้สามารถออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยแนวคิดหลักจะเริ่มต้นจาก ทฤษฎีการผลิตไฟฟ้าด้วยแสง ซึ่งเป็นพื้นฐานการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยศึกษาหลักการของสารกึ่งตัวนำในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ภายใต้สภาวะแสงและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังรวมถึงแนวคิดในการคำนวณและประเมิน ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญของสุขภาพและประสิทธิภาพการทำงานของแผง

ถัดมาคือ หลักการวัดค่าทางไฟฟ้า ซึ่งครอบคลุมเทคนิคและวิธีการในการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิที่ผลิตหรือเกิดขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างแม่นยำ โดยพิจารณาถึงข้อจำกัดของเซ็นเซอร์และวงจรวัดที่อาจส่งผลต่อความถูกต้องของข้อมูล รวมถึงแนวคิดในการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง นอกจากนี้ แนวคิดระบบสมองกลฝังตัว จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สามารถอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ ประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น และจัดการการสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควบคู่ไปกับ หลักการการสื่อสารไร้สายผ่านเครือข่ายท้องถิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้มาตรฐาน Wi-Fi เพื่อให้ระบบสามารถส่งผ่านข้อมูลที่วัดได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ได้อย่างราบรื่นและเชื่อถือได้

นอกจากนี้ โครงงานยังได้นำ แนวคิดเกี่ยวกับระบบคลาวด์และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง มาใช้ในการจัดเก็บ ประมวลผล และวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ที่ส่งมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนแพลตฟอร์มคลาวด์ ซึ่งรวมถึงการบริหารจัดการฐานข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลตามช่วงเวลา เพื่อค้นหาแนวโน้มและความผิดปกติ และการแสดงผลข้อมูลผ่านส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่เข้าใจง่าย เพื่อสนับสนุน แนวคิดการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ซึ่งอาศัยข้อมูลเชิงลึกจากการวิเคราะห์ เพื่อคาดการณ์ความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแจ้งเตือนให้ทำการบำรุงรักษาได้ล่วงหน้า ก่อนที่จะเกิดความเสียหายร้ายแรง อันจะช่วยลดเวลาที่ระบบหยุดทำงานและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงได้อย่างมีนัยสำคัญ สุดท้าย แนวคิดการจัดการพลังงาน จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตรวจวัด โดยคำนึงถึงการใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่สำรอง เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน.

1.5 ขอบเขตของโครงงาน

โครงงานนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแนวคิดและระบบต้นแบบสำหรับการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สาย เพื่อเป็นรากฐานสำคัญในการประยุกต์ใช้สำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยในระยะเริ่มต้นของการพัฒนานี้ ขอบเขตของโครงงานจะเน้นไปที่การสร้างความเข้าใจและพิสูจน์แนวคิดการวัดค่าพารามิเตอร์สำคัญของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อันได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเข้มแสง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสถานะการทำงานและความสมบูรณ์ของแผง

ระบบที่พัฒนาขึ้นจะประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถติดตั้งบริเวณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และมีความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลที่วัดได้แบบไร้สายไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อการจัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลเป็นหลักสำคัญ ข้อมูลที่ถูกส่งมานี้จะใช้เป็นฐานในการระบุและตรวจจับความผิดปกติ หรือความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงได้อย่างทันท่วงที ไม่ว่าจะเป็นการลดลงของประสิทธิภาพ หรือการชำรุดเสียหายในเชิงโครงสร้างหรือการทำงาน เพื่อให้สามารถแยกแยะได้ว่าแผงใดกำลังประสบปัญหาหรือเสีย

ทั้งนี้ ขอบเขตในปัจจุบันจะจำกัดอยู่ที่การพัฒนาต้นแบบและการพิสูจน์แนวคิดสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่ง โดยยังไม่ครอบคลุมถึงการติดตั้งในระดับโรงงานผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษานี้ จะเป็นพื้นฐานอันแข็งแกร่งสำหรับการขยายขนาดและต่อยอดระบบในอนาคต เพื่อให้สามารถรองรับการเฝ้าระวังและบริหารจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม หรือโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและครบวงจรต่อไป

1.6 รายละเอียดขั้นตอนของโครงงาน

โครงงานนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาและวางแผนอย่างละเอียด ทั้งในส่วนของทฤษฎีการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การวัดค่าทางไฟฟ้าที่สำคัญ และการทำความเข้าใจแนวคิดการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เพื่อเป็นพื้นฐานในการคัดเลือกส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ที่เหมาะสม โดยเฉพาะไมโครคอนโทรลเลอร์ เซ็นเซอร์วัดแรงดัน กระแส อุณหภูมิ และความเข้มแสง ควบคู่ไปกับการออกแบบวงจรปรับสภาพสัญญาณและวงจรจัดการพลังงานที่ทำขึ้นเอง รวมถึงการออกแบบโครงสร้างกล่องหุ้มอุปกรณ์ให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการพัฒนาฮาร์ดแวร์ โดยการประกอบวงจรและส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันในกล่องที่ออกแบบไว้ พร้อมกับการพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคู่กันไป ทั้งชุดคำสั่งสำหรับสมองกลฝังตัวเพื่อควบคุมการอ่านค่า การประมวลผล และการส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไร้สายไปยังระบบคลาวด์ ซึ่งมีการพัฒนาโปรแกรมฝั่งคลาวด์สำหรับการรับ จัดเก็บ และวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงโปรแกรมแสดงผลผ่านหน้าเว็บเพื่อแสดงสถานะและแจ้งเตือนความผิดปกติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อส่วนประกอบทั้งหมดได้รับการพัฒนาแล้ว จะเข้าสู่การทดสอบระบบอย่างครอบคลุม ทั้งการทดสอบแต่ละส่วนย่อยและการทดสอบการทำงานร่วมกันของระบบในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพในการตรวจจับปัญหา ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเพื่อประเมินผลสัมฤทธิ์ของโครงงานในภาพรวมและจัดทำรายงานเพื่อนำเสนอต่อไป

บทที่ 2

หลักการทางวิศวกรรมของระบบตรวจวัดไร้สายและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

2.1 กล่าวนำ

บทนี้จะนำเสนอหลักการทางวิศวกรรมและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สาย เพื่อสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยมุ่งเน้นการให้ความรู้ความเข้าใจที่จำเป็นต่อการพัฒนาองค์ประกอบต่างๆ ของโครงงาน เนื้อหาภายในบทนี้ครอบคลุมตั้งแต่ทฤษฎีการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการแปลงพลังงาน ไปจนถึงหลักการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการตรวจวัดพารามิเตอร์สำคัญทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของแผงอย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ยังรวมถึงแนวคิดของการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มคลาวด์และระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับการจัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูล ตลอดจนหลักการของวิทยาการข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และหลักการจัดการพลังงานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื้อหาทั้งหมดนี้จะถูกนำเสนอเพื่อเป็นรากฐานสำคัญในการทำความเข้าใจการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการบริหารจัดการพลังงานแสงอาทิตย์ ความเข้าใจในทฤษฎีเหล่านี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบที่แข็งแกร่ง การแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้น และการบรรลุเป้าหมายของโครงงานที่ตั้งไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ.

2.2 หลักการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

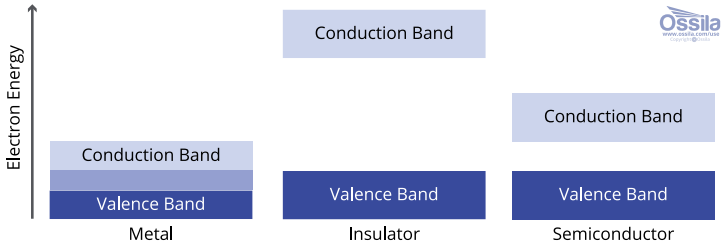
เซลล์แสงอาทิตย์คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าผ่าน 'ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก' นอกจากนี้ยังเรียกกันทั่วไปว่า 'เซลล์โฟโตโวลตาอิก' ตามปรากฏการณ์นี้ และเพื่อแยกความแตกต่างจากอุปกรณ์พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น ซิลิคอน ในระดับพื้นฐานที่สุด สารกึ่งตัวนำจะดูดซับโฟตอน ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนซึ่งสามารถถูกสกัดออกมาในวงจรไฟฟ้าได้ด้วยสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นเองและที่ถูกประยุกต์ใช้

เนื่องจากความต้องการแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น ในปี 2565 การใช้พลังงานทั่วโลกโดยรวมอยู่ที่ประมาณ 595 เอกซาจูล (EJ) ในขณะเดียวกัน พลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ต่อปีที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวโลกโดยประมาณอยู่ที่ 50,000 EJ ดวงอาทิตย์ให้พลังงานมากเกินพอที่จะตอบสนองความต้องการพลังงานทั่วโลก (เกือบ 84 เท่า)

ดังนั้น จึงมีศักยภาพที่ยิ่งใหญ่กว่ามากสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ในการตอบสนองความต้องการพลังงานของเราเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ

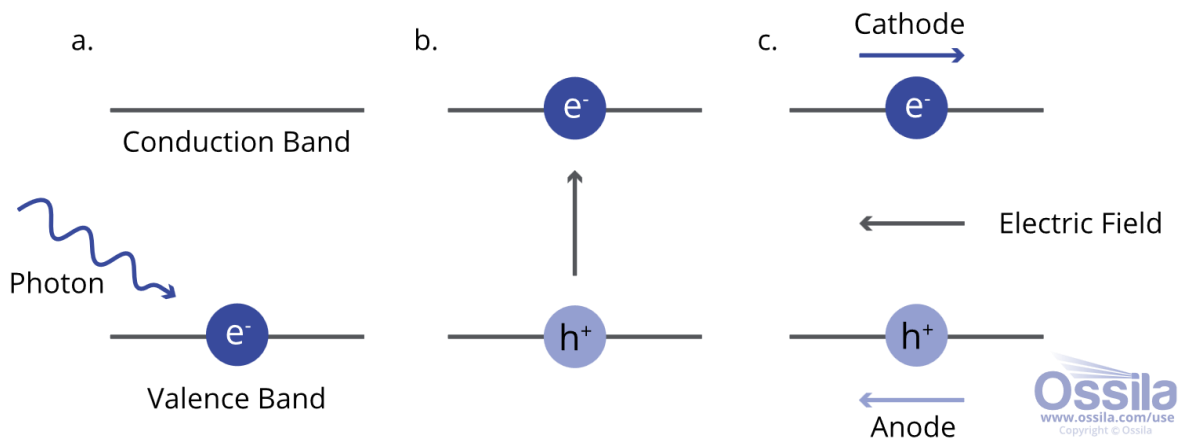
2.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

ส่วนสำคัญที่สุดของเซลล์แสงอาทิตย์คือสารกึ่งตัวนำ เพราะเป็นส่วนที่เปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าได้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำทำหน้าที่นี้ได้เนื่องจากโครงสร้างระดับพลังงานของอิเล็กตรอน โดยระดับพลังงานเหล่านี้แบ่งออกเป็นสองแถบหลักๆ คือ "แถบเวเลนซ์" ซึ่งเป็นระดับพลังงานอิเล็กตรอนที่ถูกครอบครองสูงสุด และ "แถบนำไฟฟ้า" ซึ่งเป็นระดับพลังงานอิเล็กตรอนต่ำสุดที่ยังไม่มีการครอบครอง ส่วนความแตกต่างของพลังงานระหว่างส่วนบนสุดของแถบเวเลนซ์และส่วนล่างสุดของแถบนำไฟฟ้าเรียกว่า "ช่องว่างแถบพลังงาน" (Eg) ในตัวนำ ช่องว่างแถบพลังงานจะไม่มีอยู่ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ในขณะที่ฉนวนมีช่องว่างแถบพลังงานที่ใหญ่มาก จึงยับยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำ ช่องว่างแถบพลังงานจะค่อนข้างเล็ก ทำให้เพียงแค่ใส่พลังงานเข้าไปเล็กน้อย อิเล็กตรอนบางส่วนก็สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้าได้



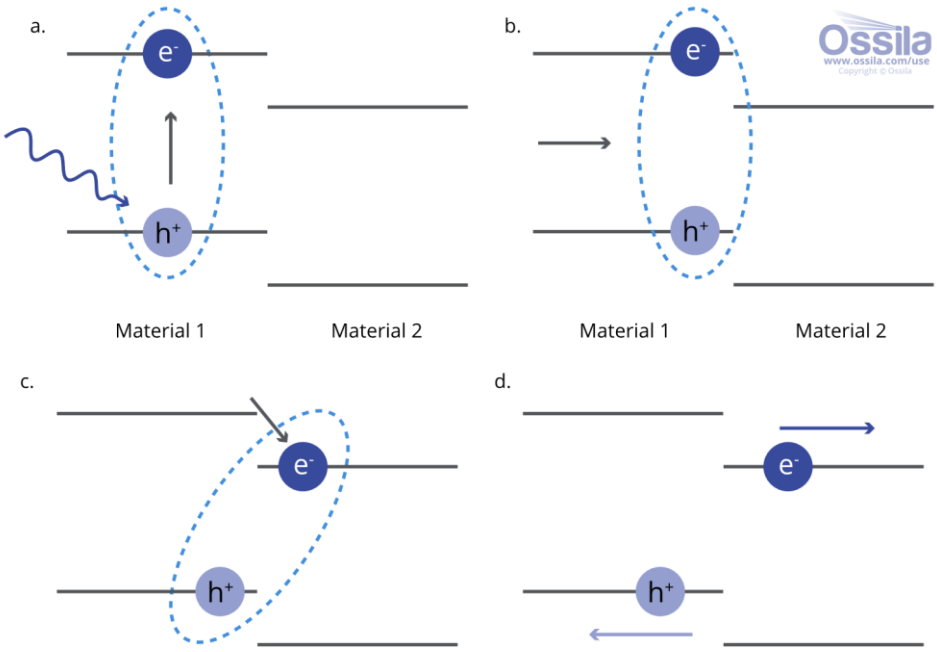
รูปที่ 2.1 **แถบชั้นพลังงานของ โลหะ ฉนวน และ สารกึ่งตัวนำ**

ช่องว่างแถบพลังงานที่เล็กนี้เองที่ทำให้สารกึ่งตัวนำบางชนิดสามารถผลิตไฟฟ้าจากแสงได้ ถ้าโฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำมีพลังงาน (E_gamma) มากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน โฟตอนนั้นจะถูกดูดกลืน ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำไฟฟ้า กระบวนการนี้เรียกว่า "การกระตุ้น" เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในแถบนำไฟฟ้าแล้ว จะเกิดสถานะว่างในแถบเวเลนซ์ ซึ่งเรียกว่า "โฮล" และมีพฤติกรรมคล้ายอนุภาคที่คล้ายกับอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้า (แต่มีประจุบวก) เนื่องจากมีประจุตรงข้ามกัน อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นจะรวมตัวกันด้วยแรงคูลอมบ์ในสภาวะที่เรียกว่า "เอ็กซิตอน" เอ็กซิตอนนี้จะต้องถูกแยกออกจากกัน (หรือเรียกว่า "การแตกตัว") ก่อนที่ตัวพาหะประจุจะสามารถถูกเก็บรวบรวมและนำไปใช้งานได้ พลังงานที่จำเป็นสำหรับการนี้ขึ้นอยู่กับ "ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก" (epsilon_r) ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายระดับของการบดบังระหว่างประจุในวัสดุสารกึ่งตัวนำ และส่งผลต่อพลังงานยึดเหนี่ยวของเอ็กซิตอน



*รูปที่ 2.2*การทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์: ก) โฟตอนถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำ ข) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำไฟฟ้า ทิ้งโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์ ค) อิเล็กตรอนและโฮลถูกส่งไปยังขั้วไฟฟ้าเพื่อเก็บรวบรวม

ในวัสดุที่มีค่า epsilon_r สูง เอ็กซิตอนจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำ ทำให้สามารถแตกตัวได้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิปกติ แต่เอ็กซิตอนในวัสดุที่มีค่า epsilon_r ต่ำจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวสูง ซึ่งป้องกันการแตกตัวด้วยความร้อน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการแยกตัว วิธีทั่วไปคือการนำเอ็กซิตอนไปยังส่วนต่อประสานระหว่างวัสดุที่มีระดับพลังงานต่างกันมากพอที่จะสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของเอ็กซิตอน วิธีนี้ทำให้อิเล็กตรอน (หรือโฮล) สามารถเคลื่อนย้ายไปยังวัสดุอื่นได้ และแยกเอ็กซิตอนออกจากกัน

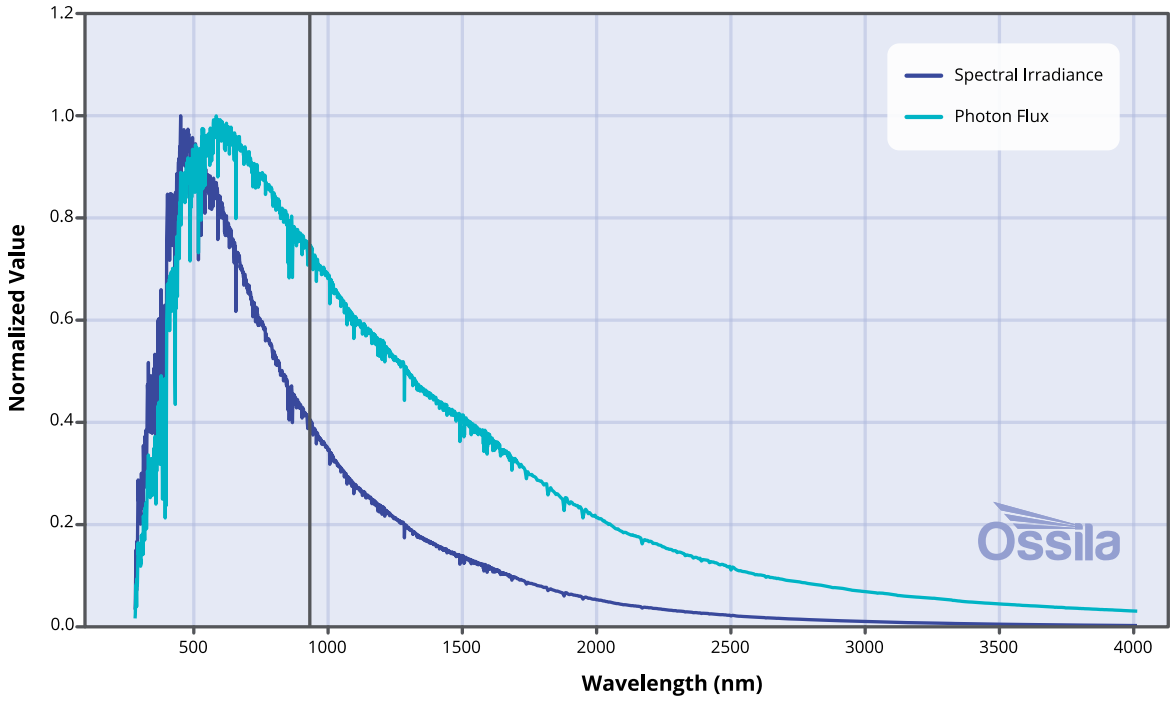


*รูปที่ 2.3*การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ เริ่มเมื่อโฟตอนถูกดูดกลืนโดยวัสดุแรก ทำให้เกิดเอ็กซิตอนขึ้น จากนั้นเอ็กซิตอนจะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อกับวัสดุที่สองซึ่งมีระดับพลังงานต่างกัน ส่งผลให้อิเล็กตรอน (หรือโฮล) เคลื่อนย้ายไปยังวัสดุที่สองและ

เมื่อเกิดการแยกตัวแล้ว ประจุอิสระจะแพร่กระจายไปยังขั้วไฟฟ้าของเซลล์ (ซึ่งเป็นจุดที่ถูกเก็บรวบรวม) โดยอาศัยความช่วยเหลือจากสนามไฟฟ้าทั้งที่เกิดขึ้นเองและที่ถูกประยุกต์ใช้ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองในอุปกรณ์เกิดจากระดับพลังงานสัมพัทธ์ของวัสดุที่ประกอบเป็นเซลล์ อย่างไรก็ตาม ต้นกำเนิดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ สำหรับสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ เช่น ซิลิคอน มักมีการเติมวัสดุอื่น ๆ เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ (กระบวนการที่เรียกว่าการเจือ) เพื่อสร้างบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง (ชนิดเอ็น) และต่ำ (ชนิดพี) เมื่อบริเวณเหล่านี้สัมผัสกัน ประจุจะสะสมอยู่ทั้งสองด้านของส่วนต่อประสาน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางจากบริเวณชนิดเอ็นไปยังบริเวณชนิดพี ในอุปกรณ์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองเกิดจากความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์

ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากส่งผลต่อพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถเก็บเกี่ยวได้ หาก E_gamma > Eg โฟตอนจะถูกดูดกลืน และพลังงานส่วนเกินจาก Eg จะถูกใช้เพื่อส่งเสริมอิเล็กตรอนไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่อนคลายลงมายังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานส่วนเกิน อย่างไรก็ตาม หาก E_gamma < Eg โฟตอนจะไม่ถูกดูดกลืน ซึ่งส่งผลให้พลังงานสูญเสียไปอีกเช่นกัน (ข้อควรจำ: ความยาวคลื่นของโฟตอนจะลดลงเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น)

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมแสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าถ้า Eg ใหญ่เกินไป จะทำให้มีโฟตอนจำนวนมากที่ไม่ถูกดูดกลืน ในทางกลับกัน ถ้า Eg ต่ำเกินไป หมายความว่าจะมีโฟตอนจำนวนมากถูกดูดกลืน แต่พลังงานจำนวนมากจะสูญเสียไปเนื่องจากการผ่อนคลายของอิเล็กตรอนไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ด้วยความสมดุลนี้ ทำให้สามารถคำนวณประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎีของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานได้ รวมถึงประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ ช็อกลีย์และไควเซอร์ได้กำหนดประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎีไว้ที่ประมาณ 33% ในปี 1961 ซึ่งสอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงาน 1.34 อิเล็กตรอนโวลต์ (ประมาณ 930 นาโนเมตร)

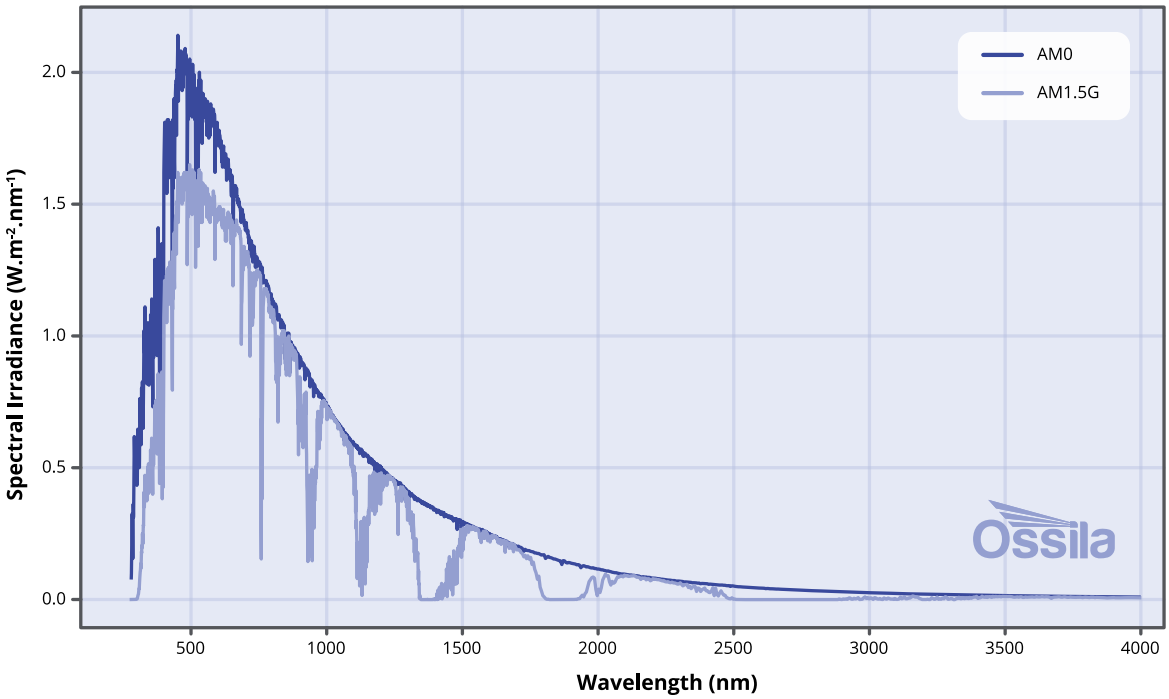


*รูปที่ 2.4*ข้อมูลนี้แสดงถึงความเข้มรังสีและฟลักซ์โฟตอนจากดวงอาทิตย์ โดยมีเส้นสีเขียวบ่งชี้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพลังงานช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 930 นาโนเมตร ข้อมูลนี้ได้มาจากห้องปฏิบัติการพลังงานหมุนเวียนแห่งชาติ (NREL)***2.2.2 ลักษณะเฉพาะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์สุริยะ***

2.2.2.1 สเปกตรัมแสงอาทิตย์

การกำหนดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์จะบอกว่าเซลล์นั้นทำงานได้ดีเพียงใดภายใต้การฉายรังสีจากดวงอาทิตย์ สเปกตรัมแสงอาทิตย์มีลักษณะใกล้เคียงกับวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ 5780 เคลวิน ซึ่งมีความเข้มสูงสุดในช่วงแสงที่มองเห็นได้และมีหางยาวไปถึงช่วงอินฟราเรด อย่างไรก็ตาม สเปกตรัมนี้ไม่ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการกำหนดคุณสมบัติโดยตรง เนื่องจากแสงจะต้องเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลก (ซึ่งดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ไปเป็นจำนวนมาก) ก่อนจะมาถึงพื้นผิวโลก

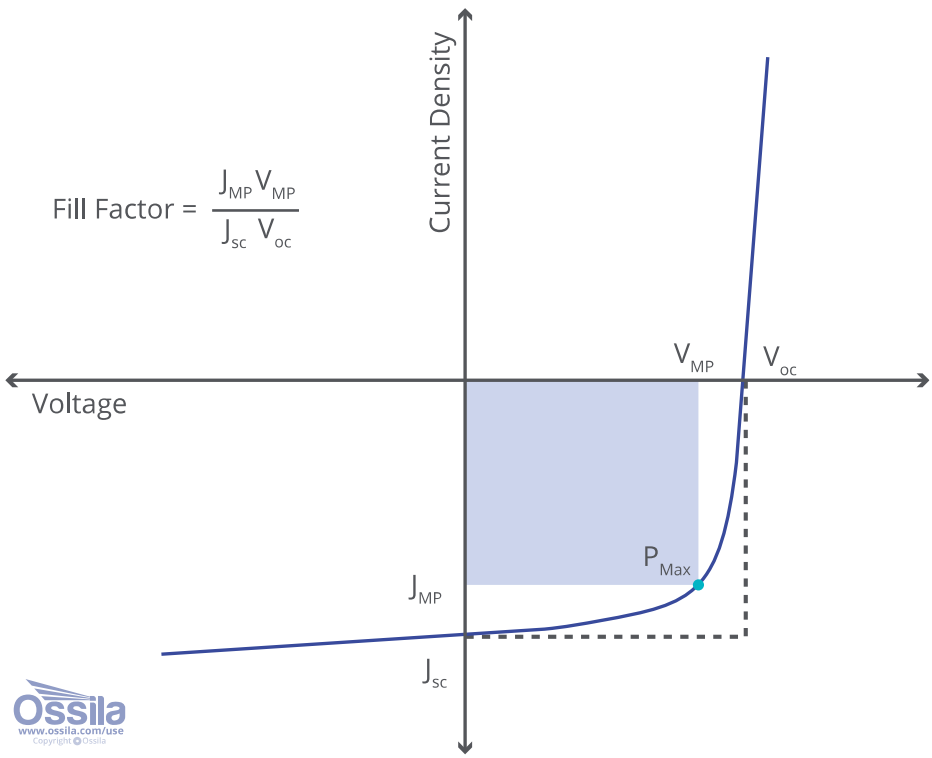
ดังนั้น มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ใช้คือ AM1.5G (air mass 1.5 global) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ทั่วโลกหลังจากที่แสงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ 1.5 เท่าของชั้นบรรยากาศปกติ ค่านี้มีความหนาแน่นกำลัง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และเทียบเท่ากับการฉายรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยในละติจูดกลาง (เช่น ในยุโรปหรือสหรัฐอเมริกา) เพื่อให้มั่นใจในความน่าเชื่อถือและการควบคุมระหว่างการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ จึงสามารถใช้ เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator) เพื่อสร้างรังสีที่สม่ำเสมอได้



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ AM0 และ AM1.5 ข้อมูลโดยห้องปฏิบัติการพลังงานหมุนเวียนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory) โกลเดน โคโลราโด

2.2.2.2 กราฟ IV-เคิร์ฟของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติหลักของเซลล์แสงอาทิตย์คือความสามารถในการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power Conversion Efficiency - PCE) และเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังแสงตกกระทบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เพื่อหาค่า PCE และค่าเมตริกอื่น ๆ ที่มีประโยชน์ จึงต้องทำการวัดกระแส-แรงดัน (Current-Voltage - IV) โดยจะมีการให้แรงดันไฟฟ้าหลายค่าแก่เซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่อยู่ภายใต้การส่องสว่าง และวัดกระแสไฟฟ้าที่ออกมาในแต่ละขั้นแรงดัน ทำให้ได้ 'IV เคิร์ฟ' ที่เป็นลักษณะเฉพาะซึ่งพบเห็นได้ในงานวิจัยจำนวนมาก ตัวอย่างของกราฟนี้สามารถดูได้จากภาพด้านล่าง พร้อมกับคุณสมบัติสำคัญบางประการที่สามารถหาได้จากการวัด IV ทั้งนี้ โดยทั่วไปแล้ว การระบุคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ ความหนาแน่นกระแส (Current Density - J) แทนกระแสไฟฟ้า เนื่องจากพื้นที่ของเซลล์มีผลต่อขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (เซลล์ที่ใหญ่กว่าจะให้กระแสไฟฟ้ามากกว่า)



*รูปที่ 2.6*กราฟ IV-เคิร์ฟของเซลล์แสงอาทิตย์: แสดง Jsc, Voc, Jmp, Vmp, Pmax และ FF

คุณสมบัติที่เน้นในภาพคือ:

JMP - ความหนาแน่นกระแสที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

VMP - แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

PMax - กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด (หรือที่เรียกว่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด)

Jsc - ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร

Voc – แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

PCE สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้:

$$PCE = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{IN}}$$

โดยที่ P_out (P_in) คือกำลังไฟฟ้าขาออก (ขาเข้า) ของเซลล์, FF คือแฟกเตอร์เติมเต็ม, และ J_sc กับ V_oc คือความหนาแน่นกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดตามลำดับ[1]

ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_sc) คือความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากแสงของเซลล์เมื่อไม่มีการให้ไบแอสภายนอก ในกรณีนี้ เฉพาะสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เท่านั้นที่ใช้ในการขับเคลื่อนตัวพาหะประจุไปยังขั้วไฟฟ้า ค่าเมตริกนี้ได้รับผลกระทบจาก:

- คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นสารไวแสง
- ประสิทธิภาพการสร้าง, การขนส่ง, และการสกัดประจุ

แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_oc) คือแรงดันไฟฟ้าที่สนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปหักล้างกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ สิ่งนี้จะกำจัดแรงขับเคลื่อนทั้งหมดสำหรับตัวพาหะประจุ ทำให้ไม่มีการสร้างโฟโตกระแสไฟฟ้า ค่าเมตริกนี้ได้รับผลกระทบจาก:

- ระดับพลังงานของวัสดุสารไวแสง
- ฟังก์ชันงานของวัสดุขั้วไฟฟ้า
- อัตราการรวมตัวใหม่ของตัวพาหะประจุ

แฟกเตอร์เติมเต็ม (Fill Factor - FF) คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงที่เซลล์ผลิตได้ เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่เซลล์จะผลิตได้หากไม่มีความต้านทานอนุกรม และมีความต้านทานขนานเป็นอนันต์ ค่านี้ในอุดมคติควรใกล้เคียง 1 มากที่สุด และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้:

$$FF = \frac{J_{MP}V_{MP}}{J_{SC}V_{OC}}$$

โดยที่ J_MP และ V_MP คือความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ ณ จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับ

ค่าโดยประมาณของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานสามารถคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ JV-เคิร์ฟของเซลล์ ณ จุด V_oc และ J_sc ตามลำดับ

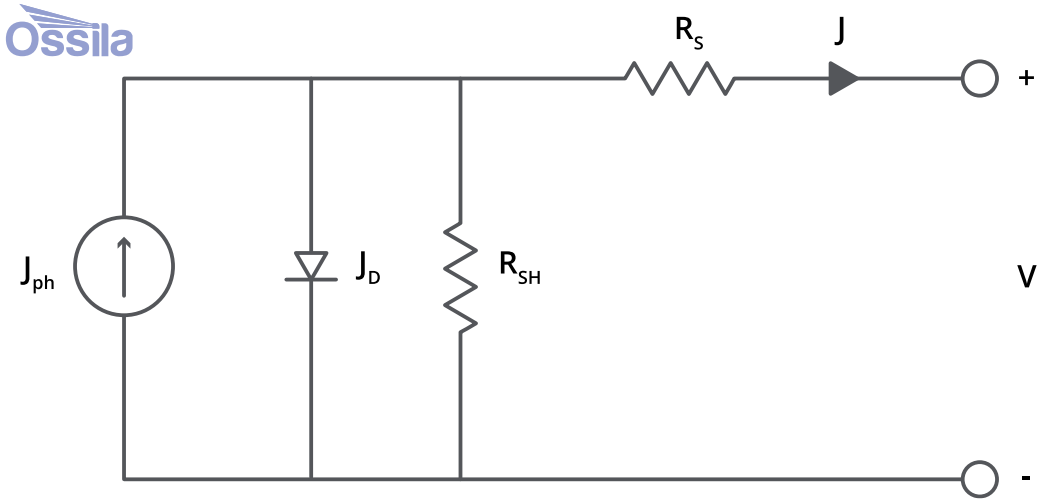
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นไดโอด ดังนั้น พฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ในอุดมคติสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยใช้สมการไดโอดของช็อคลีย์ (Shockley diode equation):

$$J(v) = J_{ph} - J_D = J_{ph} - J_o[exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) - 1]$$

ในที่นี้, J_ph คือความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากแสง, J_D คือความหนาแน่นกระแสไดโอด, J_0 คือความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวในที่มืด (ความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านไดโอดภายใต้ไบแอสย้อนกลับในที่มืด), V คือแรงดันไฟฟ้า, และ T คืออุณหภูมิ ส่วนสัญลักษณ์สองตัวสุดท้าย, e และ k_B, คือประจุมูลฐาน (1.6 x 10^-19 C) และค่าคงตัวโบลต์ซมานน์ (1.38 x 10^-23 m^2 kg s^-2 K^-1) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริง ไม่มีอุปกรณ์ใดสมบูรณ์แบบ ดังนั้นสมการจึงต้องได้รับการปรับเปลี่ยนเพื่อพิจารณาถึงการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้น:

$$J(v) = J_{ph} - J_o\left[exp\left(\frac{e(V + JR_S)}{nk_BT}\right) - 1\right] - \frac{V + JR_S}{R_{sh}}$$

ในที่นี้ n คือปัจจัยอุดมคติของไดโอด (diode ideality factor) ส่วนสัญลักษณ์อื่น ๆ ทั้งหมดมีความหมายตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การใช้สมการนี้ทำให้สามารถจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยใช้แผนภาพวงจรสมมูลซึ่งแสดงไว้ด้านล่าง:



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสัญลักษณ์ต่าง ๆ สอดคล้องกับสัญลักษณ์ในสมการไดโอดของช็อคลีย์ที่ปรับแก้แล้ว

ความต้านทานอนุกรม (R_s) เป็นผลมาจากความต้านทานที่เกิดขึ้นจากอุปสรรคทางพลังงานบริเวณส่วนต่อประสาน และความต้านทานเนื้อวัสดุภายในชั้นต่างๆ โดยปกติแล้ว ค่านี้ควรถูกทำให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการสูญเสียประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากการรวมตัวใหม่ของตัวพาหะประจุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการจัดเรียงระดับพลังงานของวัสดุที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสม

ความต้านทานขนาน (R_sh) เป็นผลมาจากการมีเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าสำรองผ่านเซลล์โฟโตโวลตาอิก ต่างจากความต้านทานอนุกรมคือ ค่านี้ในอุดมคติควรจะสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นทางสำรองเหล่านี้

2.3 การวัดค่าทางไฟฟ้าและพารามิเตอร์ด้านพลังงาน

สำหรับการวัดลักษณะเฉพาะของสถาปัตยกรรมและแบบจำลองเซลล์สุริยะใหม่ จำเป็นต้องมีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าคร่อมเซลล์และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้มัลติมิเตอร์เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเซลล์รับแสงสว่างและวัดกระแสไฟฟ้า จากนั้นจึงนำค่ากระแสไฟฟ้าหารด้วยพื้นที่เซลล์เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และใช้สมการ กำลังไฟฟ้า = ศักย์ไฟฟ้า * กระแสไฟฟ้า เพื่อคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

$$P = IV$$

2.3.1 การจำแนกลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะด้วยเส้นโค้งกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (I-V Curve)

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density) เพียงอย่างเดียวด้วยเครื่องมือพื้นฐานจะให้ข้อมูลเพียงแค่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเชิงทฤษฎี ของเซลล์สุริยะในอุดมคติเท่านั้น การตรวจวัดแบบแยกส่วนนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องมือวัดเอง:

ข้อจำกัดของการวัดค่าแบบแยกส่วน

1. การวัดศักย์ไฟฟ้า (Voltmeter): โวลต์มิเตอร์ที่ดีมี ความต้านทานภายในสูงมาก ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านเซลล์สุริยะ (สภาวะเปิดวงจร) การวัดนี้ให้เพียงค่า ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการสร้างกำลังไฟฟ้า
2. การวัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter): แอมมิเตอร์ที่ดีมีความต้านทานภายในใกล้เคียง ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์กำลังถูกทดสอบในสภาวะที่ ลัดวงจร (Short-Circuited) การวัดนี้ให้เพียงค่า กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ซึ่งเป็นสภาวะที่ศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทำให้ไม่มีการสร้างกำลังไฟฟ้า

ความสำคัญของการสร้างเส้นโค้ง I-V

สำหรับเซลล์สุริยะจริง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ส่งออกจะ แปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้ ซึ่งหมายความว่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันตลอดช่วงการทำงาน ดังนั้น เพื่อให้ได้การจำแนกลักษณะเฉพาะของเซลล์สุริยะที่แม่นยำยิ่งขึ้น จึงต้องมีการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายใต้ค่าศักย์ไฟฟ้าหลายระดับ

เครื่องมือ Source Measure Unit (SMU) ถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์นี้ โดยสามารถกำหนด (Source) ศักย์ไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ และวัด (Measure) กระแสไฟฟ้าที่สอดคล้องกันอย่างเป็นระบบ การดำเนินการนี้จะสร้าง เส้นโค้งกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (I-V Curve) ซึ่งให้ข้อมูลการทำงานที่ครอบคลุมของเซลล์สุริยะ รวมถึงค่าสำคัญต่าง ๆ เช่น จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และ แฟกเตอร์เติมเต็ม (Fill Factor, FF)

2.3.2 การวัดเส้นโค้งความหนาแน่นกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (J-V Curve) ด้วยเครื่อง Source Measure Unit (SMU)

การวัดเส้นโค้งความหนาแน่นกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (J-V) โดยใช้เครื่อง **Source Measure Unit (SMU)** เป็นวิธีมาตรฐานที่ให้การจำแนกลักษณะเฉพาะของเซลล์สุริยะได้อย่างแม่นยำ เครื่อง SMU เป็นอุปกรณ์อเนกประสงค์ที่รวมความสามารถของแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้า (ทั้งศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า) และเครื่องมือวัดค่าความแม่นยำสูงเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถทำการกวาด (Sweep) ค่าและวัดค่าคู่กันได้พร้อมกัน

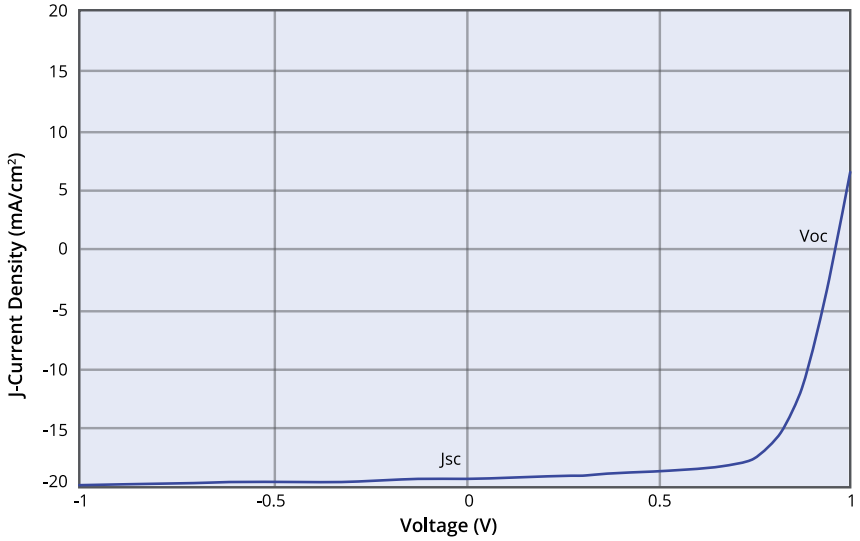
วิธีการวัด J-V Curve โดยใช้ SMU

1. **การตั้งค่าอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ (DUT) และการส่องสว่าง:**
    - เชื่อมต่อเซลล์สุริยะภายใต้การทดสอบ (Device Under Test) เข้ากับช่องสัญญาณของ SMU โดยทั่วไปจะใช้การเชื่อมต่อแบบ **สี่สาย (Four-Point Probe)** เพื่อลดผลกระทบจากความต้านทานของสายวัด[1]
    - จัดให้เซลล์สุริยะได้รับ **การฉายรังสีแสง (Illumination)** ที่ควบคุมโดยใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar Simulator) ที่ปรับเทียบแล้ว
2. **การกำหนดเงื่อนไขการกวาดค่า (Sweep Parameters):**
    - **โหมดการทำงาน:** ตั้งค่า SMU ให้อยู่ใน **โหมดแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า (Voltage Source Mode)** และวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
    - **ช่วงการกวาด:** กำหนดให้ SMU **กวาดค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage Sweep)** จากค่าที่กำหนด มักจะเริ่มตั้งแต่ค่าศักย์ไฟฟ้าติดลบเล็กน้อย ไปจนถึงค่าที่สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่คาดหวัง
    - **ขนาดขั้นตอน (Step Size):** กำหนดขนาดการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage Step) ให้ละเอียดพอสมควรเพื่อให้ได้จุดข้อมูลจำนวนมากเพียงพอในการวาดเส้นโค้งที่ราบรื่น
    - **การหน่วงเวลา (Settle Time):** กำหนดช่วงเวลาให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ก่อนทำการวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละจุด เพื่อให้เซลล์สุริยะเข้าสู่สภาวะสมดุลทางไฟฟ้า
3. **การดำเนินการวัด:**
    - SMU จะเริ่มต้นการทำงานโดยการปรับศักย์ไฟฟ้าจากค่าเริ่มต้นไปจนถึงค่าสิ้นสุดตามขั้นตอนที่กำหนดไว้[10]
    - ในแต่ละขั้นตอน SMU จะ **จ่าย (Source) ศักย์ไฟฟ้า** และ **วัด (Measure) กระแสไฟฟ้า** ที่ไหลผ่านเซลล์สุริยะพร้อมกัน[11]

- สำหรับอุปกรณ์บางประเภท เช่น เซลล์สุริยะเพอรอฟสไกต์ (Perovskite Solar Cells) อาจจำเป็นต้องทำการกวาดทั้งในทิศทางเดินหน้า (Forward Sweep) และถอยหลัง (Reverse Sweep) เพื่อประเมินปรากฏการณ์ **ฮิสเทรีซิส (Hysteresis)**

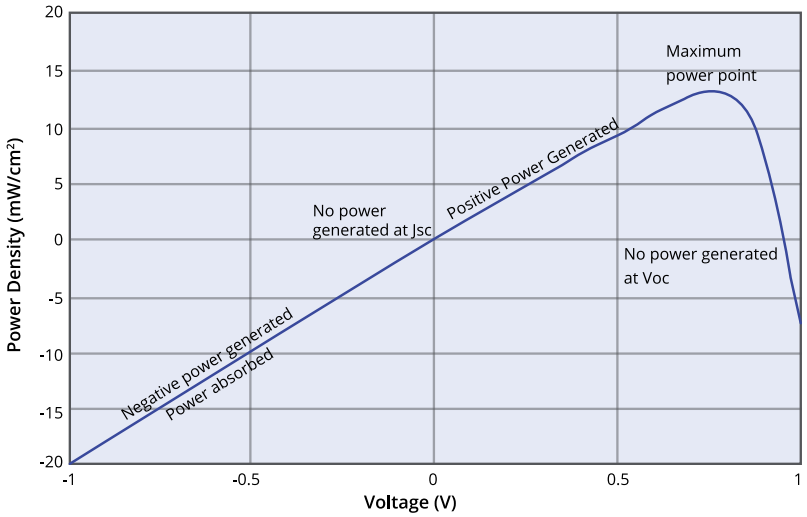
4. **การแปลงข้อมูลและการวิเคราะห์:**
    - ข้อมูลที่ได้จะเป็นคู่ค่ากระแส-ศักย์ไฟฟ้า
    - นำค่ากระแสไฟฟ้ามา **หารด้วยพื้นที่ใช้งาน (Active Area)** ของเซลล์สุริยะ เพื่อแปลงเป็น **ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า**
    - ทำการ **พล็อต (Plot)** ค่า J เทียบกับค่า V เพื่อสร้าง **เส้นโค้ง J-V**
    - ใช้เส้นโค้งนี้ในการสกัดตัวชี้วัดประสิทธิภาพหลักของเซลล์สุริยะ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด V_os, ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร J_sc แฟกเตอร์เติมเต็ม FF และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน PCE

เส้นโค้งความหนาแน่นกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (J-V curve) หรือที่เรียกอีกอย่างว่า เส้นโค้งกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (I-V curve) นั้นช่วยให้เราสามารถคำนวณปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เซลล์สุริยะสร้างขึ้น ด้านล่างนี้คือ J-V curve ทั่วไปของเซลล์สุริยะที่ทำงานได้ การเข้าใจวิธีการแปลผล J-V curve มีประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อต้องการวินิจฉัยและแก้ไขปัญหาของเซลล์สุริยะ



รูปที่ 2.8 เส้นโค้ง J-V ทั่วไปสำหรับเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ต้นแบบ

เมื่อนำค่า **ศักย์ไฟฟ้า (voltage)** คูณด้วย **ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density)** จะได้ค่า **ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density)** ที่เซลล์สุริยะผลิตออกมา **จุดสูงสุดของกราฟ** คือจุดที่เกิดการ **สร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power)** ข้อมูลนี้สามารถบ่งชี้ถึง **กำลังไฟฟ้าสูงสุด** ที่สามารถรับได้จากเซลล์สุริยะของคุณ รวมถึงค่า **ศักย์ไฟฟ้า** ที่จำเป็นต่อการสร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้น

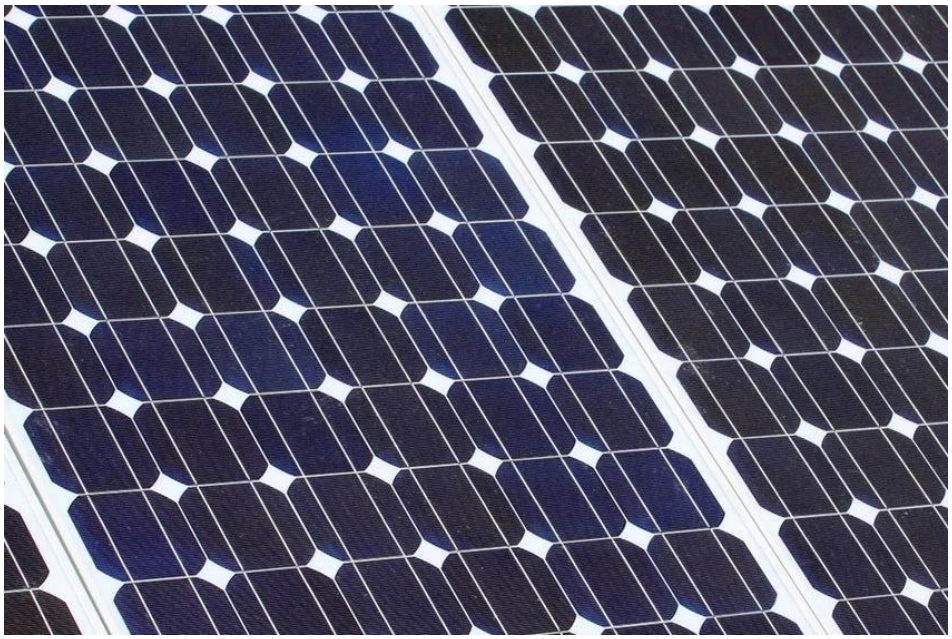


รูปที่ 2.9 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

2.4 ประเภทของเซลล์สุริยะ

เซลล์สุริยะมีหลายประเภท ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสามยุค โดยยุคที่หนึ่ง (อุปกรณ์แบบดั้งเดิม) มีพื้นฐานจากซิลิคอนผลึกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ที่ถูกศึกษาอย่างดี ยุคที่สองคืออุปกรณ์ฟิล์มบาง ซึ่งรวมถึงวัสดุที่สร้างอุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงด้วยฟิล์มบางมาก (อยู่ในช่วงนาโนเมตรถึงหลายสิบไมโครเมตร) และยุคที่สามคือเทคโนโลยีโฟโตโวลตาอิกที่กำลังเกิดขึ้นใหม่ ซึ่งยังอยู่ในระหว่างการวิจัยเพื่อการใช้งานเชิงพาณิชย์ วัสดุโฟโตโวลตาอิกที่ถูกศึกษามากที่สุดในยุคที่หนึ่งและสอง ได้แก่ ซิลิคอน, แกลเลียมอาร์เซไนด์, แคดเมียมเทลลูไรด์ และคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมซีลีไนด์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ที่ทำงานในลักษณะตรงไปตรงมาที่สุด คือ โฟตอนถูกดูดกลืนทำให้เกิดเอ็กซิตอน ซึ่งจะสลายตัวด้วยความร้อน (เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง) และถูกลำเลียงไปยังขั้วไฟฟ้าผ่านสนามไฟฟ้าในที่สุด

2.4.1 เซลล์สุริยะยุคแรก

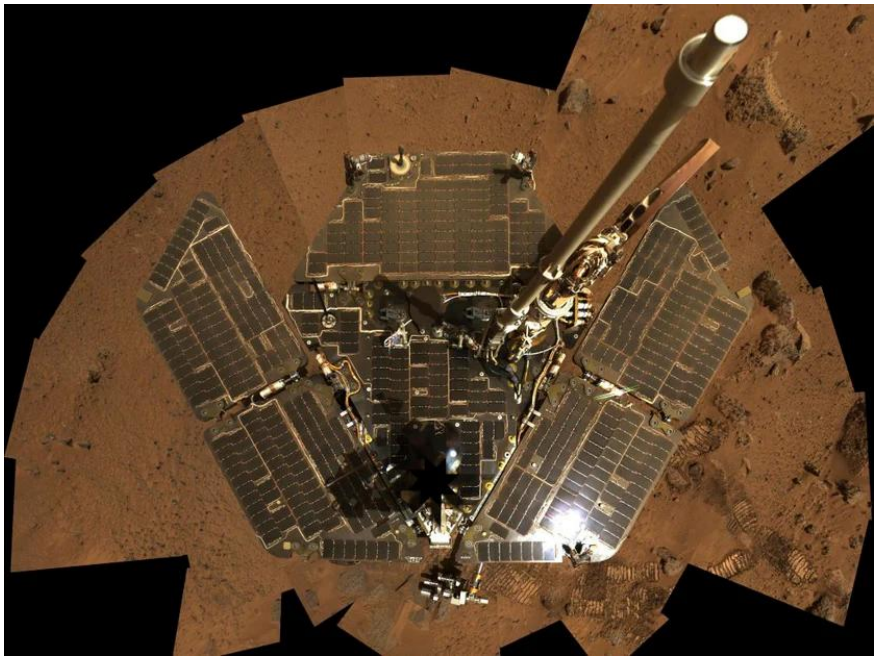


รูปที่ 2.10 เซลล์สุริยะแบบซิลิคอน

เนื่องจาก **ซิลิคอน** เป็นวัสดุที่ถูกศึกษามากที่สุด จึงสามารถบรรลุประสิทธิภาพสูงสุดบางส่วนได้ (ด้วยประสิทธิภาพสูงสุด 26.1%) และเป็นวัสดุแรกที่เข้าสู่ตลาดเชิงพาณิชย์ ด้วยเหตุนี้ แผงโซลาร์เซลล์ส่วนใหญ่จึงใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุไวแสง (Photoactive Material) **ช่องว่างพลังงาน (Band Gap)** ของซิลิคอนอยู่ที่ 1.1 eV ซึ่งช่วยให้สามารถดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ได้กว้าง อย่างไรก็ตาม ค่านี้ต่ำกว่าช่องว่างพลังงานที่เหมาะสม (1.34 eV) ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเมื่อดูดกลืนโฟตอนพลังงานสูง นอกจากนี้ ช่องว่างพลังงานยังเป็นแบบทางอ้อม (Indirect Band Gap) ซึ่งลดประสิทธิภาพการดูดกลืน จึงจำเป็นต้องใช้ชั้นที่ค่อนข้างหนาเพื่อเก็บเกี่ยวแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับวัสดุอนินทรีย์ทั้งหมด ซิลิคอนมีค่า **คงที่ไดอิเล็กทริกสูง** ถึง 11.7 ซึ่งช่วยให้เกิดการแยกตัวของผู้ขนส่งประจุ (Charge-Carriers) ด้วยความร้อนหลังจากการสร้าง

2.4.2 เซลล์สุริยะยุคที่ 2

Gallium Arsenide



รูปที่ 2.11 แผงโซลาร์เซลล์ แกลเลียมอาร์เซไนด์ บนยานสำรวจดาวอังคาร สปิริต (Spirit) ภาพโดย NASA/JPL-Caltech/Cornell

แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) มีประสิทธิภาพสูงสุดในบรรดาวัสดุโฟโตโวลตาอิกทั้งหมด โดยทำได้ถึง **29.1%** ซึ่งเป็นผลมาจาก GaAs มี **ช่องว่างพลังงาน** แบบตรง (Direct Band Gap) ที่เหมาะสมกว่า คือ 1.43 eV ทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้ดีขึ้นแม้ใช้ชั้นที่บางกว่า และมีการสูญเสียพลังงานที่ลดลง นอกจากนี้ GaAs ยังมีคุณสมบัติในการขนส่งอิเล็กตรอนที่เหนือกว่าซิลิคอน อย่างไรก็ตาม วัสดุนี้มี **ต้นทุนการผลิตสูงมาก** เนื่องจากต้องใช้ความบริสุทธิ์ของวัสดุในระดับสูง ซึ่งโดยทั่วไปทำให้ถูกจำกัดการใช้งานอยู่ในกลุ่ม **อวกาศ** เท่านั้น (เช่น ดาวเทียมและยานสำรวจ)

Cadmium Telluride

แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เป็นเทคโนโลยีโฟโตโวลตาอิกแบบฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งทำประสิทธิภาพได้ถึง 22.1% CdTe มีช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ใกล้เคียงกับ GaAs ที่ 1.44 eV ทำให้มีข้อดีเช่นเดียวกับที่พบใน GaAs คือ การดูดกลืนแสงที่ดีในฟิล์มบางและการสูญเสียพลังงานโฟตอนต่ำ วัสดุนี้ยังมีข้อดีคือสามารถสร้างให้มีความยืดหยุ่น (flexible) มีต้นทุนต่ำมาก และได้ถูกนำไปผลิตเป็นแผงโซลาร์เซลล์เชิงพาณิชย์ที่มีราคาถูกกว่าซิลิคอนและมีระยะเวลาคืนทุนด้านพลังงานที่สั้นกว่ามาก (แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า) อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดบางประการ คือ แคดเมียมมีความเป็นพิษสูง และ เทลลูเรียมเป็นแร่หายาก ทำให้ความยั่งยืนในระยะยาวของเทคโนโลยีนี้ยังคงไม่แน่นอนสำหรับตอนนี้

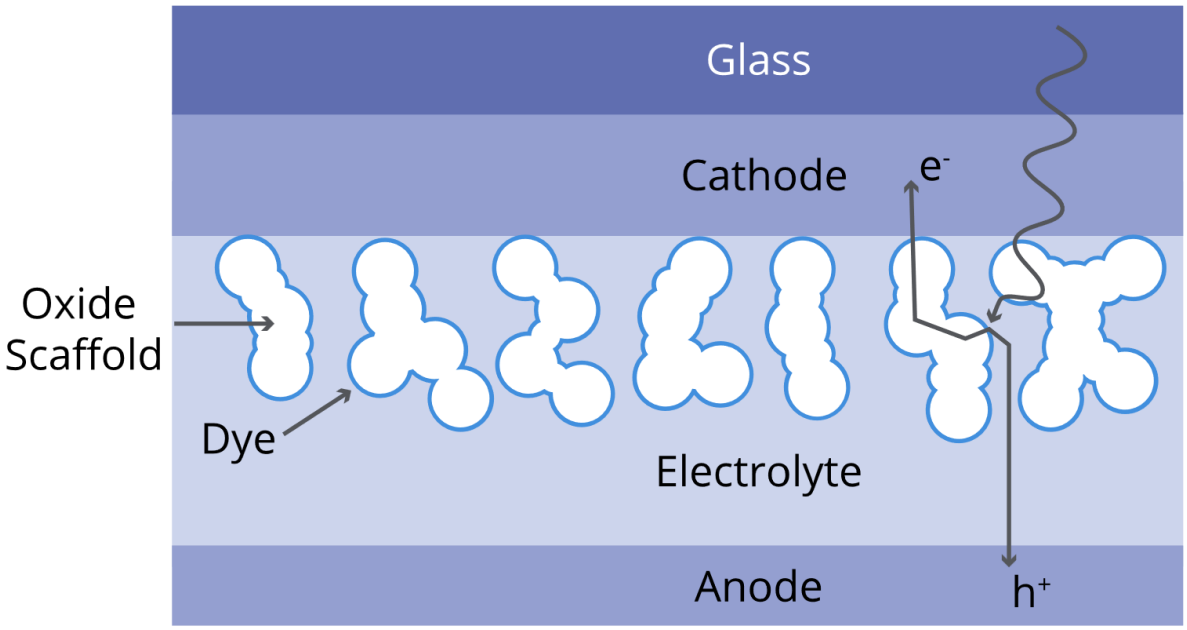
Copper Indium Gallium Selenide

คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมซีลีไนด์ (CIGS) มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับอุปกรณ์ CdTe โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 23.4% สารประกอบนี้มีสูตรเคมี CuInxGa(1-x)Se2 โดยที่ค่า x สามารถมีค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 1 การปรับโครงสร้างทางเคมีนี้ทำให้สามารถปรับแต่งช่องว่างพลังงานของวัสดุได้ระหว่าง 1.0 eV (x = 1, คอปเปอร์อินเดียมซีลีไนด์บริสุทธิ์) ถึง 1.7 eV (x = 0, คอปเปอร์แกลเลียมซีลีไนด์บริสุทธิ์) อย่างไรก็ตาม เช่นเดียวกับเซลล์ GaAs เซลล์ CIGS มีต้นทุนการผลิตสูง ทำให้แผงโซลาร์เซลล์ที่ได้ไม่สามารถแข่งขันกับเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันได้ ยิ่งไปกว่านั้น เช่นเดียวกับเทลลูเรียม อินเดียมเป็นแร่หายากมาก ซึ่งจำกัดศักยภาพในระยะยาวของเทคโนโลยีนี้

2.4.3 เซลล์สุริยะยุคที่ 3

โฟโตโวลตาอิกยุคที่สาม ซึ่งเป็นที่รู้จักในฐานะเทคโนโลยีโฟโตโวลตาอิกที่กำลังเกิดขึ้นใหม่ (emerging photovoltaic technologies) ครอบคลุมถึง **เซลล์สุริยะย้อมสี (dye-sensitized)**, **เซลล์สุริยะอินทรีย์ (organic)** และ **เซลล์สุริยะเพอรอฟสไกต์ (perovskite)** วัสดุเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะ **เสื่อมสภาพ (degrade)** เมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์สุริยะ ดังนั้น จึงต้องใช้ **ตู้ปลอดเชื้อ (Glove boxes)** เพื่อสร้างบรรยากาศเฉื่อย (inert atmosphere) ในการป้องกันการเสื่อมสภาพของวัสล์เหล่านี้

Dye-Sensitized



รูปที่ 2.12 โครงสร้างและการทำงานของเซลล์สุริยะย้อมสีโฟตอนจะถูกดูดกลืนโดยสีย้อมจากนั้นอิเล็กตรอน และ โฮลที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายโอนไปยังโครงรองรับออกไซด์ และ อิเล็กโทรไลต์

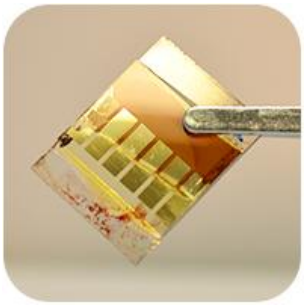
เซลล์สุริยะย้อมสี (Dye-sensitized solar cells - DSSCs) ใช้ สีย้อมอินทรีย์ ในการดูดกลืนแสง สีย้อมเหล่านี้ถูกเคลือบบน โครงรองรับออกไซด์ (โดยทั่วไปคือ ไทเทเนียมออกไซด์) ซึ่งจะถูกแช่อยู่ใน อิเล็กโทรไลต์เหลว สีย้อมจะดูดกลืนแสง และอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกถ่ายโอนไปยังโครงรองรับออกไซด์ ในขณะที่โฮลจะถูกถ่ายโอนไปยังอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นผู้ขนส่งประจุเหล่านี้จะถูกรวบรวมที่ขั้วไฟฟ้า เซลล์เหล่านี้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าอุปกรณ์อนินทรีย์ แต่มีศักยภาพที่จะ มีราคาถูกกว่ามาก สามารถผลิตผ่าน การพิมพ์แบบม้วนต่อม้วน (roll-to-roll printing) มีคุณสมบัติ กึ่งยืดหยุ่น และ กึ่งโปร่งใส อย่างไรก็ตาม ยังคงมีปัญหาในการใช้งานเนื่องจากมีการใช้อิเล็กโทรไลต์เหลว ซึ่งเกี่ยวกับ เสถียรภาพทางอุณหภูมิ (เนื่องจากอาจเกิดการแข็งตัวหรือขยายตัวได้) การใช้วัสดุที่มีราคาแพง และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

Organic

เซลล์สุริยะอินทรีย์ (Organic Solar Cells - OSCs) ใช้ พอลิเมอร์กึ่งตัวนำอินทรีย์ หรือ โมเลกุลขนาดเล็ก เป็นวัสดุไวแสง (photoactive materials) ปัจจุบัน เทคโนโลยีนี้สามารถทำประสิทธิภาพได้ถึง 18.2% เซลล์เหล่านี้ทำงานคล้ายกับอุปกรณ์อนินทรีย์ อย่างไรก็ตาม สารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยทั่วไปมี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ซึ่งหมายความว่าเอ็กซิตอน (exciton) ที่เกิดขึ้นไม่สามารถสลายตัวด้วยความร้อนได้ แต่เอ็กซิตอนจะต้องถูกลำเลียงไปยัง ส่วนรอยต่อ (interface) กับวัสดุที่มีส่วนชดเชยระดับพลังงาน (energy level offset) ที่สูงกว่าพลังงานพันธะของโฟตอน ที่ส่วนรอยต่อนั้นเอง อิเล็กตรอน (หรือโฮล) จะสามารถถ่ายโอนไปยังวัสดุอื่นและแยกเอ็กซิตอนออกจากกัน ทำให้สามารถรวบรวมผู้ขนส่งประจุได้ (ดังที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้ในส่วนทฤษฎีทั่วไป) เนื่องจากเอ็กซิตอนโดยทั่วไปสามารถแพร่ (diffuse) ได้เพียงประมาณ 10 nm ก่อนที่อิเล็กตรอนและโฮลจะรวมตัวกันใหม่ ทำให้สิ่งนี้เป็นข้อจำกัดด้านความหนา โครงสร้าง และท้ายที่สุดคือประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิกอินทรีย์ แม้จะมีข้อจำกัดนี้ แต่อุปกรณ์เหล่านี้ก็มีข้อได้เปรียบที่สำคัญเหนืออุปกรณ์อนินทรีย์หลายประการ ได้แก่ ต้นทุนวัสดุต่ำ น้ำหนักเบา มีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่ เข้มข้นและปรับแต่งได้ มีความยืดหยุ่น และมีศักยภาพในการผลิตโดยใช้ เทคนิคการพิมพ์แบบม้วนต่อม้วน (roll-to-roll printing) อย่างไรก็ตาม วัสดุอินทรีย์ในปัจจุบันยังคงประสบปัญหาด้าน ความเสถียร ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพทางเคมีเชิงแสง (photochemical degradation)

Perovskite

เซลล์สุริยะเพอรอฟสไกต์ (Perovskite Solar Cells - PSCs) ใช้วัสดุเพอรอฟสไกต์ (วัสดุที่มีโครงสร้างผลึก ABX3) เป็นชั้นดูดซับแสง เพอรอฟสไกต์ถูกนำมาใช้ในงานนี้ค่อนข้างใหม่ โดยมีการรายงานการใช้งานครั้งแรกในอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิกในปี 2006 (โดยเป็นสีย้อมในเซลล์ DSSC ซึ่งทำประสิทธิภาพได้ 2.2%) อย่างไรก็ตาม ปี 2012 ถูกยกให้เป็นจุดกำเนิดของสาขา เนื่องจากมีการตีพิมพ์งานวิจัยสำคัญที่สามารถทำประสิทธิภาพได้ถึง 10.9% นับตั้งแต่นั้นมา ประสิทธิภาพสูงสุดก็เพิ่มขึ้นเป็น 25.5% ทำให้ PSCs กลายเป็นเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการพัฒนาเร็วที่สุด วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติที่น่าทึ่ง รวมถึงคุณสมบัติการดูดกลืนที่เข้มข้นและปรับแต่งได้ และการขนส่งประจุแบบสองขั้ว (ambipolar charge transport) นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปจากสารละลายได้ในสภาวะปกติ (ambient conditions)



รูปที่ 2.13 เซลล์สุริยะเพอรอฟสไกต์

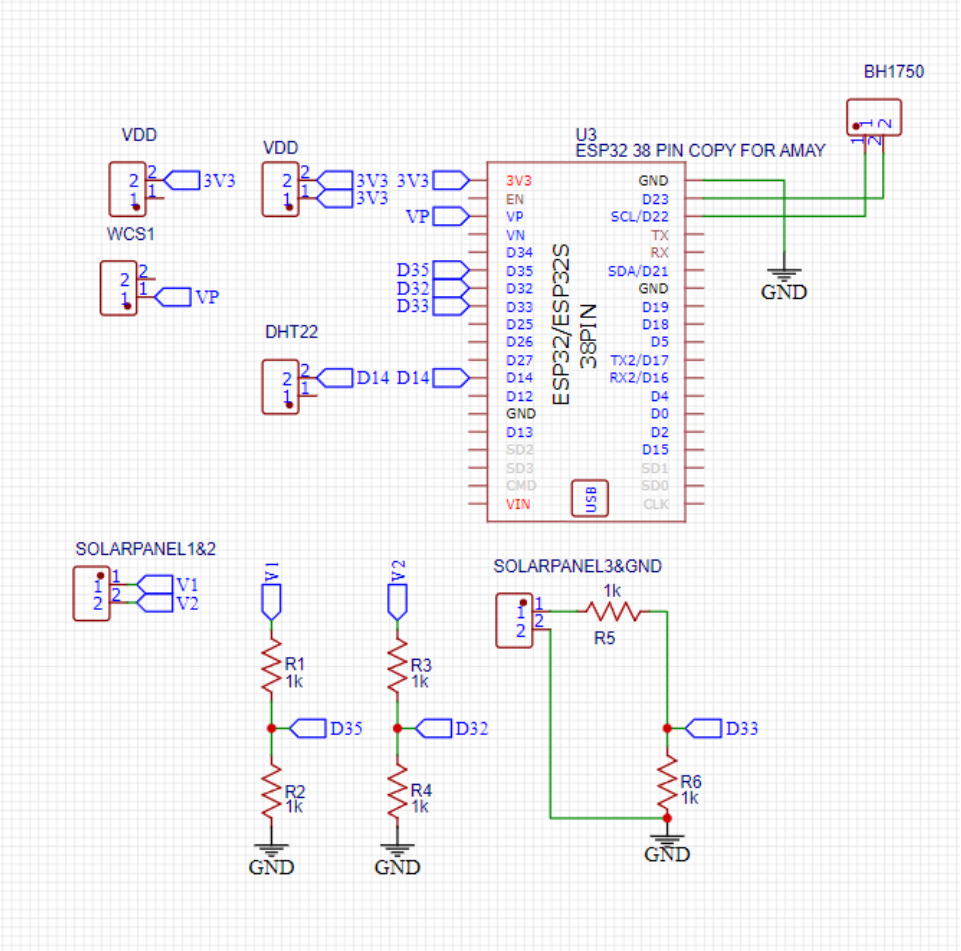
ยังมีปัญหาเรื่องความเสถียรและการใช้วัสดุที่เป็นพิษ (เช่น ตะกั่ว) ที่ขัดขวางไม่ให้เทคโนโลยีนี้ถูกนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ แต่สาขานี้ยังค่อนข้างใหม่และมีการดำเนินงานวิจัยอย่างเข้มข้น

บทที่ 3

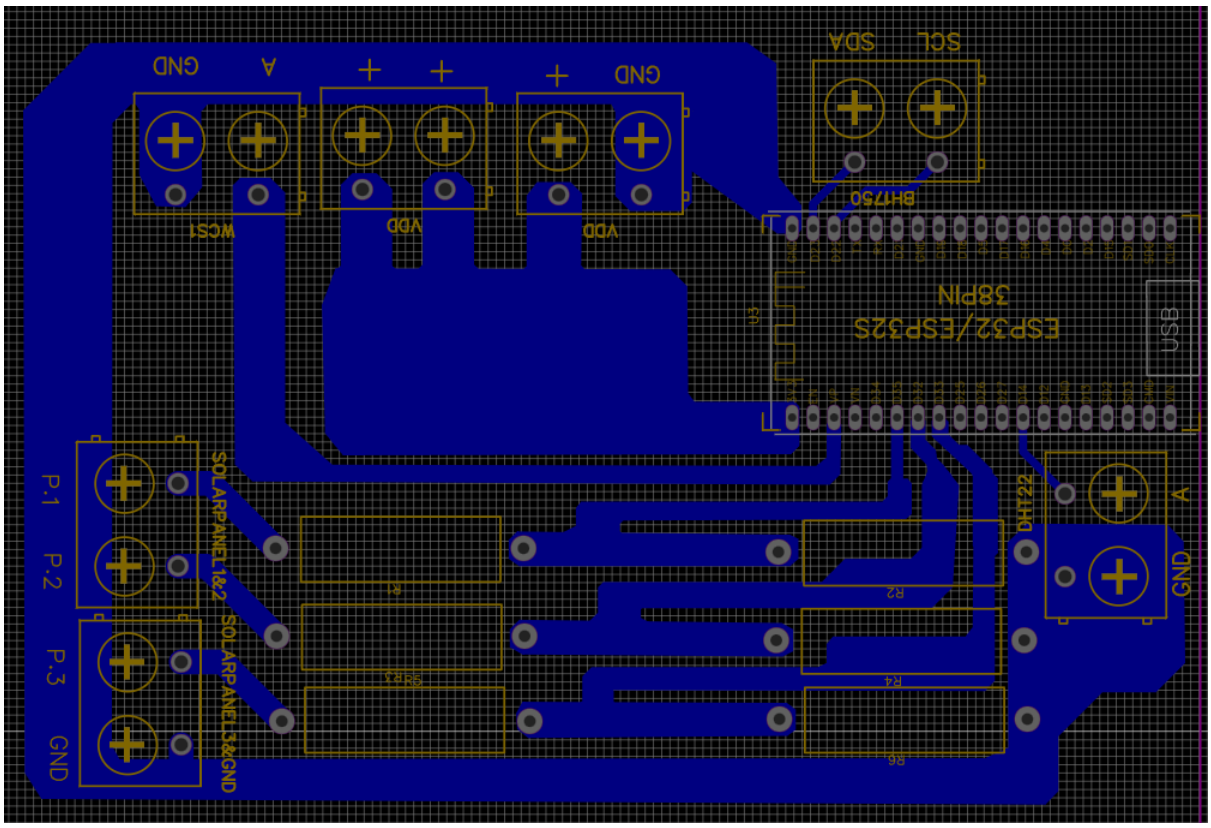
การออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

แนวคิดของการทดลองเบื้องต้นนี้คือการใช้แหล่งจ่ายไฟตรงจำลองเอาต์พุตของเซลล์สุริยะ โดยจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าเข้าไปยัง วงจรแบ่งแรงดันและวงจรวัดกระแส ซึ่งค่าที่วัดได้จากวงจรเหล่านั้นจะถูกประมวลผลโดยบอร์ดควบคุมที่มี WIFI เพื่อ ส่งข้อมูลขึ้นไปยัง Google Sheet โดยอัตโนมัติ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบการวัดและการส่งข้อมูลก่อนการทดสอบภาคสนามจริง



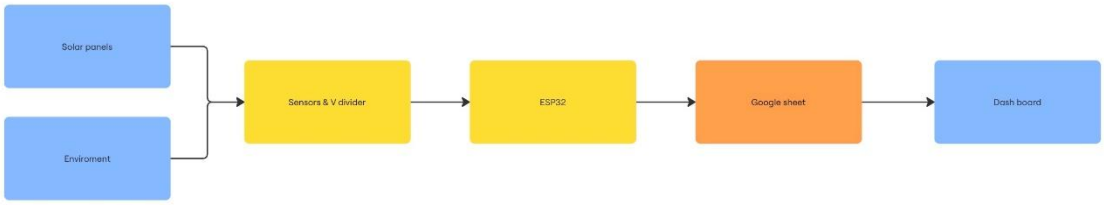
*รูปที่ 3.1**แผนผังวงจร***



รูปที่ 3.2PCB Layout

3.1.1 ภาพรวมสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์

ระบบซอฟต์แวร์ของโครงงานนี้ออกแบบให้ทำงานเชื่อมต่อกันเป็นลำดับขั้น ตั้งแต่การเก็บข้อมูลในระดับฮาร์ดแวร์จนถึงการแสดงผลต่อผู้ใช้งาน โดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Layer) ชั้นการจัดเก็บบนคลาวด์ (Cloud Storage Layer) และชั้นการแสดงผล (Visualization Layer)



รูปที่ 3. 3 system blockdiagram

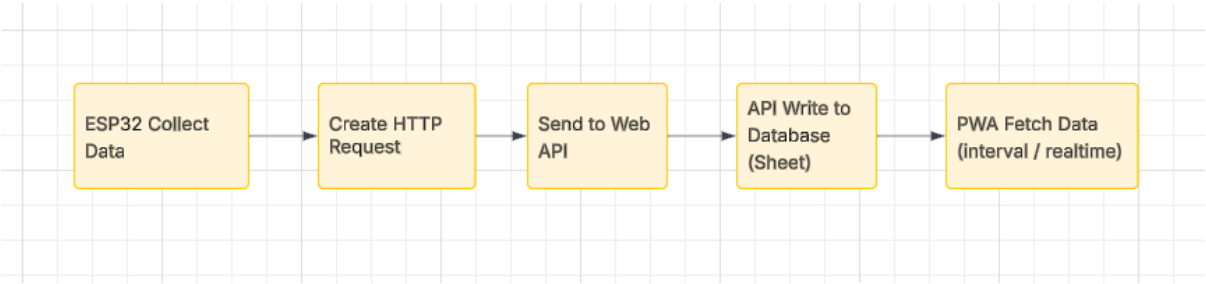
3.2 วงจร ESP32

ESP32 เป็นชิปแบบรวม combo chips ที่มีฟังก์ชัน Wi-Fi และ Bluetooth ในตัว ถูกออกแบบมาโดยเน้นประสิทธิภาพพลังงานและคลื่นความถี่วิทยุที่ดีที่สุด ผ่านเทคโนโลยี nm ของ TSMC ทำให้มีความทนทาน

ความสามารถรอบด้าน และความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับเป็นแกนหลักของการทดลองวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์และการส่งข้อมูลขึ้นคลาวด์

1. โครงสร้างหน่วยประมวลผลและหน่วยความจำ

- **หน่วยประมวลผลกลาง (CPU):** ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ Xtensa 32-bit LX6 โดยเป็นสถาปัตยกรรมแบบ **Dual-Core** ซึ่งแกนประมวลผลสามารถทำงานที่ความถี่สูงถึง **240 MHz** กำลังประมวลผลที่สูงนี้ช่วยให้สามารถจัดการงานหลายอย่างพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การวัดค่า ADC การคำนวณกำลังไฟฟ้า และการจัดการ Wi-Fi Stack
- **หน่วยความจำ (Memory):** มี SRAM ภายในขนาด 520 ซึ่งเพียงพอสำหรับเก็บโค้ดโปรแกรมและตัวแปรข้อมูลที่ซับซ้อนของระบบ data logger และมี ROM ขนาด 448 KB สำหรับฟังก์ชันบูตหลักของระบบ



รูปที่ 3.4 Esp32/ Software block diagram

2. การวัดสัญญาณอนาล็อก (ADC) สำหรับการวัดค่าไฟฟ้า

คุณสมบัตินี้มีความสำคัญสูงสุดในการแปลงค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรเป็นข้อมูลดิจิทัลที่สามารถประมวลผลได้:

- **ความละเอียด ADC:** มีตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ADC แบบ **12 bit** ทำให้สามารถรับค่าได้ในช่วง 0 ถึง 4095 ซึ่งให้ความละเอียดในการวัดที่สูงมากสำหรับการวัดความผันผวนของแรงดันและกระแส
- **ช่องสัญญาณ:** รองรับการวัดสัญญาณอนาล็อกได้สูงสุดถึง **18 ช่องสัญญาณ** ซึ่งมีเพียงพอสำหรับการขยายการทดลองเพื่อวัดค่าจากเซลล์สุริยะหลายเซลล์พร้อมกัน
- **ข้อจำกัดของ ADC, GPIO:** ควรระลึกไว้เสมอว่าขา GPIO ที่ใช้สำหรับ ADC นั้นเป็น **ขาสำหรับรับสัญญาณเข้าเท่านั้น (Input-only)** และไม่มีวงจร pull-upหรือ pull-down ภายใน ทำให้การออกแบบวงจรภายนอกต้องถูกต้องเพื่อหลีกเลี่ยงการลอยตัวของสัญญาณ Floating signal

3. ขา GPIO และการสื่อสาร

- **ขา GPIO:** มีขาอเนกประสงค์ GPIO ที่ใช้งานได้ประมาณ 30-40 ขา โดยขาเหล่านี้สามารถตั้งค่าให้เป็นได้ทั้ง input และ output รวมถึงรองรับฟังก์ชัน **PWM, SPI** และ **I2C** ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ดิจิทัลหรืออุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น ๆ

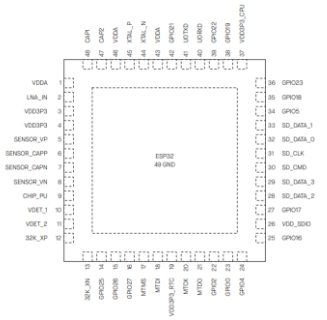
4. การเชื่อมต่อ Wi-Fi และความปลอดภัยของข้อมูล

- **การเชื่อมต่อ Wi-Fi:** มีการเชื่อมต่อ Wi-Fi 802.11 ในตัว ซึ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยัง Google Sheet ผ่านการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตที่เสถียร
- **ความเร็วการสื่อสาร:** รองรับความเร็วสูงสุด 150 Mbps ทำให้การส่งข้อมูลจำนวนมากเป็นไปอย่างรวดเร็ว
- **คุณสมบัติความปลอดภัย:** มีคุณสมบัติความปลอดภัยที่แข็งแกร่ง เช่น การเข้ารหัสข้อมูล AES และการบูตที่ปลอดภัย Secure Boot ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อปกป้องข้อมูลที่ถูกส่งไปยังระบบคลาวด์จากภัยคุกคามภายนอก

5. การจัดการพลังงานและการใช้งานระยะยาว

โหมดพลังงานต่ำ: ESP32 มีโหมด **Deep-sleep** ที่ลดการใช้พลังงานลงเหลือเพียงประมาณ uA และยังมี **coprocessor** ที่สามารถทำการวัดค่าพื้นฐานได้ในขณะที่ CPU หลักหลับอยู่ ทำให้ ESP เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งาน data loggers ที่ต้องทำงานในระยะยาวและพึ่งพาพลังงานจากแบตเตอรี่หรือโซลาร์เซลล์ขนาดเล็ก

- **ความทนทาน:** ตัวชิปถูกออกแบบให้ทนทานต่ออุณหภูมิและสภาวะการทำงานที่หลากหลาย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการติดตั้งภาคสนามที่มีความผันผวนของอุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.5 บอร์ด ESP32

3.3ชั้นการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Layer)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่เป็นแกนหลักในการประมวลผลซอฟต์แวร์ฝั่งอุปกรณ์ โดยชุดคำสั่งที่ฝังไว้ในชิปทำงานดังนี้

3.3.1ชั้นการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Layer)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่เป็นแกนหลักในการประมวลผลซอฟต์แวร์ฝั่งอุปกรณ์ โดยชุดคำสั่งที่ฝังไว้ในชิปทำงานดังนี้

สิ่งที่ซอฟต์แวร์วัดและเก็บข้อมูล:

พารามิเตอร์	เซนเซอร์/วงจร	หน่วย
แรงดันไฟฟ้า (Voltage)	วงจรแบ่งแรงดัน + ADC ของ ESP32	โวลต์ (V)
กระแสไฟฟ้า (Current)	WCS1800 (Hall-effect sensor) + ADC	แอมแปร์ (A)
กำลังไฟฟ้า (Power)	คำนวณจาก P = IV	วัตต์ (W)
อุณหภูมิ (Temperature)	DHT22	องศาเซลเซียส (°C)
ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity)	DHT22	%RH
ความเข้มแสง (Solar Intensity)	BH1750	Lux

กระบวนการทำงานของซอฟต์แวร์ในชั้นนี้ประกอบด้วย:

1.การสุ่มตัวอย่างสัญญาณอนาล็อก — ESP32 อ่านค่าดิบจาก ADC 12-bit อย่างต่อเนื่อง

2.การปรับเทียบสัญญาณ (Calibration) — นำสมการปรับเทียบที่ฝังในโค้ดมาแปลงค่าดิบให้เป็นค่าจริง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) ที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันและเซนเซอร์วัดกระแส

3.การคำนวณกำลังไฟฟ้า — คำนวณกำลังไฟฟ้าจากสมการ P = IV สำหรับแต่ละแผง (P1, P2, P3)

3.3.2 ชั้นการจัดเก็บบนคลาวด์ (Cloud Storage via Google Sheets)

ซอฟต์แวร์ส่งข้อมูลจาก ESP32 ขึ้น Google Sheets ผ่านโปรโตคอล HTTP GET/POST โดยมีลักษณะการทำงานดังนี้:

- ส่งข้อมูลทุกช่วงเวลาที่กำหนด พร้อม Timestamp กำกับแต่ละชุดข้อมูล
- ระบบสามารถจัดเก็บข้อมูลย้อนหลังได้ต่อเนื่อง รองรับการกรองข้อมูลตามช่วงวันที่ (วันนี้, เมื่อวาน, 7 วัน, 14 วัน, 30 วัน, และกำหนดเอง)
- Google Sheets ทำหน้าที่เป็น Cloud Database สำหรับโปรเจคนี้ เนื่องจากต้นทุนต่ำและรองรับการเชื่อมต่อ API ได้โดยตรง

3.3.3ชั้นการแสดงผล — Progressive Web App (PWA)

ระบบแสดงผลพัฒนาในรูปแบบ Progressive Web App (PWA) ซึ่งมีความสามารถดังนี้:

สิ่งที่ Dashboard แสดงและทำได้:

ก) การแสดงค่าเรียลไทม์ (Real-Time KPI Cards)

- Total Power (P3) — กำลังไฟฟ้ารวมปัจจุบัน (Watts) และค่าเฉลี่ย
- Solar Intensity — ความเข้มแสงปัจจุบัน (Lux) และค่าเฉลี่ย
- Panel Temperature — อุณหภูมิแผงปัจจุบัน (°C) และค่าเฉลี่ย
- Humidity — ความชื้นสัมพัทธ์ปัจจุบัน (%RH) และค่าเฉลี่ย

ข) การแสดงกราฟประวัติข้อมูล (Historical Time-Series Charts)

- กราฟ Voltage (V1/V2/V3) แยกแต่ละแผง
- กราฟ Power Output (P1/P2/P3) แยกแต่ละแผง
- กราฟ Solar Intensity (Lux) ตามช่วงเวลา
- กราฟ Temperature (°C) ตามช่วงเวลา
- กราฟ Humidity (%RH) ตามช่วงเวลา

ค) ระบบกรองข้อมูล (Filter System)

- กรองตามช่วงเวลา: วันนี้, เมื่อวาน, 7 วัน, 14 วัน, 30 วัน, กำหนดเองระบุวันที่

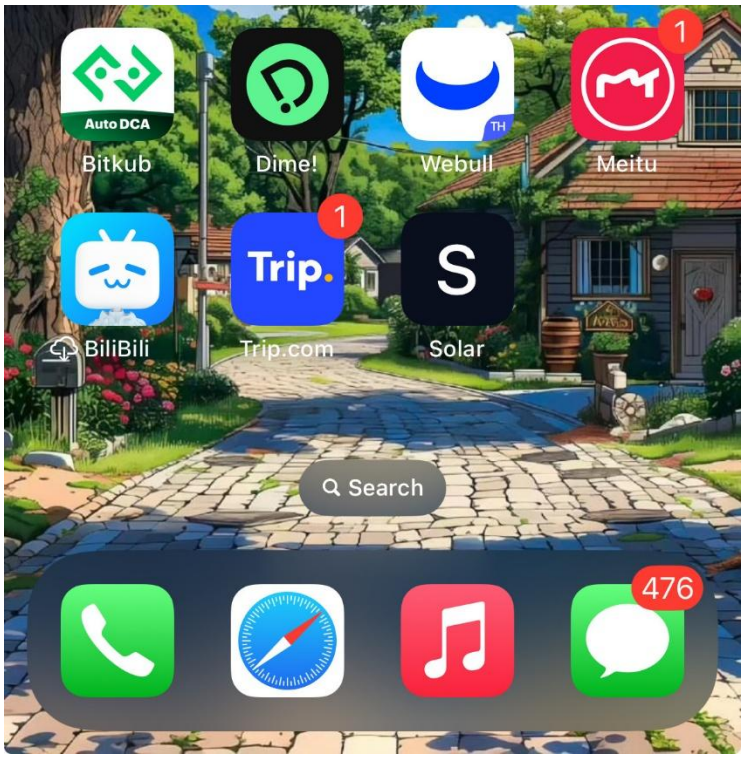
ง) คุณสมบัติ PWA

- ติดตั้งบน Smartphone ได้โดยไม่ผ่าน App Store (Add to Home Screen)
- รองรับทั้ง iOS และ Android
- UI ออกแบบสำหรับหน้าจอมือถือโดยเฉพาะ

จ) เว็บไซต์แสดงข้อมูล (solardata.thaisolarengineer.com)

- หน้าเว็บแยกต่างหากสำหรับแสดงข้อมูลโครงงานและผลการวัด

รูปที่ 3.6Website



รูปที่ 3.7 PWA

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 คุณสมบัติที่ต้องการ

4.1.1 ความแม่นยำเชิงปริมาณสูงในการวัดค่า (High Quantitative Accuracy)

ระบบจะต้องมีความสามารถในการตรวจวัดค่า ศักย์ไฟฟ้า (Voltage) และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density) ที่ถูกสร้างขึ้นโดยเซลล์สุริยะได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งจำเป็นต้องมีองค์ประกอบดังนี้:

- **ความละเอียด ADC สูง (High ADC Resolution):** ใช้อุปกรณ์ที่มีตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ที่มีอย่างน้อย 12-bit เพื่อให้ได้ช่วงการวัด 0 ถึง 4095 ซึ่งช่วยให้สามารถจับความเปลี่ยนแปลงของค่าไฟฟ้าได้อย่างละเอียด (High Fidelity Measurement)
- **การสอบเทียบที่เข้มงวด (Rigorous Calibration):** มีการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับ มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) จากเครื่องมือวัดทางมาตรวิทยา (เช่น มัลติมิเตอร์ความแม่นยำสูง) และการใช้ สมการปรับเทียบ (Calibration Equation) ในโค้ดเพื่อแก้ไข ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) ของวงจรวัด
- **สัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise):** การออกแบบวงจรต้องลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical Noise) ให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความ เที่ยงตรง (Precision) และมีความผันผวนของข้อมูลต่ำ

4.1.2 การส่งข้อมูลแบบทันทีและต่อเนื่อง (Instantaneous and Continuous Data Logging)

ระบบต้องสามารถส่งผลลัพธ์ที่วัดได้ไปยัง Google Sheet เพื่อการจัดเก็บ การประมวลผล และการแสดงผลแบบเรียลไทม์ ซึ่งจำเป็นต้องมีคุณสมบัติดังนี้:

- **การเชื่อมต่อไร้สายที่มีเสถียรภาพ (Stable Wireless Connectivity):** ใช้วงจรที่มีโมดูล Wi-Fi ในตัว (เช่น ESP32) เพื่อสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายที่เชื่อถือได้
- **การอัปโหลดข้อมูลแบบทันที (Real-Time Upload):** โปรแกรมจะต้องส่งข้อมูลที่วัดได้ (พร้อม Timestamp) ไปยังคลาวด์ (Google Sheet) ด้วยความถี่สูง (เช่น ทุก 20 นาที) โดยใช้โปรโตคอล HTTP GET/POST หรือ API ที่เหมาะสม

- **ความพร้อมในการใช้งาน (Availability):** ระบบต้องสามารถรักษาการเชื่อมต่อกับ Wi-Fi และเซิร์ฟเวอร์ Google Sheet ไว้ได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการสูญหายของชุดข้อมูล (Data Loss) ในระหว่างการทดลอง
- **ประสิทธิภาพการประมวลผล (Processing Performance):** CPU ต้องมีสมรรถนะเพียงพอ (เช่น Dual-Core ของ ESP32) ที่จะจัดการกับภาระงานของ ADC Conversion และ Network Stack ได้พร้อมกันโดยไม่เกิดการหน่วงของระบบ (System Latency)

4.2 ผลการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ **ประเมินความสามารถและสอบเทียบระบบการวัดและบันทึกข้อมูล** ของชุดทดลอง ก่อนนำไปใช้กับเซลล์สุริยะจริง โดยใช้พาวเวอร์ซัพพลาย (Power Supply) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าจำลอง

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. การตรวจสอบความแม่นยำเชิงปริมาณ (Quantitative Accuracy Verification): เพื่อตรวจสอบและสอบเทียบ ความเที่ยงตรง (Precision) ของวงจรวัดค่าแรงดันและกระแส โดยการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage) และ กระแสไฟฟ้า (Current) ที่ถูกอ่านโดยขา ADC ของ ESP32 กับค่าอ้างอิงที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมาตรวิทยาภายนอก (มัลติมิเตอร์) เพื่อให้มั่นใจว่า ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) อยู่ในระดับที่ยอมรับได้
2. การทดสอบระบบส่งข้อมูลแบบ Real-Time: เพื่อยืนยันความเสถียรและประสิทธิภาพของระบบ Wi-Fi Connectivity ของบอร์ด ESP32 ในการจัดเก็บชุดข้อมูลที่วัดได้ พร้อมTimestamp ไปยังแพลตฟอร์ม Cloud Storage (เช่น Google Sheet) อย่างทันทีและต่อเนื่อง
3. การประเมินสมรรถนะของ : เพื่อประเมินความเป็นเชิงเส้น (Linearity) และความละเอียด (12-bit Resolution) ของ Analog-to-Digital Converter ของชิป ESP32 ภายใต้โหลดไฟฟ้าที่จำลองจากพาวเวอร์ซัพพลาย

4.2.1 การทดลองวัดค่ากระแส (ค่าที่ได้ขึ้นมาใน Google Sheet)

ค่ากระแส	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.37	0.40	0.41
0.3	0.51	0.49	0.5
0.59	0.83	0.80	0.85
0.9	1.00	1.00	1.21

1.21	1.21	1.19	1.21
1.5	1.46	1.45	1.48
1.69	1.64	1.62	1.67

ตารางที่ 4.1 การทดลองวัดค่ากระแส

V (divider r2/(r1+r2), r2=2k, r1=32k) maxที่50V

Max=100v r2=3k, r1=91k

Max=150v. R2= 120, R1=6k

4.2.2 การทดลองวัดค่าแรงดัน (ค่าที่ได้ขึ้นมาใน Google Sheet)

ค่ากระแส	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	2.84	2.84	2.84
5.1	5.48	5.51	5.47
10	9.81	9.83	9.80
15	14.00	13.95	13.97
20	18.51	18.47	18.53
25	22.94	22.94	22.91
30	27.27	27.25	27.30

ตารางที่ 4.2 การทดลองวัดค่าแรงดัน

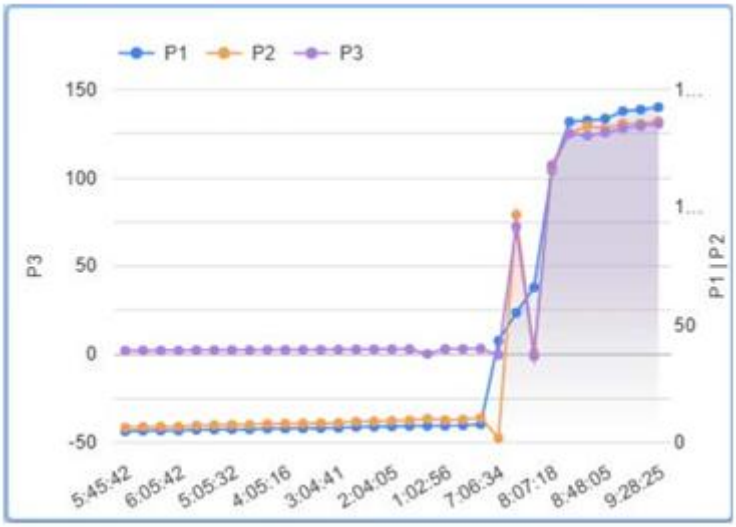
4.3 ผลการตรวจวัดผ่านระบบ Monitoring (Dashboard)

ในส่วนนี้แสดงผลการทดสอบการทำงานของระบบMonitoringแบบเรียลไทม์ที่เชื่อมต่อกับระบบคลาวด์โดยข้อมูลจะถูกจัดเก็บวิเคราะห์และแสดงผลผ่านDashboard เพื่อสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

4.3.1 การแสดงผลแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

รูปที่ 4.1แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละเฟส (v1, v2, v3) ตามช่วงเวลา

4.3.2 การแสดงผลกำลังไฟฟ้า (Power)

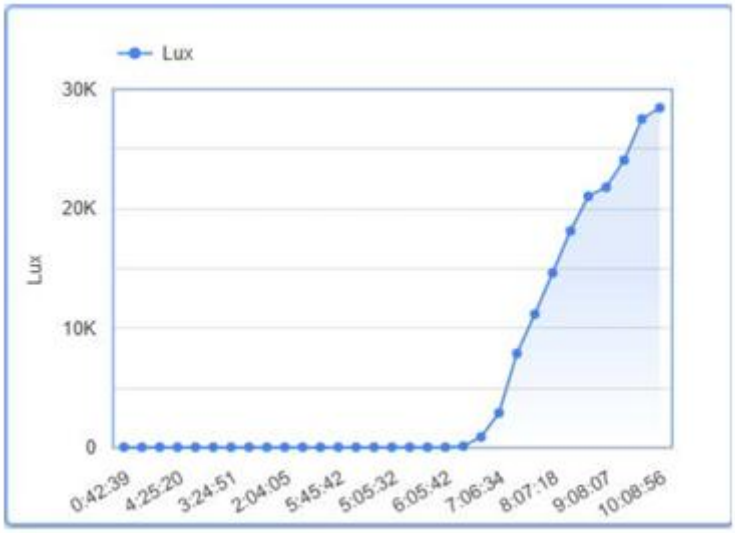


รูปที่ 4.2แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Power) ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ P = IV

4.3.4 การแสดงผลผ่านdashboard(PWA)

รูปที่ 4.3การแสดงผลผ่านdashboard(PWA)

4.3.3 การแสดงผลความเข้มแสง (Solar Intensity)

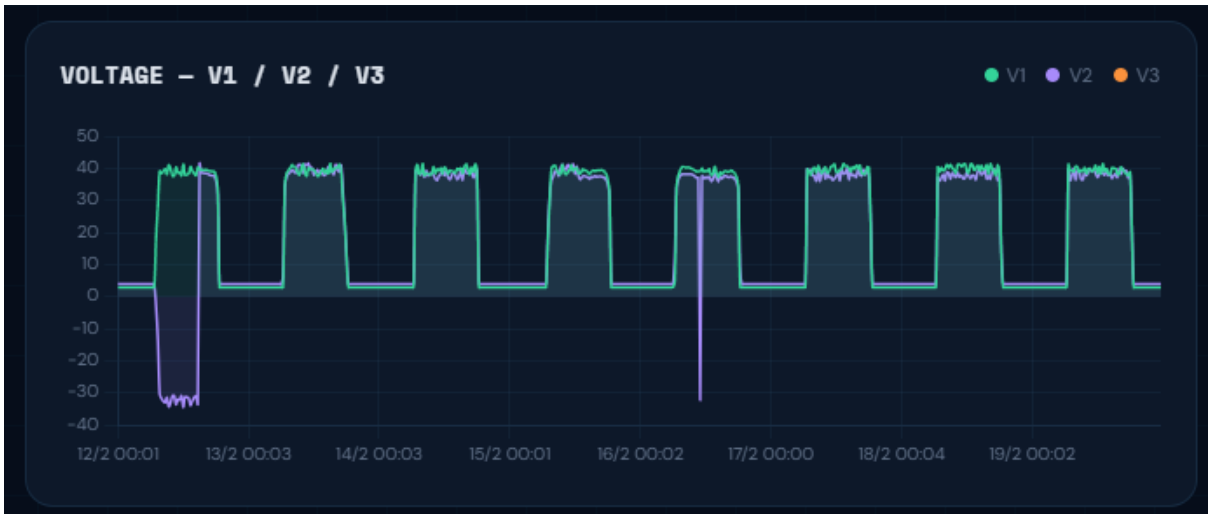


รูปที่ 4.4แสดงค่าความเข้มแสง (Lux) ที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์สภาพแวดล้อม

4.3.4 การทดสอบกับแผง 1 แผง (1 Panel)

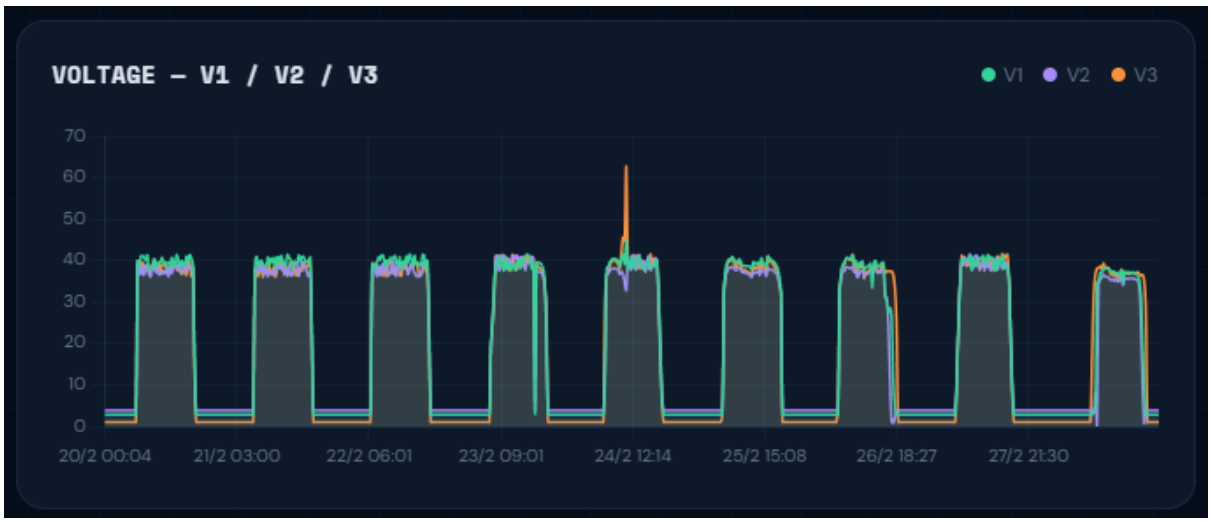
รูปที่ 4.5แสดงผลกราฟ Voltage 1 panel (V1/V2/V3) และ Temperature ตามช่วงเวลา

4.3.5 การทดสอบกับแผง 2 แผง (2 Panels)



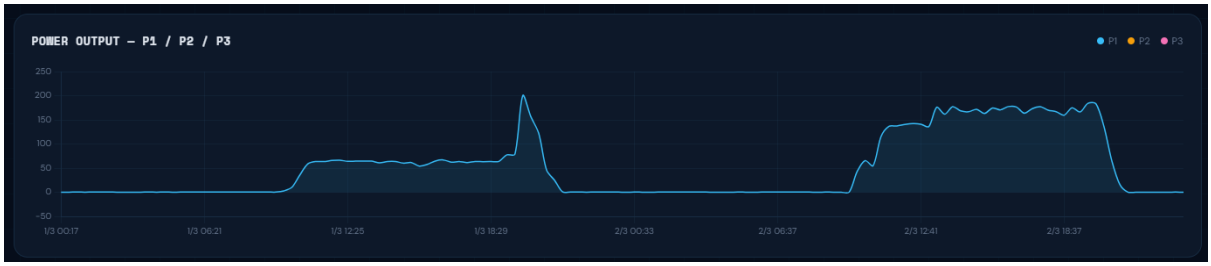
รูปที่ 4.6แสดงผลกราฟ Voltage 2 panel (V1/V2/V3) และ Temperature ตามช่วงเวลา

4.3.6 การทดสอบกับแผง 3 แผง (3 Panels)



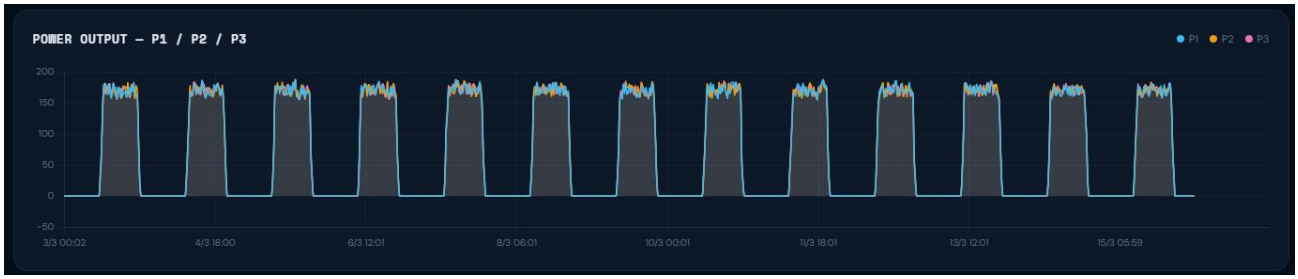
รูปที่ 4.7แสดงผลกราฟ Voltage 3 panel (V1/V2/V3) และ Temperature ตามช่วงเวลา

4.3.7 การทดสอบ 1 แผงกับโหลด 20Ω



รูปที่ 4.8 แสดงกำลังไฟฟ้า 1 panel เมื่อต่อโหลด20Ω

4.3.8 การทดสอบ 3 แผงกับโหลด 30Ω ระยะยาว



รูปที่ 4.9แสดงกำลังไฟฟ้า 3 panel เมื่อต่อโหลด30Ω

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1.1 การทำงานของระบบ

โครงงานนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สายเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์สำคัญของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ครบถ้วน ทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสง และสามารถส่งข้อมูลขึ้นสู่ระบบคลาวด์ได้อย่างต่อเนื่องและทันที พร้อมแสดงผลผ่าน Dashboard ที่เข้าถึงได้ทั้งบนคอมพิวเตอร์และสมาร์ทโฟน

5.1.2 ผลการทดลองที่ได้

ความเที่ยงตรงของการวัดค่าสูง (High Measurement Precision):

- **ค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage)** และ **กระแสไฟฟ้า (Current)** ที่ถูกวัดและบันทึกโดยชุดวงจร ADC ของ ESP32 แสดงให้เห็นถึง **ความสอดคล้องสูง (High Concordance)** หรือ **ความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Discrepancy)** เมื่อเทียบกับค่า **มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard)** ที่วัดได้จริงจากเครื่องมือวัดมาตรวิทยา (มัลติมิเตอร์)
- สิ่งนี้ยืนยันว่า **การสอบเทียบเบื้องต้น (Preliminary Calibration)** ของวงจรแบ่งแรงดันและเซนเซอร์วัดกระแสมีประสิทธิภาพ และระบบ Analog-to-Digital Conversion ของ ESP32 มี **ความน่าเชื่อถือเชิงปริมาณ (Quantitative Reliability)** สูงสำหรับการทดลองจริง

ความสำเร็จในการส่งข้อมูลแบบทันที

- ระบบ ESP32 สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi ได้อย่างเสถียรและสามารถดำเนินการ **อัปโหลดชุดข้อมูล Data Set** ที่วัดได้ไปยัง **Google Sheet** ได้อย่างต่อเนื่องและ **ทันที (Instantaneous)**
- การนำข้อมูลขึ้น Google Sheet โดยตรงนี้ช่วยให้สามารถ **จัดเก็บข้อมูล (Data Storage) ประมวลผล (Processing)** และ **แสดงผลแบบกราฟิก Graphical Visualization** ของค่า Voltage , Current และ Environment ได้ทันที ซึ่งสนับสนุนกระบวนการ **วิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ Real-Time Analysis** สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.1.3 ผลสรุปด้านระบบสื่อสารและ IoT

ระบบ Wi-Fi Network Stack ของ ESP32 แสดงให้เห็นถึงความเสถียรในการส่งข้อมูลขึ้น Google Sheets ได้อย่างต่อเนื่องและทันที โดยไม่มีการหน่วงของระบบที่มีนัยสำคัญภายใต้สภาวะการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบภาคสนามจริงพบว่าสัญญาณ Wi-Fi มาตรฐานไม่ครอบคลุมพื้นที่ติดตั้ง จึงจำเป็นต้องใช้เราเตอร์แบบ Cellular SIM แทน และพบปัญหาการสูญหายของข้อมูลในช่วงที่แบตเตอรี่ของเราเตอร์หมด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการติดตั้งถาวรในสภาพแวดล้อมจริงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟสำรองที่เชื่อถือได้สำหรับอุปกรณ์สื่อสาร

5.1.4 ผลสรุปด้านซอฟต์แวร์และการแสดงผล

ระบบแสดงผลในรูปแบบ Progressive Web App (PWA) สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ กล่าวคือผู้ใช้งานสามารถติดตั้ง Dashboard บนสมาร์ทโฟนได้โดยไม่ต้องผ่าน App Store รองรับทั้ง iOS และ Android และสามารถกรองข้อมูลตามช่วงเวลาที่ต้องการได้ ซึ่งช่วยให้บุคลากรที่ดูแลระบบสามารถติดตามสถานะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากทุกที่ทุกเวลา

5.2 วิจารณ์ผลการดำเนินงาน

1จุดแข็งของโครงงาน

- **ด้านความแม่นยำของการวัด** : ระบบแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือเชิงปริมาณในระดับสูง ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันและการแปลงสัญญาณของเซนเซอร์วัดกระแสอยู่ในระดับต่ำ และสามารถแก้ไขได้ด้วยสมการปรับเทียบในโค้ด ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการนำระบบไปใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงในขั้นต่อไป
- **ด้านการบูรณาการระบบ** : การผสานรวมระหว่างฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ฝั่งอุปกรณ์ ระบบคลาวด์ และส่วนแสดงผล ทำงานร่วมกันได้อย่างสอดคล้องตามที่ออกแบบไว้ ระบบสามารถทำงานได้ต่อเนื่องในระยะยาวจากผลการทดสอบระยะเวลาหลายสัปดาห์ระหว่างวันที่ 3 มีนาคม ถึง 17 มีนาคม พ.ศ. 2568
- **ด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์** : การพัฒนาระบบแสดงผลในรูปแบบ PWA ถือเป็นการยกระดับโครงงานจากระบบ Monitoring ทั่วไปไปสู่เครื่องมือที่ผู้ใช้งานจริงสามารถนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่มีข้อจำกัดด้านแพลตฟอร์ม

2. ประสิทธิภาพของระบบ IoT และการเก็บข้อมูล IoT Performance Effectiveness

- **การส่งข้อมูลแบบทันที (Instantaneous Data Transfer):** การที่ข้อมูลสามารถถูกส่งไปยัง GoogleSheet ได้อย่างต่อเนื่องและทันที Real-Time แสดงให้เห็นถึงความเสถียรของ **Wi-Fi Network Stack** ของ ESP32

- **ความได้เปรียบในการวิเคราะห์ (Analytical Advantage):** คุณสมบัตินี้ช่วยให้สามารถทำการ**วิเคราะห์ผลการดำเนินงานแบบเรียลไทม์ (Real-Time Performance Analysis)** ได้ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการทดสอบเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ Perovskite Solar Cells เนื่องจากสามารถสังเกตและบันทึก **ปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Phenomena)** และการเปลี่ยนแปลงของ J-V Curve ที่อาจเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้

3 ข้อจำกัดและปัญหาที่พบ

- **ข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์** ADC ภายในชิป ESP32 มีข้อจำกัดที่ทราบกันดีในด้านความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะในช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำและสูง รวมถึงความผันผวนของแรงดันอ้างอิงภายใน (Vref) ที่อาจเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสภาพแวดล้อม ซึ่งในสภาพแวดล้อมภาคสนามที่มีความผันผวนของอุณหภูมิสูงอาจส่งผลต่อความแม่นยำของการวัดได้
- **ข้อจำกัดด้านการสื่อสาร** การทดสอบในภาคสนามจริงพบว่าพื้นที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มักอยู่นอกระยะครอบคลุมของสัญญาณ Wi-Fi มาตรฐาน จำเป็นต้องพึ่งพาเราเตอร์แบบ Cellular SIM ซึ่งมีข้อจำกัดด้านแหล่งจ่ายไฟ และพบปัญหาข้อมูลสูญหายในช่วงที่แบตเตอรี่หมด
- **ข้อจำกัดด้านขอบเขต** โครงงานนี้ยังจำกัดอยู่ที่การทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนไม่เกิน 3 แผง และยังไม่ได้ทดสอบกับระบบขนาดใหญ่ในระดับโรงงานผลิตไฟฟ้า

4. ข้อเสนอแนะสำหรับการดำเนินการต่อไป (Recommendations and Next Steps)

จากผลการดำเนินงานและข้อจำกัดที่พบ คณะผู้จัดทำมีข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคต ดังนี้

- **ด้านฮาร์ดแวร์** : ควรพิจารณาใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลภายนอก (External ADC) ที่มีความแม่นยำสูงกว่า เพื่อแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของ ADC ภายใน ESP32 และเพิ่มความแม่นยำของการวัดในช่วงแรงดันกว้าง นอกจากนี้ควรออกแบบวงจรกรองสัญญาณ (Filtering Circuit) เพิ่มเติมเพื่อลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมภาคสนาม
- **ด้านการสื่อสาร** : ควรออกแบบระบบจ่ายไฟสำรองสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร หรือพิจารณาใช้โปรโตคอลการสื่อสารที่เหมาะสมกับพื้นที่ห่างไกลมากขึ้น เช่น LoRa หรือ NB-IoT เพื่อลดการพึ่งพา Wi-Fi มาตรฐานและแก้ปัญหาการสูญหายของข้อมูล
- **ด้านซอฟต์แวร์** : ควรพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ (Automatic Alert System) เมื่อตรวจพบค่าพารามิเตอร์ที่ผิดปกติ เช่น แรงดันตกเกินเกณฑ์ หรืออุณหภูมิสูงเกินปกติ รวมถึงพัฒนาอัลกอริทึมการวิเคราะห์แนวโน้ม เพื่อยกระดับจากการติดตามสถานะไปสู่การทำนายความเสียหายล่วงหน้าได้อย่างแท้จริง

- ด้านขอบเขตการทดสอบ : ควรขยายการทดสอบไปยังระบบที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากขึ้น และทดสอบในพื้นที่ภาคสนามที่หลากหลาย เพื่อประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบในระดับอุตสาหกรรม

5.3 บทสรุป

โครงงานนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไร้สาย โดยสามารถบรรลุวัตถุประสงค์หลักทุกข้อที่ตั้งไว้ ได้แก่ การวัดพารามิเตอร์สำคัญอย่างต่อเนื่อง การส่งข้อมูลขึ้นคลาวด์แบบทันที และการแสดงผลผ่านแพลตฟอร์มที่เข้าถึงได้ง่าย ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาต่อยอดไปสู่ระบบบำรุงรักษาเชิงป้องกันในระดับอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีศักยภาพในอนาคต

บรรณนุกรม

Ehsanul Kabir, Pawan Kumar, Sandeep Kumar, Adedeji A. Adelodun, Ki-Hyun Kim . (2018). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Solar energy: Potential and future prospects*, 894-900.

Oguz Ozan Yolcan. (2023). Innovation and Green Development. *World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation*.

Osila Enabling Scienece. (ม.ป.ป.). *Measuring Solar Cells with a Source Measure Unit*. เข้าถึงได้จาก Osila Enabling Scienece : https://www.ossila.com/pages/measurement-of-a-solar-cell-with-a-source-measure-unit

Ossila. (ม.ป.ป.). *Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement*. เข้าถึงได้จาก Ossila Enabling Science: https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory