



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

ระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์
สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ

Solar tracking system for smart control of electric appliance

นางสาวอัจฉรา พาสูวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

ระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์
สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ
Solar tracking system for smart control of electric appliance

นางสาวอัจฉรา พาสุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา ระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยโซล่าเซลล์สำหรับการควบคุมอุปกรณ์
ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นางสาวอัจฉรา พาสวรรณ์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมการวัดและควบคุม

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ผศ.สุธรรม สัทธรรมสกุล

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายนฤชา ทวีพันธ์

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท โททอลลี เอ็นเนอร์ยี จำกัด

บทคัดย่อ

โครงการสหกิจนี้นำเสนอระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบในแนวตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเพื่อเป็นการลดจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการติดตั้งอีกด้วย ทั้งนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น พัดลม โทรศัพทมือถือ หลอดไฟ และแม้กระทั่งโซลินอยด์วาล์วเพื่อทำการ เปิด-ปิด สปริงเกอร์รดน้ำต้นไม้ และยังมีชาร์จไฟที่หลีกเลี่ยงการใช้งานกับโหลดอื่น ๆ ลงแบตเตอรี่เพื่อให้สามารถใช้ไฟฟ้าในเวลากลางคืนหรือใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการควบคุมระบบแบบอัตโนมัติผ่านสัญญาณไร้สาย (Wi-Fi) โดยการตั้งเวลาหรือใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นเพื่อเป็นตัวบ่งชี้ในการควบคุมสวิตซ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้อีกด้วย ทำให้สะดวกสบายต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, ระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

Cooperative Title: Solar tracking system for smart control of electric appliance

Student intern name: Miss Atchara Phasuwan

Faculty: Engineering **Department:** Instrumentation and Control Engineering

Advisor name: Asst.Prof. Sutham Satthamsakul

Mentor name: Mr. Narucha Taweepun

Company: Totally Energy Company Limited

ABSTRACT

This cooperative project presents a solar tracking for smart electric appliance control system. As the development of system of solar cells to power more effectively. The solar cell can produce power up when the sun hits vertically in a scene with the solar panels. In order to reduce the number of solar panels used in the installation. It also can be applied to electronic devices such as mobile phones, fans, lights and even the solenoid valves to open and close sprinkler irrigation. Also charging the remaining applications with loads more. The battery to be able to use electricity at night or in combination with solar cells. When the solar panel is not working to full efficiency. There is also an automatic control system through wireless signals (Wi-Fi) by scheduling or the use of sensors in measurement of temperature and humidity as an indicator in the control of electrical switches. Make it comfortable to use in daily life.

Keyword : Solar cell, Solar Tracking

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท โททอลลี เอ็นเนอร์ยี จำกัด ในเรื่องของการตกลงเข้าร่วมโครงการสหกิจศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อสร้างโอกาสที่ดีให้กับนักศึกษาในโครงการสหกิจศึกษาในเรื่องของการเรียนรู้ และฝึกการทำงานจากการทำงานจริง ขอขอบพระคุณบุคลากรในบริษัท โททอลลี เอ็นเนอร์ยี จำกัด อาทิ คุณนฤชา ทวีพันธ์ ที่ได้ให้โอกาสนักศึกษาได้เข้ามาสร้างประสบการณ์การทำงานจริง คุณวัชรินทร์ พันธุ์เลิศ และคุณพรพิมล ทวีพันธ์ ที่คอยให้คำแนะนำและถ่ายทอดวิชาความรู้รวมถึงประสบการณ์ในการทำงานใหม่ให้อยู่เสมอ ๆ ซึ่งเป็นสิ่งทีนอกเหนือจากการศึกษาในห้องเรียนหรือจากในหนังสือเล่มใด

ทั้งนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในโครงการสหกิจศึกษา อาทิ ผศ.สุธรรม สัทธิธรรมสกุล ผศ.ดร.นรินทร์ ธรรมรักษ์วัฒน์ และ รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตน์นะ ที่เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้เรียนรู้การทำงานจากการทำงานจริง รวมถึงคอยให้คำปรึกษาในปัญหาต่าง ๆ ที่ได้พบเจอในการทำงานตลอดจนโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

อัจฉรา พาสูวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์.....	4
2.2 การผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.3 การใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.4 ความรู้เกี่ยวกับรังสีอาทิตย์.....	7
2.5 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.5.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.5.2 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.5.3 ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.6 ลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.6.1 ลักษณะของแผงเซลล์ชนิดผลึกซิลิกอน.....	16
2.6.2 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง.....	18
2.6.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
2.7 ลักษณะอินเวอร์เตอร์.....	28
2.7.1 สัญลักษณ์และหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	28
2.7.2 ลักษณะและสมบัติของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมระบบจำหน่าย.....	32
2.8 ลักษณะของแบตเตอรี่.....	36
2.9 การทำงานของแบตเตอรี่.....	37
2.9.1 การทำปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในแบตเตอรี่.....	39
2.9.2 สมรรถภาพของแบตเตอรี่และคำจำกัดความ.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 เครื่องควบคุมประจุไฟฟ้า.....	42
2.11 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	52
3.1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	52
3.2 การออกแบบระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	53
3.3 ออกแบบระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	54
3.4 ออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์และการวางระบบสายไฟภายในตู้ควบคุม	55
3.5 ออกแบบการติดตั้งระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ	58
3.6 ติดตั้งระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์สำหรับ ระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ	58
3.7 ทดสอบการทำงานของระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ	59
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	60
4.1 ผลการทดสอบ.....	60
4.2.1 การทดสอบการใช้งานระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตามดวงอาทิตย์.....	60
4.2.2 การทดสอบการทำงานของระบบอัจฉริยะผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน	61
บทที่ 5 สรุปข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผล	62
5.2 ปัญหาและวิธีการแก้ไขปัญหา.....	62
5.2.1 ปัญหาที่พบ.....	62
5.2.2 วิธีการแก้ไขปัญหา.....	62
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม	64
ประวัติผู้เขียน	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน.....	2
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีไอต์กับค่าเอสไอซี	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในแบบต่าง ๆ.....	4
2.2 การเกิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.3 องค์ประกอบระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.4 การใช้ประโยชน์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.5 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย จัดทำในปี พ.ศ. 2542	8
2.6 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....	10
2.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....	10
2.8 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.9 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ และโครงสร้างภายใน	12
2.10 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (IV-curve).....	13
2.11 ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร	14
2.12 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและแรงดัน	15
2.13 ผลของความต้านทานชั้นที่ต่อลักษณะกระแสและแรงดัน	15
2.14 ลักษณะทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาประกอบเป็นแผงเซลล์.....	15
2.15 การต่อเซลล์แบบต่าง ๆ	16
2.16 วัสดุประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก	17
2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน (a-Si).....	18
2.18 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอ่อนตัว	19
2.19 สัญลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
2.20 กราฟกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (IV curve).....	20
2.21 ไดอะแกรมการทดสอบวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	20
2.22 แบบจำลองคุณลักษณะทางสถิติของเซลล์แสงอาทิตย์	21
2.23 กราฟกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิและความเข้มแสงค่าต่าง ๆ	22
2.24 ลักษณะของผิวหน้าของเซลล์ซึ่งผ่านการทำ surface texturing	23
2.25 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อไม่มีเงาบังที่เซลล์	24
2.26 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีเงาบังที่เซลล์	24
2.27 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีเงาบังที่เซลล์แต่มีบายพาสไดโอด	24
2.28 การเปรียบเทียบ IV curve ที่มีและไม่มีบล็อกกิ้งไดโอดเมื่อมีการเกิดเงาบัง	25
2.29 กล่องรวมสายไฟฟ้าที่มีการติดตั้งบายพาสไดโอด	25
2.30 แผนภาพของระบบที่มีการติดตั้งบายพาสไดโอด.....	26
2.31 การเปรียบเทียบไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบที่มีและไม่มีบล็อกกิ้งไดโอด	27
2.32 ไดอะแกรมวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.33 การเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบจำหน่าย	29
2.34 หลักการของอินเวอร์เตอร์แบบ grid-controlled.....	30
2.35 หลักการของอินเวอร์เตอร์แบบ self-commutated inverter	31
2.36 ส่วนประกอบวงจรของอินเวอร์เตอร์ที่มีหม้อแปลงความถี่ต่ำ	32
2.37 ตัวอย่าง characteristic curve ของอินเวอร์เตอร์ชนิดต่าง ๆ	35
2.38 ความถี่และพลังงานที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดหนึ่งปีในประเทศเยอรมัน	35
2.39 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	36
2.40 ส่วนประกอบของเซลล์โวลตาอิก.....	37
2.41 เซลล์ไฟฟ้าพื้นฐาน.....	38
2.42 ตัวอย่างเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าที่มีทั่วไป.....	43
2.43 หลักการทำงานของเครื่องควบคุมประจุแบบอนุกรม	44
2.44 หลักการทำงานของเครื่องควบคุมประจุแบบขนาน.....	44
2.45 หลักการทำงานของเครื่องควบคุมการประจุแบบควบคุมกำลังสูงสุด.....	45
2.46 ประเภทของระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	46
2.47 ส่วนประกอบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
2.48 ไดอะแกรมระบบไฟฟ้ากระแสตรง.....	48
2.49 ไดอะแกรมระบบไฟฟ้ากระแสสลับ.....	48
2.50 ไดอะแกรมระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน	49
2.51 ส่วนประกอบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย.....	50
2.52 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งด้านบน (ชาย) และผนัง (ขวา) ของอาคาร	51
2.53 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกใช้แทนผนังอาคาร (ชาย) และหลังอาคาร (ขวา).....	51
2.54 โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผาบ่องที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน.....	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการตอบสนองความต้องการของมนุษย์ และเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิต ที่ทำให้โลกขับเคลื่อนไปข้างหน้าในทุก ๆ ด้าน ซึ่งพลังงานไฟฟ้าเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่มนุษย์รู้จักดี และนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ ได้ง่าย สามารถนำมาใช้งานได้สะดวก โดยทั่วไปการผลิตกระแสไฟฟ้าจะอาศัยทรัพยากรจากแหล่งกำเนิดพลังงานฟอสซิล (Fossil energy) ได้แก่ ปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป แต่ในปัจจุบันพบว่าสถานการณ์ของโลกกำลังเข้าสู่สภาวะวิกฤติ จากการคาดการณ์ของนักวิทยาศาสตร์ ประเมินว่าพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปจะมีการผลิตลดลงในอนาคต ในขณะที่ความต้องการพลังงานของมนุษย์กลับมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นมนุษย์จึงให้ความสนใจในการพัฒนาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อมาใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิลที่นับวันยิ่งจะหมดไป พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานต้นกำเนิดของชีวิตบนโลกมนุษย์ พืชและจุลินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้เป็นต้นตอของระบบห่วงโซ่อาหาร และนับว่าเป็นพลังงานที่ไม่มีทางหมดไป เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ ที่จะส่งผลให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศใกล้เส้นศูนย์สูตรและได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีเป็นปริมาณมากและมีสภาพอากาศที่ค่อนข้างคงตัว ไม่เปลี่ยนแปลงง่าย ปัญหาความไม่แน่นอนของผลผลิตพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีไม่มากนัก เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง พลังงานแสงอาทิตย์ไม่จำเป็นต้องอาศัยการขนส่งเชื้อเพลิง หรือการส่งกำลังไฟฟ้า เพราะเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้โดยหน่วยผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก ในการทำความร้อนและความเย็นการใช้แสงแดดโดยตรงจะช่วยขจัดปัญหาเรื่องการขนส่งเชื้อเพลิง และการส่งกำลังไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล ๆ ข้อได้เปรียบนี้สามารถนำมาหักลบกับค่าใช้จ่ายที่สูงเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

เนื่องด้วยสภาพแวดล้อม และสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบันของประเทศไทย ทำให้การเลือกใช้พลังงานทดแทนเป็นช่องทางที่น่าสนใจ เพราะนอกจากจะช่วยลดปัญหาภาวะจากการใช้น้ำมัน หรือใช้พลังงานไฟฟ้ามากเกินไป การเลือกใช้พลังงานทดแทนยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในระยะยาว พลังงานทดแทนที่นำมาใช้กับระบบไฟฟ้าเล็ก ๆ หรือภาคเกษตรกรรมได้ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)

ในยุคปัจจุบันนี้ คือยุคที่มีการใช้อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT: Internet of Things) หมายถึงการที่สิ่งต่าง ๆ ถูกเชื่อมโยงทุกสิ่งทุกอย่างมาสู่โลกอินเทอร์เน็ต ทำให้เราสามารถสั่งการหรือควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น การเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ จึงทำให้เกิดแนวคิดในการนำแอปพลิเคชันมาใช้ในการควบคุมหรือมอนิเตอร์การทำงานของปั๊มน้ำ สปริงเกอร์ สปอตไลท์ และน้ำพุ ซึ่ง

จะมีการนำเซ็นเซอร์มาใช้เป็นตัวตรวจวัดค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปเป็นตัวควบคุมในระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ และสามารถแสดงค่าในแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟนและอ่านค่าได้ทุก ๆ ที่ที่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อลดต้นทุนการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
2. ต้นทุนของระบบมีราคาต่ำ และบำรุงรักษาง่าย
3. สามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ผ่านสมาร์ตโฟนได้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ออกแบบตู้ควบคุมการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ไฮบริด และวาล์วน้ำ โดยมีการแสดงค่ามิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานมาให้ระบบได้หรือพลังงานที่จ่ายไปให้โหลดต่าง ๆ รวมถึงโครงสร้างติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์
2. ติดตั้งระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ เพื่อประยุกต์ระบบอัจฉริยะใช้กับปั้มน้ำไฮบริดและเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นเพื่อนำไปใช้งานที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
3. ทดสอบการทำงานของระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เพื่อประยุกต์ระบบอัจฉริยะใช้กับปั้มน้ำไฮบริดและเครื่องใช้ไฟฟ้า ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถจ่ายพลังงานให้ระบบได้ดีกว่าการติดตั้งแบบธรรมดาอย่างน้อยเพียงใด และสามารถใช้กับโหลดเพียงพหรือไม่

1.4 วิธีการดำเนินการโครงการ

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	เดือนที่ 1	เดือนที่ 2	เดือนที่ 3	เดือนที่ 4
ศึกษาโครงการ	←→			
ศึกษาการทำระบบปรับแผงโซลาร์เซลล์ตามดวงอาทิตย์	←→			
ดูสถานที่ติดตั้งและออกแบบการติดตั้ง	←→			
ออกแบบภาพกราฟฟิกของชิ้นงาน	←→			
ออกแบบวงจร	←→			
จัดทำตู้ควบคุม			←→	
ติดตั้งชิ้นงานที่หน้างาน			←→	
ตรวจสอบและทดสอบการใช้งาน				←→
แก้ไขและปรับปรุง				←→
จัดทำเอกสารและคู่มือการใช้งาน				←→
จัดทำรูปเล่มโครงการ			←→	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

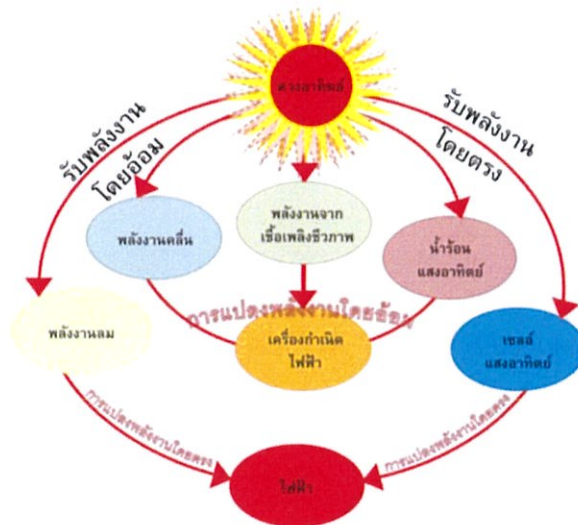
1. พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าการติดตั้งแบบยึดอยู่กับที่
2. สามารถควบคุมการทำงานของสปริงเกอร์ สปอร์ตไลท์ และน้ำพุ ผ่านสมาร์ทโฟนได้
3. สามารถนำเซ็นเซอร์มาประยุกต์ใช้ควบคุมการทำงานของสปริงเกอร์ สปอร์ตไลท์ และน้ำพุได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับโครงการสหกิจ ซึ่งประกอบไปด้วย การผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ การใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ ความรู้เกี่ยวกับรังสีอาทิตย์ ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะอินเวอร์เตอร์ ลักษณะของแบตเตอรี่ การทำงานของแบตเตอรี่ เครื่องควบคุมประจุไฟฟ้า และระบบเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

ไฟฟ้าที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า กระแสตรงเพียงขั้นตอนเดียว พลังงานไฟฟ้าที่ได้ดังกล่าวสามารถใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกับไฟฟ้าจากแหล่งผลิตแบบอื่น ๆ ซึ่งใช้ได้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในรถยนต์ และใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่เรียกว่าอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานทดแทนอื่น ๆ อาทิ พลังงานความร้อน พลังงานลม และพลังงานคลื่นในมหาสมุทร ก็ล้วนแต่มีแสงจากดวงอาทิตย์เป็นพลังงานต้นกำเนิดทั้งสิ้น

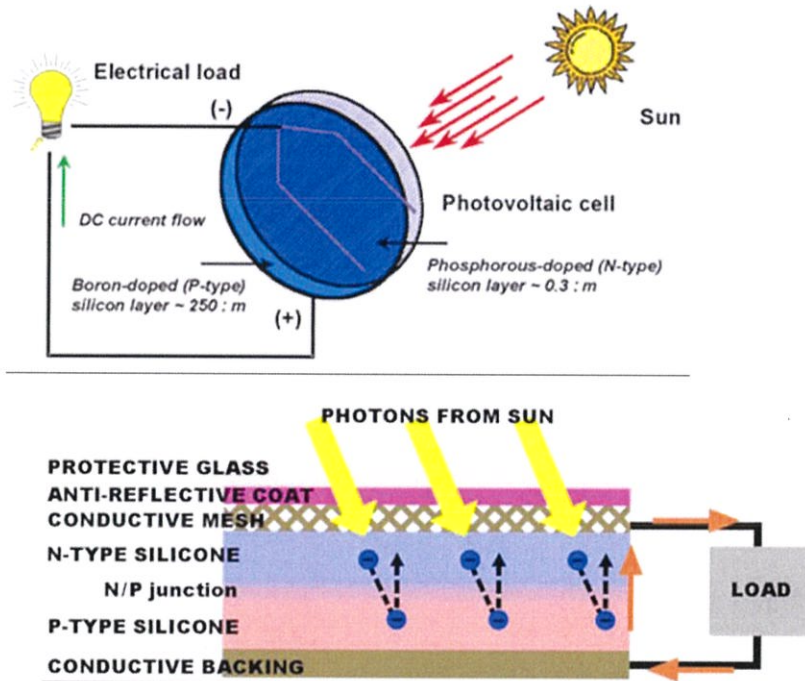


รูปที่ 2.1 ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ

เนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะเวลากลางวัน จึงมีความจำเป็นต้องเก็บสำรองไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่เพื่อใช้ในเวลากลางคืน และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นตรงกับความเข้มของแสงอาทิตย์โดยตรง รวมถึงอุณหภูมิซึ่งจะเพิ่มขึ้นจากการตากแดด ทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง ดังนั้นการติดตั้งใช้งานจึงควรอยู่กลางแจ้งหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์และเว้นช่องว่าง เพื่อช่วยระบายความร้อนด้านหลัง (หากอยู่ในซีกโลกเหนือ เช่น ประเทศไทย ก็ต้องเอียงไปทางทิศใต้) หรือทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์จึงจะได้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากที่สุด

2.2 การผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง เมื่อแสงอาทิตย์กระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและความต่างศักย์ที่ผิวของทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างผิวทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างผิวทั้งสองด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นวิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงและง่ายที่สุด โดยไม่มีการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนใด ๆ ไม่มีการสึกหรอใด ๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2.2 ดังนั้นหากเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงสภาพสารกึ่งตัวนำและแสงอาทิตย์ตกกระทบสู่ผิวเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าออกมาให้ตลอดไป (ในทางปฏิบัติผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รับประกันอายุการใช้งานกว่า 20 ปีขึ้นไป)



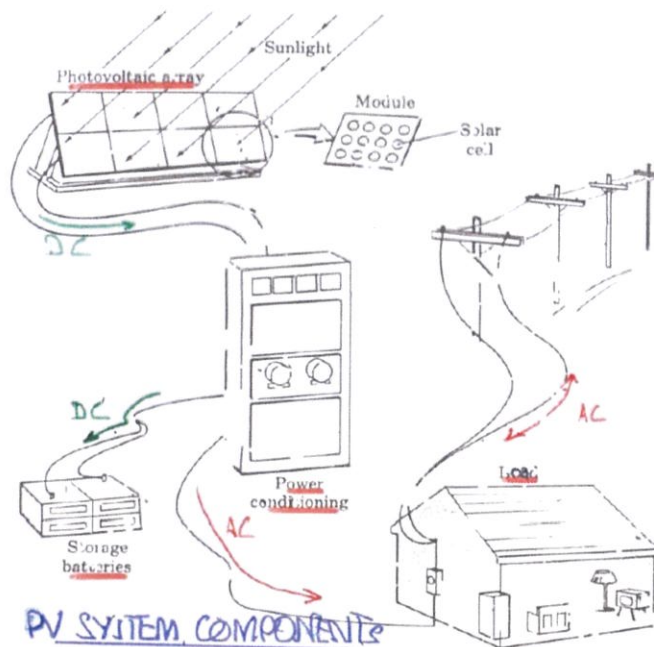
รูปที่ 2.2 การเกิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น หรือลดลง ตัวอย่างเช่น ถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ 100 วัตต์ เมื่อมีความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร หรือคิดเป็น 10% นั่นคือ ที่ความเข้มแสง 500 วัตต์/ตารางเมตร ก็จะผลิตไฟฟ้าได้ 50 วัตต์ เป็นต้น โดยทั่วไปประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ระหว่าง 7-19% ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์

กรณีระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ไม่จำเป็นต้องมีแบตเตอรี่สำหรับเก็บสำรองพลังงานไฟฟ้าอย่างกรณีของระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เพราะสามารถจ่ายไฟฟ้ากลับให้กับระบบจำหน่ายโดยตรง และมีข้อดีคือจะไปช่วยเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามากตามสำนักงาน โรงงาน ฯลฯ ประเทศไทยเริ่มนำระบบผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์กว่า 30 ปีแล้ว จนถึงปัจจุบันรวมได้มากกว่า 30 เมกะวัตต์ โดยกว่าร้อยละ

90 ใช้ในที่ชนบทห่างไกล ที่ยังไม่มีบริการของการไฟฟ้าจำหน่าย เพราะเป็นทางเลือกที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด สำหรับอนาคตอันใกล้จะเริ่มมีการนำมาใช้ในเขตที่มีไฟฟ้าให้บริการอยู่แล้ว ในลักษณะต่อเชื่อมเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้ ภาพรวมองค์ประกอบของระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.3

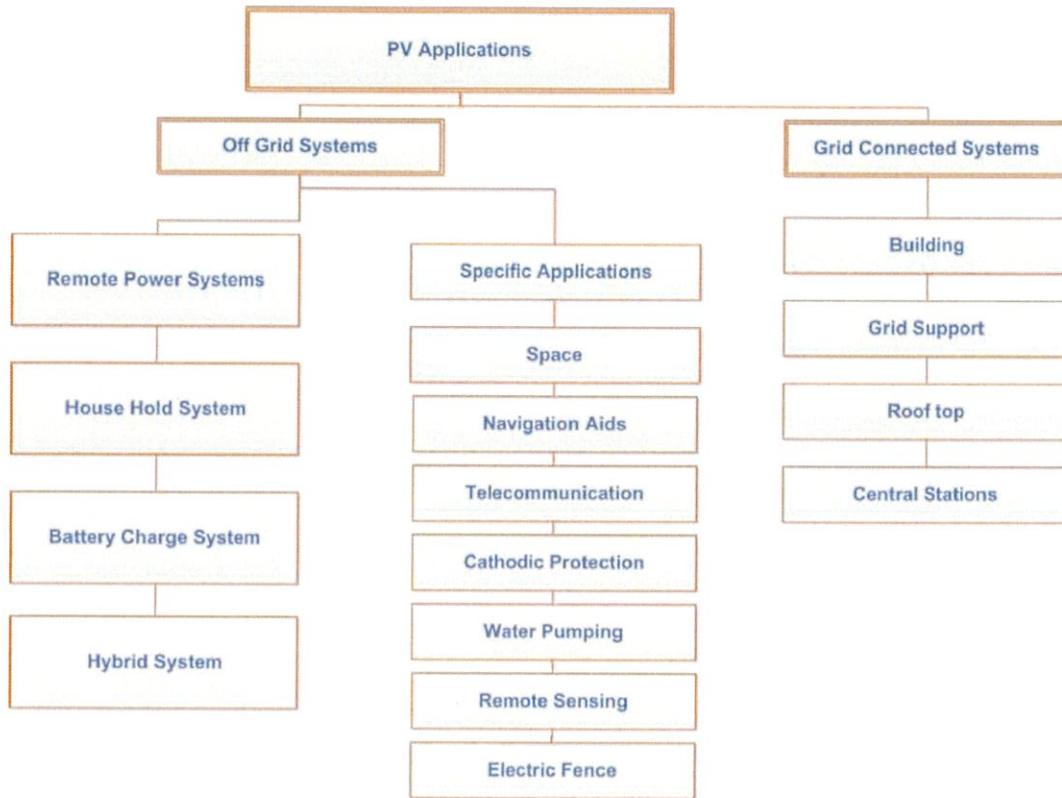
แนวโน้มราคาของระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลงมา ใกล้เคียงกับราคาไฟฟ้าที่ผลิตจากเชื้อเพลิงเผาไหม้เข้าไปทุกที ในขณะที่ราคาเชื้อเพลิงเผาไหม้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และสังคมเริ่มมีความกังวลเพิ่มมากขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบเรื่องคุณภาพของอากาศ น้ำ และสภาพแวดล้อมเป็นพิษ เนื่องจากการเผาไหม้ถ่านหิน ก๊าซ น้ำมัน ฯลฯ นอกจากนี้การจัดประเภทการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.4 สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย และระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

2.3 การใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในพื้นที่ห่างไกลซึ่งระบบจำหน่ายของการไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึง ระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม เนื่องจากราคาต่ำกว่า เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เบนซิน และดีเซล โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานทางด้านโทรคมนาคม ไฟสัญญาณ การช่วยเดินเรือ เดินฝ้ายาม แต่เนื่องจากเงินลงทุนสูงกว่าระบบไฟฟ้าแบบอื่น ๆ มาก การหาแหล่งเงินกู้ ดอกเบี้ยต่ำ ปลอดดอกเบี้ย ผ่อนนาน ฯลฯ เป็นอุปสรรคสำคัญ จึงต้องการความช่วยเหลือจากภาครัฐ ในระยะแรก ๆ เป็นหลัก ตัวอย่างเช่น โครงการไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับหมู่บ้านห่างไกลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งรวมกำลังการผลิตสูงถึง 2 เมกะวัตต์



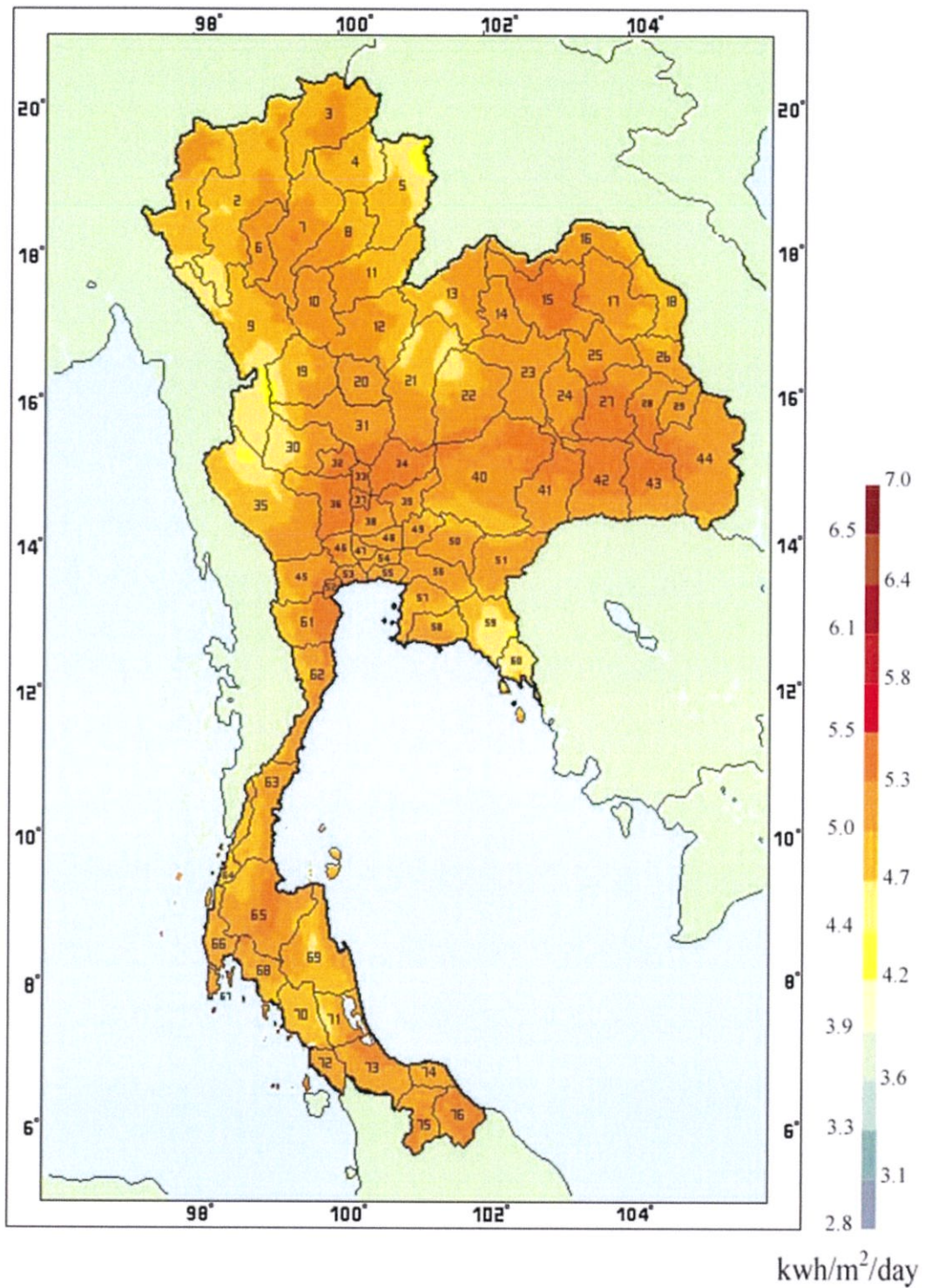
รูปที่ 2.4 การใช้ประโยชน์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

2.4 ความรู้เกี่ยวกับรังสีอาทิตย์

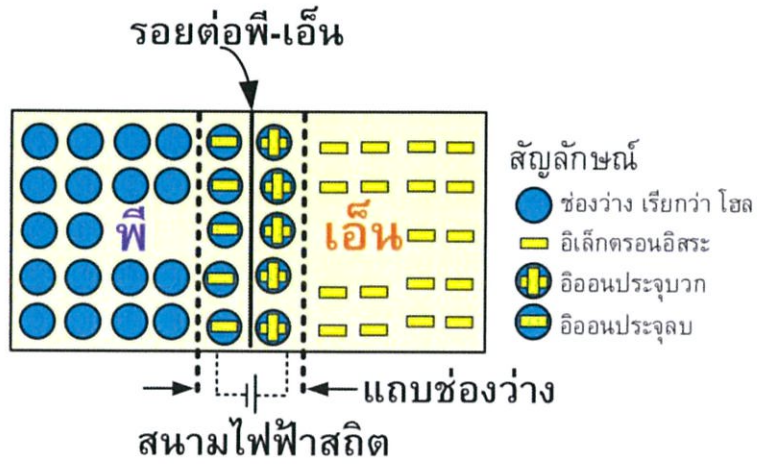
รังสีอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถทราบค่าในรูปความเข้มรังสีอาทิตย์หน่วยเป็นวัตต์/ตารางเมตร และพลังงานแสงอาทิตย์หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน ขึ้นกับวันที่และเวลา รวมถึงตำแหน่งบนพื้นโลก รังสีอาทิตย์ประกอบด้วย สเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 0.3 ถึง 3 ไมโครเมตร เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดสามารถตอบสนองต่อ สเปกตรัมได้แตกต่างกัน ดังนั้นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่างกันในการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ การใช้งาน และบำรุงรักษาระบบมีความจำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ในพื้นที่นั้น และลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้งาน ปริมาณรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยโดยทั่วไปศักยภาพ พลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำ ขึ้นอยู่กับรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในพื้นที่นั้นการศึกษา เพื่อทราบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นโลก จะใช้เป็นแนวทางในการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากพลังงาน แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำเสนอในรูปแบบที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับประเทศไทยมีแผนที่ศักยภาพ พลังงานแสงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน) จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2542 โดยมหาวิทยาลัยศิลปากร รูปที่ 2.5 แสดงศักยภาพแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีในแต่ละ เดือนนั้น การกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์ตามบริเวณต่าง ๆ ของประเทศไทยได้รับอิทธิพลสำคัญจาก ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีอาทิตย์ สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.54 ถึง 6.65 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน

2.5 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

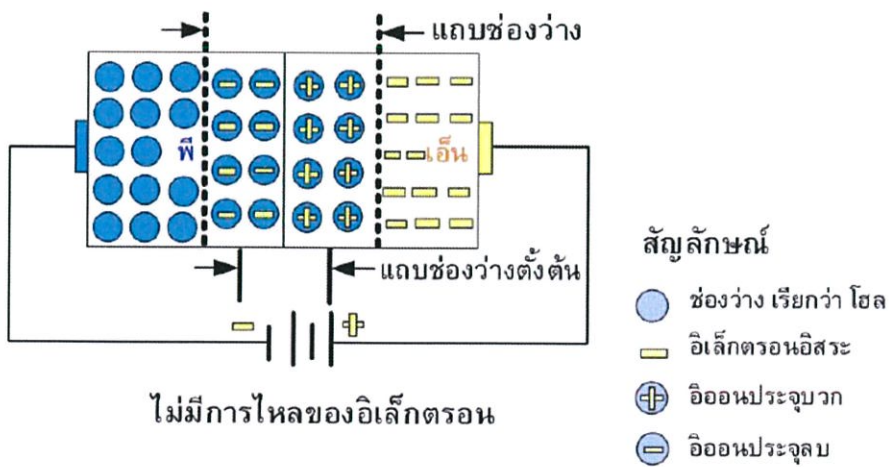
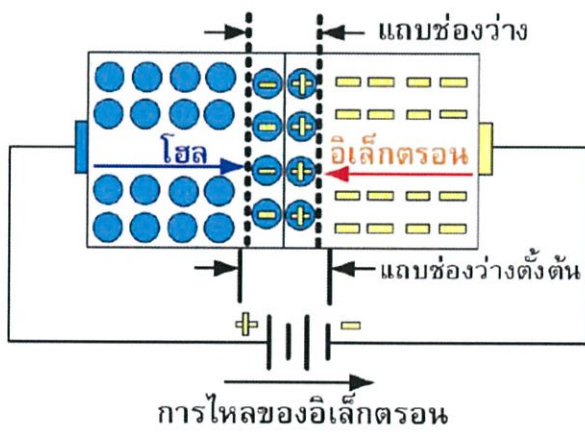
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยอาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแตกต่างกัน เมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ โครงสร้างที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนไดโอดทั่วไป ประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้น ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นชั้นบน และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นชั้นล่าง สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานในลักษณะนี้ส่วนมากเป็นซิลิกอน และเพื่อให้เข้าใจง่ายโดยส่วนใหญ่จะใช้การอธิบายสารกึ่งตัวนำที่ทำจากซิลิกอน แม้ว่าปัจจุบันจะมีสารกึ่งตัวนำที่ทำจากวัสดุชนิดอื่นก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพี ผลิตจากผลึกของซิลิกอนผ่านการเติมสารเจือปนคือ โบรอน เพื่อทำให้เป็นวัสดุขาดิเล็กตรอนอิสระ การขาดิเล็กตรอนจะทำให้เกิดช่องว่างที่เรียกว่า โฮล (Hole) และการขาดิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบ ทำให้ส่วนนี้เปรียบเสมือนอนุภาคประจุบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นผ่านการเจือปน คือ ฟอสฟอรัส เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนส่วนเกิน ซึ่งจุดเชื่อมต่อเรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติต่างกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electrical field) ในบริเวณรอยต่อ โดยสนามไฟฟ้านี้มีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าสถิตย์อันจะทำให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และอนุภาคของประจุบวกที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตรงกันข้าม ตัวอย่างเช่น การใช้หวีแปรงกับเส้นขนสัตว์ เป็นต้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิดเอ็นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 2.7 เมื่อต่อเข้ากับวงจรภายนอกก็จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกของอิเล็กตรอนในกรณีของสารกึ่งตัวนำโดยผ่านวัสดุตัวนำที่ติดอยู่กับผิวด้านหน้าของเซลล์ ในเวลาเดียวกันนั้นโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามผ่านเนื้อเซลล์จนถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งที่ยึดติดอยู่กับด้านล่างของเซลล์ ทำให้ครบวงจรโดยร่วมกับอิเล็กตรอนที่อยู่อีกด้านหนึ่งของวงจรภายนอก แต่ในทางตรงกันข้าม การไหลของอิเล็กตรอนจะไม่เกิดหากไม่สามารถทำให้ครบวงจร กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องอาศัยทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการไหลของอิเล็กตรอน และแรงดันไฟฟ้าเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวจะออกแบบให้มีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.5 โวลต์ที่กระแสไฟฟ้าประมาณ 2.5 แอมป์ ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 1.25 วัตต์ (ขึ้นอยู่กับรายละเอียดการออกแบบ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่น ๆ อาจจะมีแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสูงหรือต่ำกว่านี้) กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องอาศัยทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการไหลของอิเล็กตรอน และแรงดันไฟฟ้าเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวจะออกแบบให้มีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.5 โวลต์ที่กระแสไฟฟ้าประมาณ 2.5 แอมป์ ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 1.25 วัตต์ (ขึ้นอยู่กับรายละเอียดการออกแบบ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่น ๆ อาจจะมีแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสูงหรือต่ำกว่านี้)



รูปที่ 2.5 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย จัดทำในปี พ.ศ. 2542
(หน่วย : กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

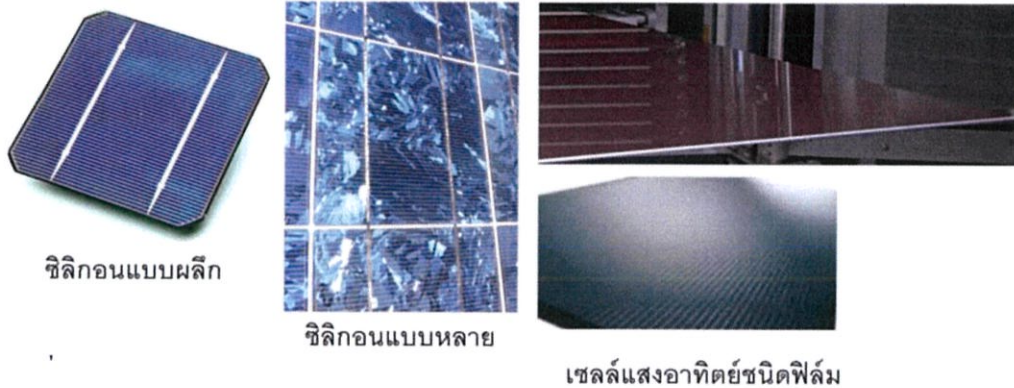


รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

2.5.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดต้นทุนด้านวัสดุของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทำให้ราคาเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีการแบ่งประเภทของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ตามการผลิตแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar Cells) มีความแตกต่างกันตามชนิดของสารกึ่งตัวนำตั้งต้น เช่น ซิลิกอน (Si) และแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิกอนมีวิธีการผลิตหลายวิธี จึงมีให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสมขึ้นกับราคาและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ได้แก่ แบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon cells) แบบแผ่นฟิล์มบาง (Silicon ribbon cells) แบบหลายผลึก (Polycrystalline silicon cells) แบบแผ่นบางหลายผลึก (Polycrystalline thin film silicon cells) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ได้รับการยอมรับในเชิงพาณิชย์และมีประสิทธิภาพ 10-15 เปอร์เซ็นต์ แต่ต้นทุนของวัสดุค่อนข้างสูง
- 2) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cells) ประกอบด้วยเซลล์ที่ผลิตจากอะมอร์ฟัสซิลิกอน (a-Si) เซลล์ที่ผลิตจากแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และเซลล์ที่ผลิตจากคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลเนียม (CIGS) มีการใช้งานในเชิงพาณิชย์และประสิทธิภาพที่ 6-10 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะน้อยกว่าเซลล์ชนิดผลึก แต่ก็มีข้อดีคือราคาถูกกว่า ส่วนการติดตั้งใช้งานในสภาวะจริงอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์ในระยะยาวยังอยู่ระหว่างวิจัย
- 3) กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมา คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาจากชนิดผลึกและชนิดฟิล์มบางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสร้างมลพิษและเพิ่มอายุการใช้งาน โดยแบ่งตามการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ ทรงกลม (Spherical Micro Solar Cells) ดายเซนซิไทซ์ (Dye-sensitized Solar Cells) และควอนตัมดอต (Quantum Dot Solar Cells) ดังรูปที่ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ทรงกลมจะสามารถรับแสงได้สามมิติ จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสง และมีน้ำหนักเบา กว่าแบบแผ่นราบ เมื่อประกอบเป็นแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ จึงสามารถลดต้นทุนลงได้ มีการใช้งานในเชิงพาณิชย์แต่ยังไม่แพร่หลาย ดายเซนซิไทซ์มีจุดเด่นคือมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการออกแบบเซลล์ใช้แนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช กล่าวคือ การเคลือบผิววัสดุกึ่งตัวนำด้วยไทเทเนียมออกไซด์ ให้คล้ายกับโครโรฟิลล์ในกระบวนการสังเคราะห์ของพืช ปัจจุบันมีผลผลิตขายในเชิงพาณิชย์ และมีประสิทธิภาพ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ควอนตัมดอตถูกพัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนผลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโฟตอนให้มีค่ามากที่สุด เป็นการพัฒนาจากข้อจำกัดของเซลล์ชนิดผลึก โดยการเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุสารกึ่งตัวนำจาก 31-33 เปอร์เซ็นต์ เป็น 66 เปอร์เซ็นต์ และยังไม่มีการใช้งานเชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ และโครงสร้างภายใน

2.5.2 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

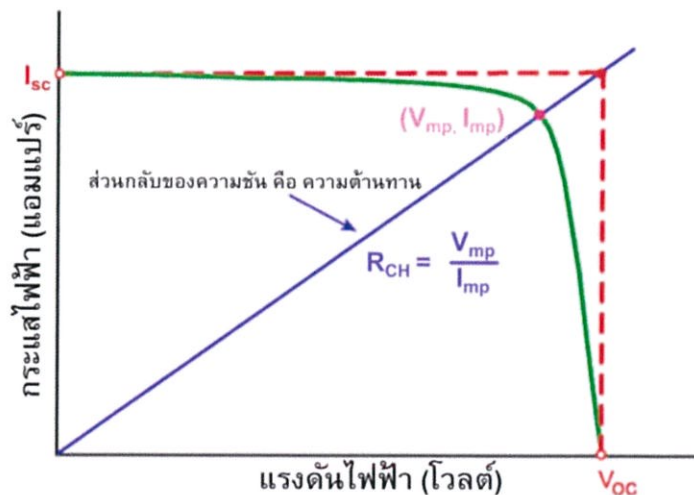
โดยทั่วไปสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า เริ่มต้นที่วงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงรูป 2.10 เป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) และความต้านทานชั้นที่ และการต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม ตามลำดับ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1 นั่นคือ ผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดมาจากแหล่งพลังงานแสงที่กลับด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและความต้านทานชั้นที่ ขณะที่กระแสไหลผ่านจะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น สมการที่ 2.2 แสดงแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขาออกบวกด้วยผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานอนุกรม

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

$$V_j = V + IR_S \quad (2.2)$$

โดยที่	I	กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_L	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_D	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_{SH}	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานชั้นพี มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	V	แรงดันไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นโวลต์
	I	กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	R_S	ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็นโอห์ม

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และฟิลต์แฟกเตอร์ (FF) รูปที่ 2.10 แสดงกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจร คือ กระแสไฟฟ้าขณะแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์เป็นค่ากระแสสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีกระแสเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ส่วนฟิลต์แฟกเตอร์เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันกับกระแสที่จุดทำงานสูงสุดและผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันเปิดวงจร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดสูงสุดต่อกระแสที่จุดสูงสุด หรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันเปิดวงจรต่อกระแสลัดวงจร



รูปที่ 2.10 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (IV-curve)

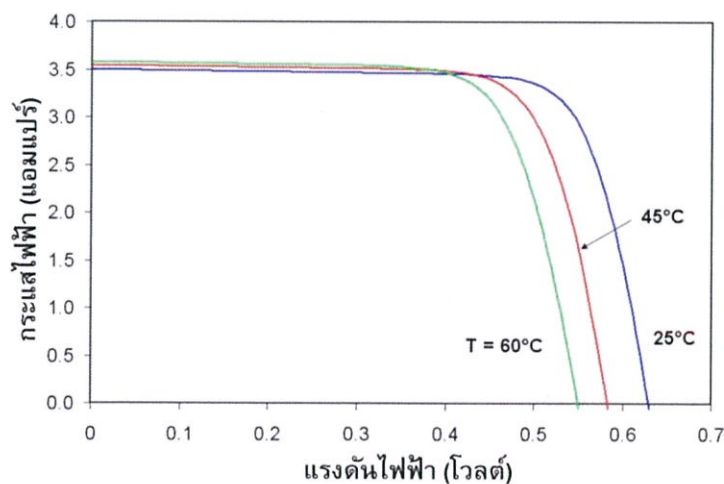
2.5.3 ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ความต้านทานชั้นันท์ และความต้านทานอนุกรม เป็นต้น โดยที่ประสิทธิภาพลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11 นั่นคือ สภาวะที่อุณหภูมิสูงระยะห่างของแถบพลังงานจะลดลง เป็นผลให้แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลงแต่ไม่ทำให้กระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงนัก ทั้งนี้กระแสลัดวงจรหรือกระแสสูงสุดจะลดลงเมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าน้อย เช่น ในวันที่ท้องฟ้ามีครึ้มมีเมฆบดบัง การบังเงาเนื่องจากต้นไม้ เป็นต้น

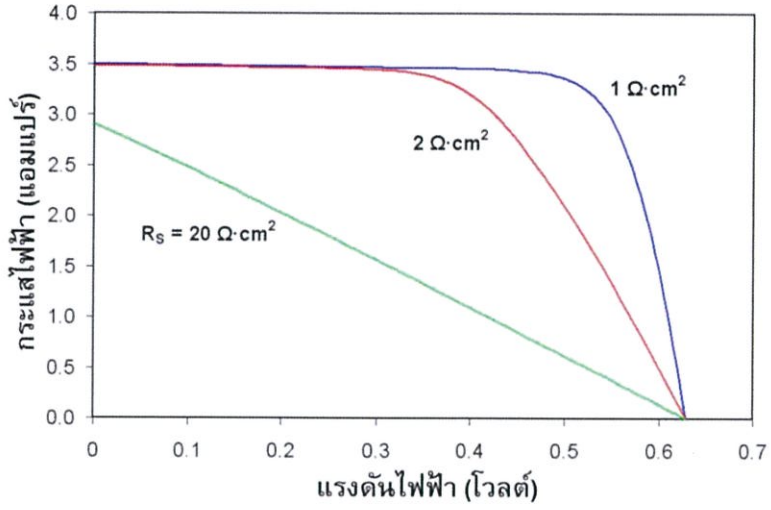
ความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันขาออกมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลต่อค่าแรงดันเปิดวงจรหรืออาจจะกล่าวได้ว่า ความต้านทานอนุกรมทำให้ค่าฟิลต์แฟกเตอร์ลดลง หากค่านี้มีมาก ๆ จะทำให้กระแสลัดวงจรลดลงและ IV-curve เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.12 ค่าความต้านทานชั้นันท์ ลดลงมากจะส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงดังรูปที่ 2.13 และค่าฟิลต์แฟกเตอร์ลดลงส่งผลเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานอนุกรม

2.6 ลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

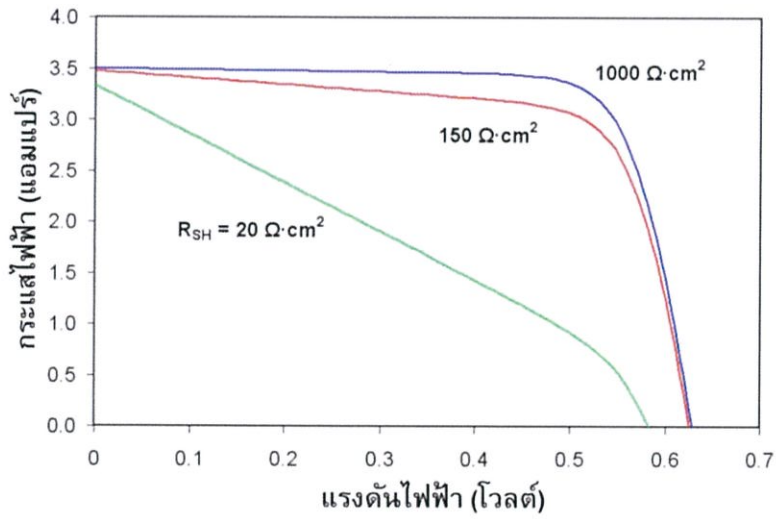
เซลล์แสงอาทิตย์นำไปใช้งานในรูปแบบของแผงเซลล์ (Module) การเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำได้โดยนำแผงเซลล์มาเชื่อมต่อกันในรูปแบบของสตริง (String) หรือ อาร์เรย์ (Array) รูปที่ 2.14 แสดงถึงลักษณะทั่วไปของการเชื่อมต่อของเซลล์ชนิดผลึก กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกดึงไปที่ตัวนำไฟฟ้าด้านหน้าและหลังของเซลล์ โดยตัวย่นำมีตัวย่นำเรียกว่า ฟิงเกอร์ (Fingers) ทำหน้าที่นำกระแสส่งไปยังบัสบาร์ (Busbar) และไหลผ่านไปยังเซลล์ที่เชื่อมถึงกัน ฟิงเกอร์และบัสบาร์จะต้องบังเซลล์น้อยที่สุดและรับกระแสไฟฟ้าได้สูง เพื่อให้เซลล์รับแสงได้มากที่สุด และด้านรับแสงของเซลล์จะต้องเคลือบสารลดการสะท้อนแสง ส่วนของกล่องการต่อสายไฟ และบายพาสไดโอด ทำหน้าที่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างเซลล์และป้องกันการเกิดโหนดที่ตัวเซลล์ ลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์จะเปลี่ยนแปลงตามแสงแดดและอุณหภูมิ ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับเซลล์จะแตกต่างกันที่ขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้า



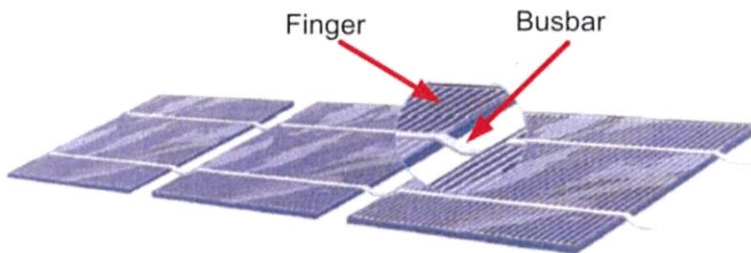
รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร



รูปที่ 2.12 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและแรงดัน



รูปที่ 2.13 ผลของความต้านทานชั้นที่ต่อลักษณะกระแสและแรงดัน

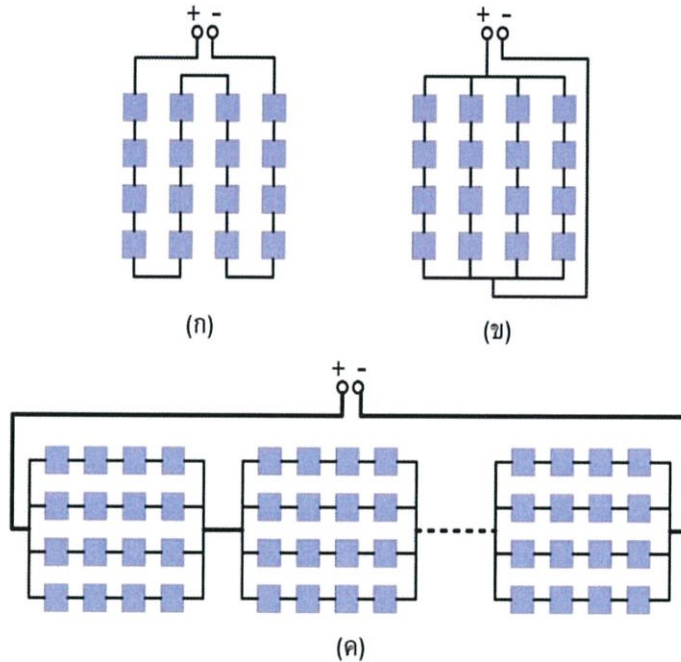


รูปที่ 2.14 ลักษณะทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาประกอบเป็นแผงเซลล์

2.6.1 ลักษณะของแผงเซลล์ชนิดผลึกซิลิกอน

รูปแบบการเชื่อมต่อเซลล์เพื่อทำเป็นแผงเซลล์มีอยู่ 3 แบบ คือ

- 1) แบบอนุกรม คือ นำแต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมเป็น 1 แถว หรือ 1 สตริงใน 1 แผง ดังรูปที่ 2.15 (ก) เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หากแต่ละเซลล์มีแรงดันวงจรถัด (V_{OC}) ประมาณ 0.3 โวลต์เท่ากันทุกเซลล์และกระแสเท่ากัน แผงเซลล์จะมีแรงดัน V_{OC} เท่ากับจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมคูณกับแรงดัน V_{OC} ของเซลล์ กรณีนี้เท่ากับ 9.6 โวลต์ ส่วนกระแสที่ไหลผ่านจะไหลเท่ากับกระแสของหนึ่งเซลล์เท่านั้น

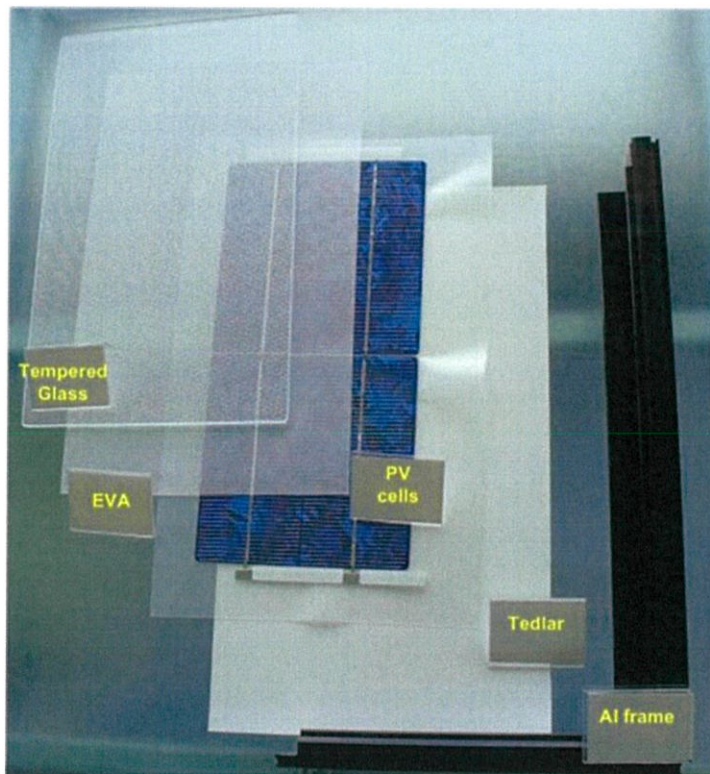


รูปที่ 2.15 การต่อเซลล์แบบต่างๆ (ก) แบบอนุกรม (ข) แบบอนุกรม-ขนาน และ (ค) แบบอนุกรม-ขนาน-อนุกรม

- 2) แบบอนุกรม-ขนาน คือการนำแต่ละสตริงที่เซลล์ต่ออนุกรม เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.15 (ข) แต่ละสตริงมีเซลล์ต่ออนุกรม 4 เซลล์ ซึ่งทำให้มีแรงดันที่แต่ละสตริงเท่ากับ 2.4 โวลต์ สมมติให้กระแสแต่ละสตริงเท่ากับ 5 แอมป์ จะทำให้กระแสที่ได้จากแผงนี้มีค่าเท่ากับผลรวมค่ากระแสที่ต่อขนานกัน ในที่นี้เท่ากับ 20 แอมป์
- 3) แบบอนุกรม-ขนาน-อนุกรม คือ การนำแต่ละกลุ่มที่เชื่อมต่อกันตามแบบที่ 2 มาต่ออนุกรมดังรูปที่ 2.15 (ค) เพื่อเพิ่มทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า

โดยส่วนใหญ่แล้วส่วนประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับชนิดผลึกซิลิกอนมี 4 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย วัสดุประกบหน้าผิวเซลล์ วัสดุสำหรับห่อหุ้มเซลล์ (encapsulant) วัสดุแผ่นหลัง (back sheet) และเฟรม ดังรูปที่ 2.16

- 1) **วัสดุประกบผิวหน้า** ทำหน้าที่กันน้ำ ใอน้ำ ฝุ่นละอองและสิ่งสกปรก รวมถึงแรงกระแทก คุณสมบัติของวัสดุ คือ แสงสามารถส่องผ่านได้ดี ป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และระบายความร้อนได้ดี โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้เป็นผิวหน้าจะเป็นกระจกชนิด tempered low-iron ซึ่งราคาไม่สูง
- 2) **วัสดุห่อหุ้มเซลล์** ช่วยในการจับยึดกันระหว่างวัสดุผิวหน้า ตัวเซลล์และวัสดุประกบแผ่นหลังของแผงเซลล์ ซึ่งต้องทนต่ออุณหภูมิสูงและรังสีอัลตราไวโอเล็ต รวมทั้งให้แสงอ่อนส่องผ่านและระบายความร้อนได้ดี โดยส่วนใหญ่จะใช้วัสดุจำพวกโพลีเมอร์ที่เรียกว่า EVA ย่อมาจาก Ethyl vinyl acetate
- 3) **วัสดุประกบแผ่นหลัง** ทำหน้าที่ป้องกัน และเป็นแผ่นหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องสามารถระบายความร้อนได้ดี และป้องกันน้ำและไอน้ำ โดยส่วนมากวัสดุที่นำมาใช้เป็นจำพวกโพลีเมอร์แผ่นบางที่มีชื่อว่า Tedlar
- 4) **เฟรม (frame)** ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของแผงเซลล์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผงเซลล์และเป็นส่วนป้องกันแรงกระแทกต่าง ๆ โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม

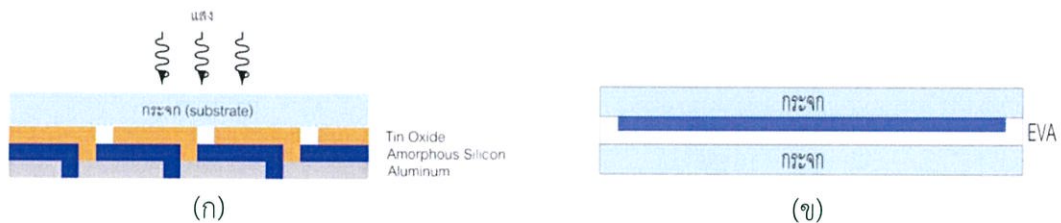


รูปที่ 2.16 วัสดุประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก

2.6.2 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

แผงเซลล์ชนิดฟิล์มบางแบ่งได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแข็ง และ แบบอ่อนตัว

- 1) แผงเซลล์แบบโครงสร้างแข็ง เซลล์ถูกสร้างลงบนกระจกโดยตรง จากนั้นทำการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า แล้วจึงนำไปลามิเนตด้วยวัสดุห่อหุ้มทั้งด้านหน้าและด้านหลัง รูปที่ 2.17 (ก) แสดงส่วนประกอบของเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน (a-Si) ซึ่งกระจกทำหน้าที่เป็นซับสเตรท เทคโนโลยีของเซลล์ที่ใช้กระบวนการผลิตแบบนี้คือ CdTe, a-Si, เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางสซิลิกอน แบบเซลล์ซ้อนระหว่างอะมอร์ฟัสซิลิกอน/อะมอร์ฟัสซิลิกอน หรือ อะมอร์ฟัสซิลิกอน/ไมโครคริสตัลไลน์ซิลิกอน หรือ เรียกว่า Tandem และ CIGS เป็นต้น รูปที่ 2.17 (ข) แสดงการประกอบแผงเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน (a-Si) แบบ Glass-Glass โดยที่ หุ้มเฉพาะด้านหลัง



รูปที่ 2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน (a-Si)

(ก) โครงสร้างเซลล์บนกระจก (ข) ส่วนประกอบของเซลล์แบบ Glass-Glass

- 2) แบบเซลล์แบบอ่อนตัว มีลักษณะของการเกาะติด (deposit) บนซับสเตรทที่อ่อนตัว ส่วนการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าขึ้นกับชนิดของซับสเตรท ถ้าวัสดุจำพวกฉนวนไฟฟ้า เช่น โพลีเอสเตอร์ หรือ โพลีอิมายด์ สามารถใช้วิธีเดียวกับซับสเตรทที่เป็นกระจก แต่วัสดุจำพวกตัวนำไฟฟ้าต้องใช้วิธีอื่น จากนั้นก็จะถูกนำไปลามิเนตด้วยวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีสีและยอมให้แสงผ่านได้ เช่น ETEE หรือ FEP

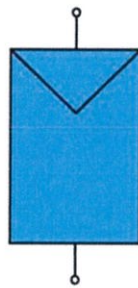
นอกจากนี้ การแบ่งแผงเซลล์สามารถแบ่งตามลักษณะการประกอบหรือวัสดุประกอบแผงเซลล์ เช่น

- วัสดุประกอบแผง เช่น แผงเทฟลอน แผง PVB และแผงเรซิน เป็นต้น
- เทคโนโลยีการประกอบแผง เช่น การลามิเนต เป็นต้น
- วัสดุซับสเตรท เช่น ฟิล์มบาง กระจกกับเทดลาร์ โลหะกับฟิล์ม อะคริลิกพลาสติก และกระจกกับกระจก เป็นต้น
- โครงสร้างเฟรม ได้แก่ แบบมีเฟรม และแบบไร้เฟรม
- การเพิ่มโครงสร้างพิเศษ เช่น toughened safety glass (TSG) กระจกนิรภัยหลายชั้น (laminated safety glass, LSG) และกระจกฉนวน (insulating glass) เป็นต้น



รูปที่ 2.18 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอ่อนตัว

การใช้สัญลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ดังรูปที่ 2.19 กำหนดเป็นตัวเซลล์หรือ แผงเซลล์ หรือระบบแผงเซลล์ทั้งสตริงหรืออาร์เรย์

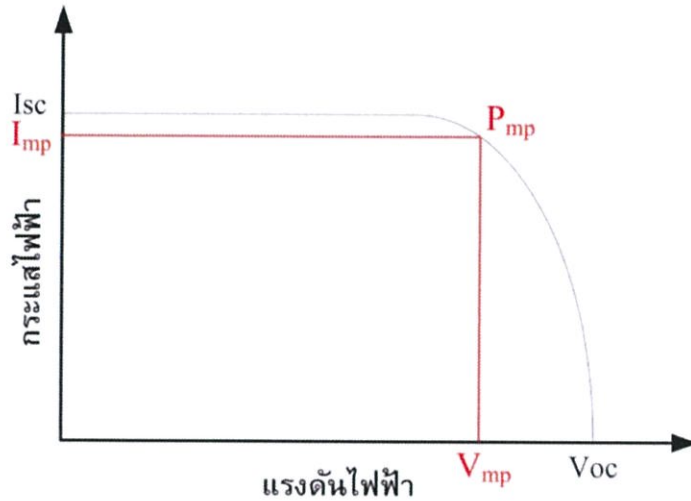


รูปที่ 2.19 สัญลักษณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์

2.6.3 สมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

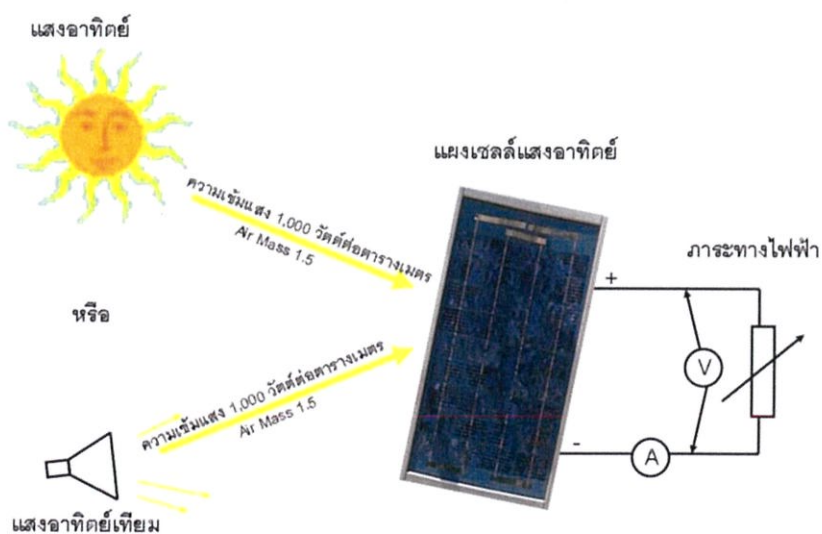
2.6.3.1 กระแสและแรงดันไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าเป็นกระแสตรง โดยที่แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นกับความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแผงเซลล์ รูปที่ 2.20 แสดงกราฟกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อต่อกับโหลดที่แปรค่าตั้งแต่สภาวะลัดวงจร (Short circuit) ถึงสภาวะเปิดวงจร (Open circuit) โดยตัดแกนตั้งที่แรงดันเป็นศูนย์ จะได้ค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจร (Short circuit) current: I_{SC} ส่วนจุดตัดแกนนอนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{OC}) เมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันก็จะได้กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งต้องเป็นค่าเดียวกันซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (Power at maximum point: P_{mp}) ส่วนกระแสกับแรงดันที่จุดนี้เรียกว่า กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at maximum power point: I_{mp}) กับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at maximum power point: V_{mp}) ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 กราฟกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (IV curve)

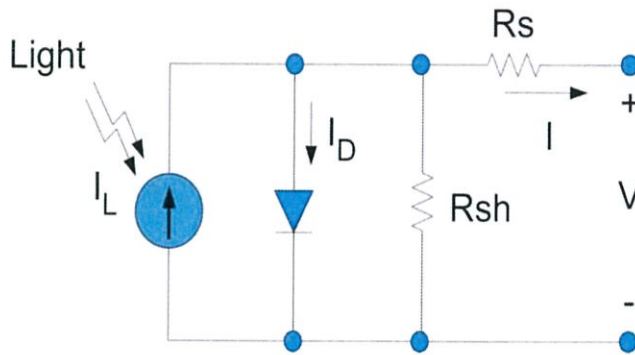
การระบุค่าสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ได้จากการทดสอบวัดกระแส และแรงดันไฟฟ้า (IV curve) โดยต่อโหลดที่สามารถแปรค่าได้ตั้งแต่สภาวะเปิดวงจรไปจนถึงสภาวะลัดวงจรเข้ากับแผงเซลล์ แล้วให้แสงกับแผงเซลล์ดังรูปที่ 2.21 โดยควบคุมสภาพแวดล้อมที่สภาวะมาตรฐาน (STD : Standard Test Condition) คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร สเปกตรัมของแสงที่ Air Mass (AM) 1.5 และอุณหภูมิด้านหลังแผงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การแสดงเครื่องหมายรับรองคุณภาพจากหน่วยงานต่าง ๆ และการอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรฐานหลักที่ใช้ในการรับรองคุณภาพคือ IEC 61215 สำหรับแผงเซลล์ชนิดผลึก IEC 61646 สำหรับชนิดฟิล์มบาง และยังมีมาตรฐานทางด้านความปลอดภัย เช่น IEC 61730 สำหรับแผงทั้งสองชนิด TÜV Safety Class II และ UL 1703 เป็นต้น



รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมการทดสอบวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า

2.6.3.2 วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแทนด้วยวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังรูปที่ 2.22 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อขนานกับไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) และความต้านทานขนาน (Rsh) แล้วจึงต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม (Rs) โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสจ่ายกระแสแบบคงที่ซึ่งแปรผันตามความเข้มแสง ความต้านทานอนุกรมเป็นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากจุดเชื่อมต่อ (wiring contact) ระหว่าง ตัวนำไฟฟ้ากับเซลล์ ส่วนความต้านทานขนานที่เกิดขึ้นเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าในลักษณะไบอัสย้อนกลับให้กับไดโอด ในทางอุดมคติไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับ ตรงกันข้ามกับความเป็นจริง ซึ่งจะมีกระแสไหลย้อนกลับในระดับต่ำ นั้นแสดงให้เห็นว่ามีเส้นทางที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ ดังนั้นจึงแทนด้วยความต้านทานขนาน ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความต้านทานอนุกรมที่มีค่าต่ำมาก สมการที่ 2.3 เป็นสมการทางสถิติของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีโซลิดสเตทฟิสิกส์ (Solid-state physics theory)



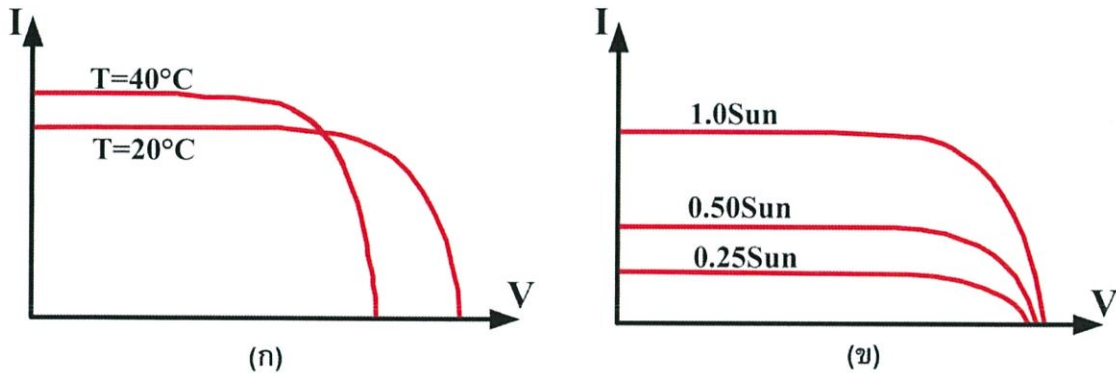
รูปที่ 2.22 แบบจำลองคุณลักษณะทางสถิติของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(V - IR_S)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_{SH}} \quad (2.3)$$

- โดยที่
- I_L คือ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการกระตุ้นจากแสง
 - I_0 คือ กระแสไหลย้อนกลับอิมิตัว
 - e คือ ประจุอิเล็กตรอน
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์
 - k คือ ค่าคงที่ Boltzmann
 - T คือ อุณหภูมิหน่วยเคลวิน (K)

2.6.3.3 ผลกระทบจากความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิ

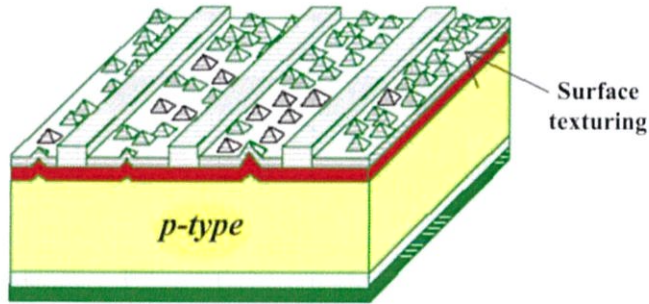
เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ จะได้กราฟ IV curve ที่ระดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยรูปที่ 2.23 (ก) จะเป็นกรณีที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์คงที่แต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง แต่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรกลับมีค่าสูงขึ้น แต่กรณีจากรูปที่ 2.23 (ข) เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิคงที่ จะทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น และแรงดันเปิดวงจรมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 2.23 กราฟกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิและความเข้มแสงค่าต่างๆ

2.6.3.4 ปัจจัยลดทอนกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การลดทอนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์มาจากสาเหตุหลัก ๆ 2 ประการ คือ ทางแสง (optical) และทางไฟฟ้า (electric) ปัจจัยที่มีผลต่อการรับแสง ได้แก่ การสะท้อน (reflection) การบังเงา (shadowing) และไม่รับรังสี (not absorbed radiation) ซึ่งการลดทอนการสะท้อนแสงนั้นทำได้โดยการเคลือบสารป้องกันการสะท้อน (antireflection coating) และการทำเซอร์เฟซเทคเจอร์ริง (surface texturing) ดังรูปที่ 2.24 ส่วนการบังเงา ให้พิจารณาทิศทางของแสงและเงาในการติดตั้งระบบ เพื่อป้องกันเงาบังแสงต่อแผงเซลล์ ส่วนปัจจัยที่มีผลทางไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โห้หม้มิก (ohmic losses) และการจับตัวของอะตอมสารกึ่งตัวนำ (recombination) ซึ่งการสูญเสียเป็นผลจากการออกแบบและกระบวนการการผลิตเซลล์โดยที่ โห้หม้มิกเป็นผลที่เกิดขึ้นจากตัววัสดุสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่หน้าสัมผัสของวัสดุ ได้แก่ รอยต่อระหว่างโลหะตัวนำกับสารกึ่งตัวนำ ส่วนการสูญเสียจากการจับตัวของอะตอมสารกึ่งตัวนำเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้นอิมิตเตอร์ (Emitter layer) ส่วนเบส และรอยต่อระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.24 ลักษณะของผิวหน้าของเซลล์ซึ่งผ่านการทำ surface texturing

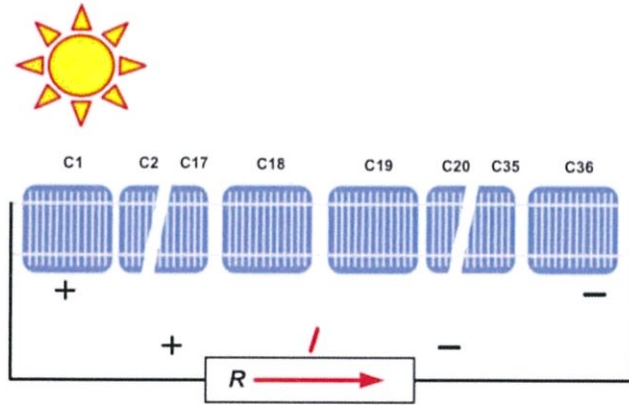
2.6.3.5 กล่องรวมสาย, บายพาสไดโอด และบล็อกกิ้งไดโอด

การต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจะมีค่าแรงดันวงจรเปิดหรือค่าความต่างศักย์แต่ละเซลล์ประมาณ 0.6 โวลต์ และสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิกอนประมาณ 0.6-0.9 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้า (ขึ้นอยู่กับพื้นที่เซลล์) หลังการต่อเซลล์เป็นแผงเซลล์จะรวมสายไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยจะแยกเป็นขั้วบวกและขั้วลบไปยังกล่องรวมสายเรียกว่า Junction Box เพื่อนำไฟฟ้าไปใช้งานต่อ

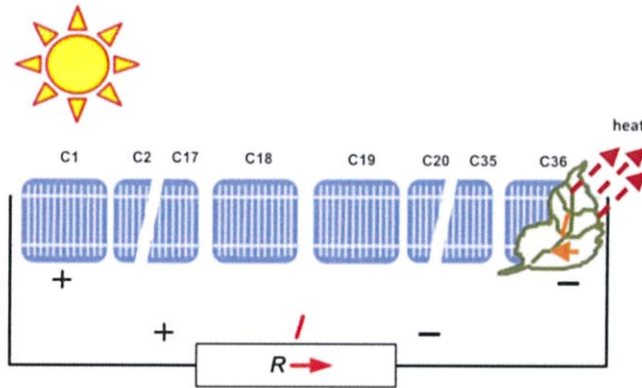
การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะไม่มีเงาบังแสดงดังในรูปที่ 2.25 แต่ถ้าเงาบังจากกรณีต่างๆ เช่น ใบไม้ และสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น จะทำให้แผงเซลล์มีค่ากระแสไฟฟ้าลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.26 ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าโดยรวมของแผงเซลล์ลดลงอย่างมาก นอกจากนี้แล้วเมื่อเกิดเงาบังกับแผงเซลล์ จะทำให้เกิดความร้อนที่ตัวเซลล์ขึ้น เนื่องจากเซลล์ที่ถูกบังจะทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าแทนที่จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน

ในทางปฏิบัติการต่อเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแผงเซลล์นั้น จะต้องมียบายพาสไดโอดเข้าไปในแผงเซลล์ เพื่อทำหน้าที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านช่วงขณะ ในกรณีที่เกิดเงาบังหรือแม้กระทั่งกรณีที่เซลล์เสียหายถาวร แนวลูกศรดังในรูปที่ 2.27 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านบายพาสไดโอดเมื่อมีใบไม้มาบัง จะเห็นได้ว่าถ้ามีบายพาสไดโอด จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแผงเซลล์เป็นปกติ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะไม่ไหลผ่านส่วนของแผงเซลล์ที่เกิดเงาบัง เป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าโดยรวมจากแผงเซลล์มีการลดทอนลงเพียงเล็กน้อย

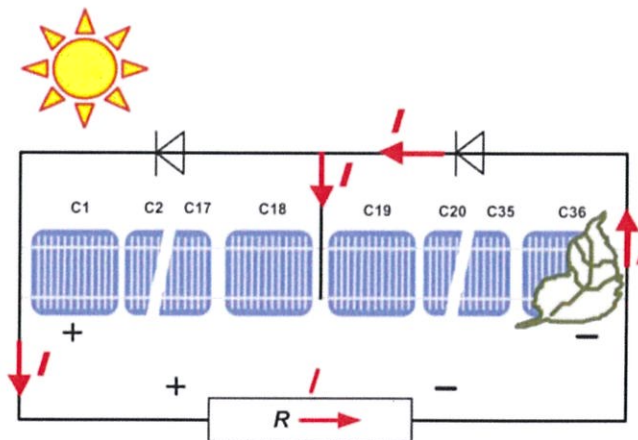
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนจะนำเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มค่าแรงดันวงจรเปิดให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งจำนวนเซลล์ในหนึ่งแผงจะมีประมาณ 36-40 เซลล์และใช้บายพาสไดโอดประมาณ 2 ตัว และในรูปที่ 2.28 เป็นการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันไฟฟ้าเกิดจากแผงที่มีบายพาสไดโอด และไม่มีบายพาสไดโอดโดยที่เส้นสีน้ำเงินแสดงกระแสและแรงดันเมื่อไม่มีเงาบังเซลล์ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เซลล์หนึ่งเซลล์ เส้นสีแดงในกรณีที่ไม่มีบายพาสไดโอด กระแสไฟฟ้าจะลดลงจากปกติอย่างมาก เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เหลือเพียง 25 เปอร์เซ็นต์จากพื้นที่เซลล์ทั้งหมด และเส้นสีเขียวกรณีถ้ามีบายพาสไดโอดที่เซลล์ 18 (C18 ในรูปที่ 2.27) จะทำให้กระแสไฟฟ้าล้นตัววงจร และแรงดันเปิดวงจรเท่าเดิมเพียงแต่กำลังไฟฟ้าทั้งหมดลดลงเท่านั้น



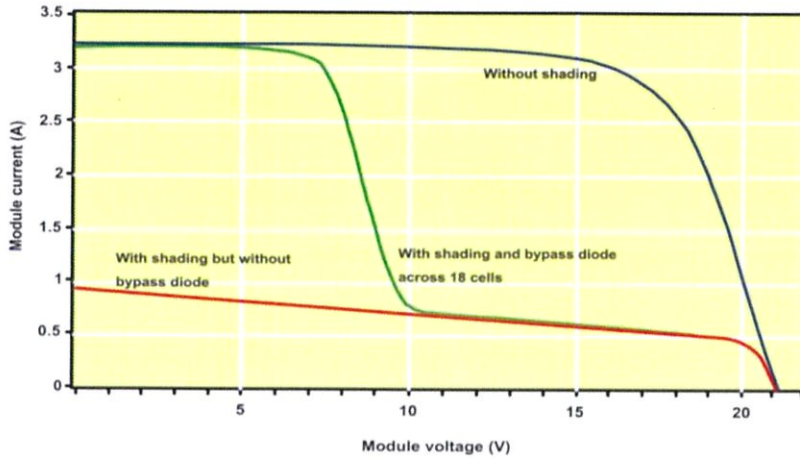
รูปที่ 2.25 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อไม่มีเงาบังที่เซลล์



รูปที่ 2.26 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีเงาบังที่เซลล์

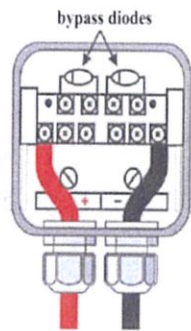


รูปที่ 2.27 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีเงาบังที่เซลล์แต่มีบายพาสไดโอด



รูปที่ 2.28 การเปรียบเทียบ IV curve ที่มีและไม่มีบล็อกกิ้งไดโอดเมื่อมีการเกิดเงาบัง

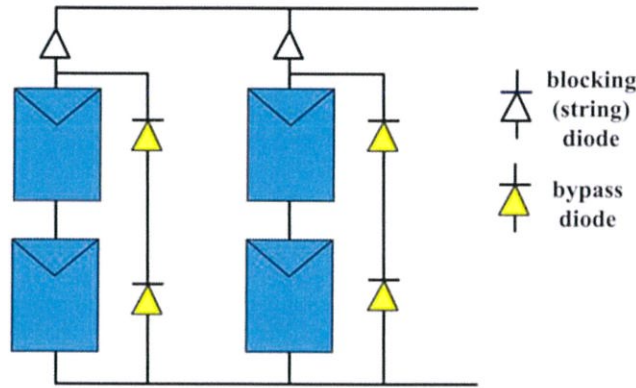
การติดตั้งบายพาสไดโอดจะติดตั้งบริเวณกล่องรวมสาย (Junction Box) หลังแผงเซลล์โดยการเชื่อมต่อกับสายไฟฟ้าหลัก (Busbar) ซึ่งสายไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกรวมที่กล่องรวมสายโดยแยกเป็นชุดเซลล์ย่อย ๆ แล้วทำการเชื่อมต่อบายพาสไดโอดคร่อมตามแสดงดังรูปที่ 2.29 ภายในกล่องรวมสายจะมีขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่พร้อมใช้งานและบายพาสไดโอดอยู่ด้วยกัน จึงสะดวกในการดูแลรักษาและซ่อมแซมหากเกิดการชำรุดขึ้นหลังจากใช้งาน หรือมีการปรับปรุงในอนาคต



รูปที่ 2.29 กล่องรวมสายไฟฟ้าที่มีการติดตั้งบายพาสไดโอด

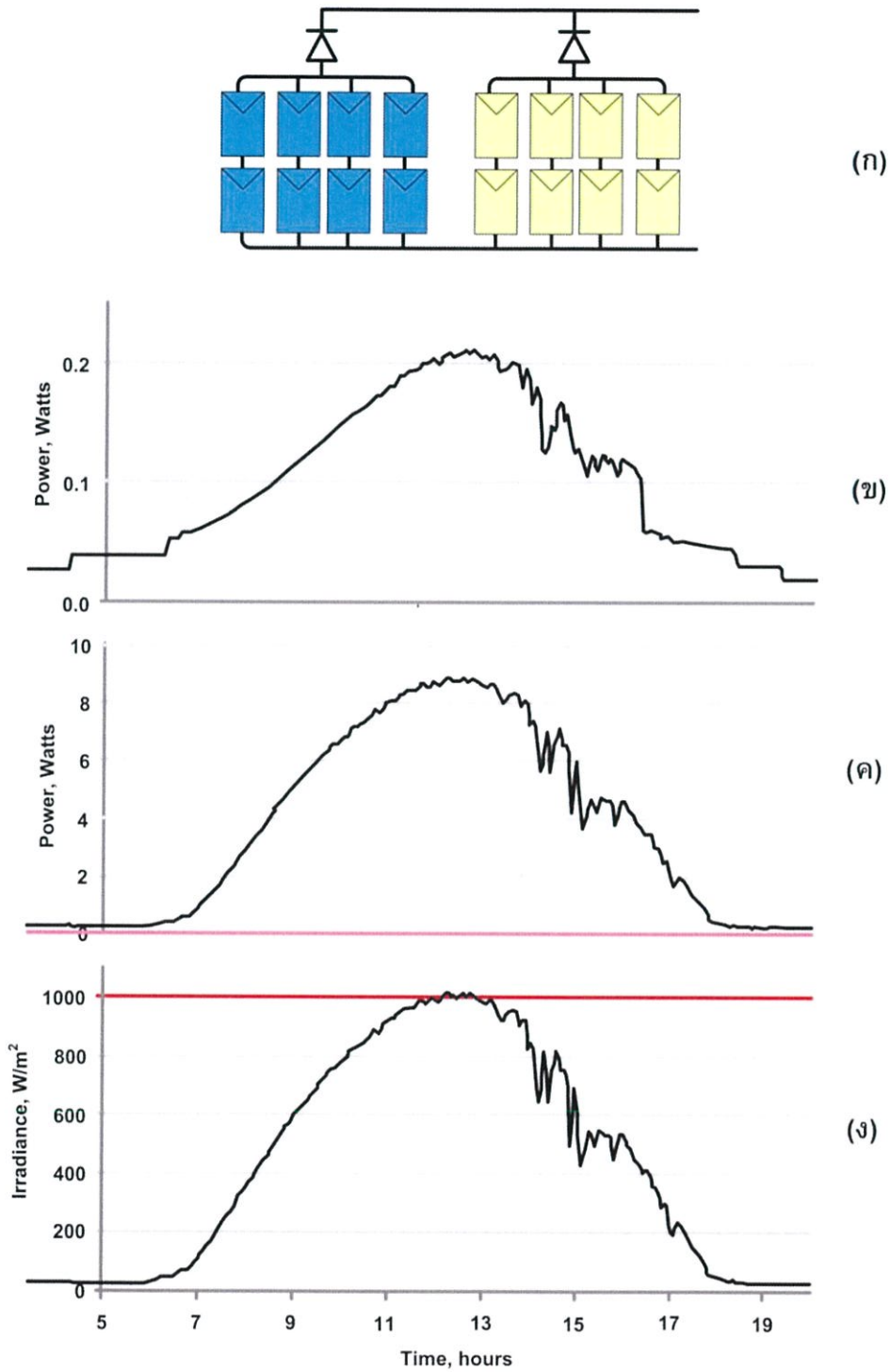
ในกรณีสำหรับการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นระบบขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่จำเป็น ต้องคำนึงถึงผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันของแต่ละสตริง ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัย อย่างเช่น การบังแดดเนื่องจากเมฆในบางสตริงของระบบโดยรวม คุณสมบัติของแผงเซลล์เองที่ไม่เท่ากัน มุมเอียงของการติดตั้งที่ไม่อยู่ในแนวระนาบเดียวกันทั้งหมด ด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่กล่าวมาเป็นผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าอาจจะมีปรากฏการณ์ของความไม่เท่ากันในแต่ละสตริง ซึ่งจะทำให้สตริงที่มีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดกลายเป็นภาระทางไฟฟ้าชั่วคราว และมีการถ่ายเทพลังงานจากสตริงที่ยังคงผลิตกำลังไฟฟ้าได้ดีมายังสตริงที่มีค่าต่ำ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าโดยรวมมีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อป้องกันภาวะดังกล่าวจึงต้องติดตั้งบล็อกกิ้ง

ไดโอดที่บริเวณปลายสายของทุกสตริงเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันกระแสไหลย้อนจากสตริงตัวอื่น อีกทั้งยังช่วยป้องกันไม่ให้สตริงตัวต่ำเกิดความเสียหายเนื่องจากภาวะกระแสไฟฟ้าไหลย้อน



รูปที่ 2.30 แผนภาพของระบบที่มีการติดตั้งบายพาสไดโอด

ปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่าการติดตั้งบายพาสไดโอดระหว่างเซลล์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวผ่านของกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดเงบังหรือเกิดจุดร้อน (Hot spot) ในแต่ละแผงภายในสตริง และการติดตั้งบล็อกกิ้งไดโอด เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลย้อนเข้าสู่สตริงดังรูปที่ 2.30 ซึ่งจะทำให้ระบบมีความคงที่ในการผลิตไฟฟ้าตลอดทั้งวัน โดยที่ไดโอดแต่ละตัวจะทำหน้าที่เมื่อเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ที่คาดไม่ถึง ซึ่งจะทำให้การผลิตไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอตลอดเวลา อย่างไรก็ตามการติดตั้งบล็อกกิ้งไดโอดในระบบต้องคำนึงถึงผลการสูญเสียแรงดันตกคร่อมของไดโอดที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และจะทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบลดทอนไปส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ในรูปที่ 2.31 เปรียบเทียบระบบขนาดเล็กที่มีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าเท่ากันที่ประกอบด้วยระบบที่ไม่มีบล็อกกิ้งไดโอด รูปที่ 2.31 (ข) และระบบที่มีบล็อกกิ้งไดโอด รูปที่ 2.21 (ค) โดยที่สตริงด้านซ้ายของรูปที่ 2.31 (ก) แสดงสภาวะปกติของสตริงที่เกิดเงบัง และเมื่อเปรียบเทียบกราฟระหว่างที่มีและไม่มีบล็อกกิ้งไดโอด จะเห็นได้ว่าระบบที่ไม่มีบล็อกกิ้งไดโอดจะให้ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำมาก เนื่องจากผลของการเกิดภาระทางไฟฟ้าและมีกระแสการไหลย้อนกลับสู่สตริงที่มีเงบังแดด ส่วนระบบที่มีบล็อกกิ้งไดโอดยังคงสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้โดยมีกำลังไฟฟ้าโดยรวมเท่ากับสตริงที่ไม่ถูกเงบังแดดดังสตริงด้านขวาของรูป 2.31 (ก)



รูปที่ 2.31 การเปรียบเทียบไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบที่มีและไม่มี Blocking Diode

(ก) บล็อกกิ้งไดโอด (ข) ระบบที่ไม่มีบล็อกกิ้งไดโอด

(ค) ระบบที่มีบล็อกกิ้งไดโอดโดยที่สตริงด้านซ้ายของรูป (ก) แสดงสภาวะปกติของสตริงที่เกิดเงาบัง

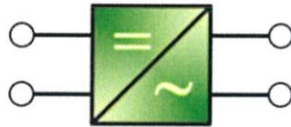
(ง) ระบบที่มีบล็อกกิ้งไดโอดโดยที่สตริงด้านซ้ายของรูป (ก) แสดงสภาวะปกติของสตริงที่ไม่เกิดเงาบัง

2.7 ลักษณะของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรณจําหนาย (Grid-connected or Grid tied inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบอิสระ (Standalone inverter) ในชวงประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา งานวิจัยเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์สำหรับการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรณจําหนาย (Grid-connected PV inverter) ส่วนหนึ่งเน้นไปที่วงจรหรือเทคนิคการควบคุมใหม่ ๆ เมื่ออาศัยความความกําหนดยโซลิตสเดท ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะสร้ง Easy module ขนาดเล็ก และประสิทธิภาพสูงมีความไว้วางใจได้และราคาถูก

2.7.1 สัญลักษณ์และหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรณจําหนายในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) ระบบจําหนาย (Grid) และภาระไฟฟ้า (AC loads) โดยรับไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งมีความถี่และแรงดันเดียวกับระบบจําหนาย โดยสัญลักษณ์ในไดอะแกรมวงจรมวลดังรูปที่ 2.32

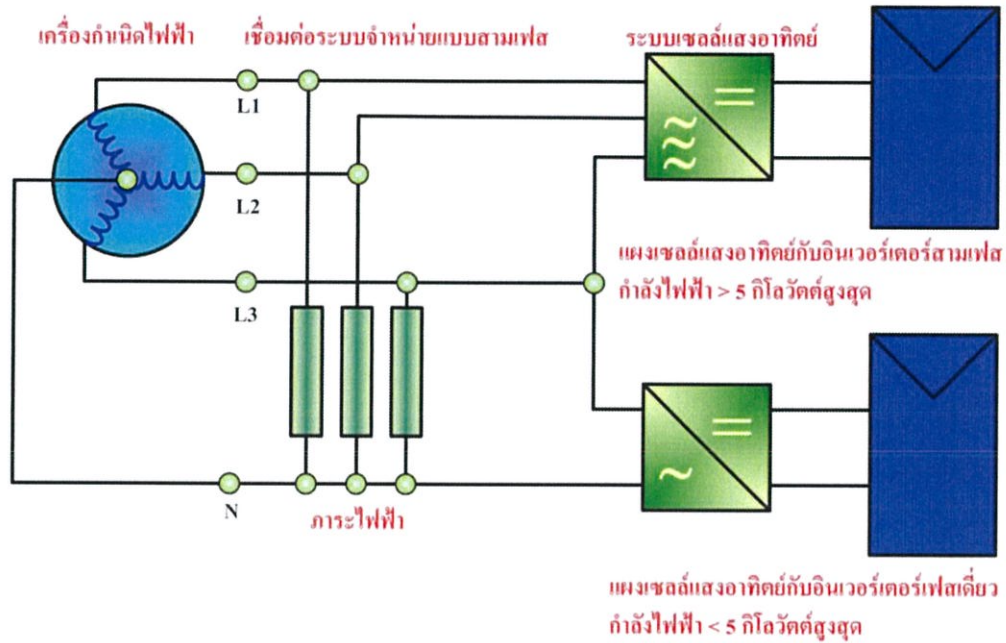


รูปที่ 2.32 ไดอะแกรมวงจรมวลของอินเวอร์เตอร์

การเชื่อมต่อนี้กับระบบจําหนาย สามารถเชื่อมต่อนี้กับระบบจําหนายหลักได้โดยตรงหรือระบบจําหนายของอาคารมีความแตกต่าง คือ การเชื่อมต่อนี้โดยตรงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบจําหนายโดยตรง แต่หากเชื่อมต่อนี้กับระบบจําหนายของอาคาร กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้กับภาระของอาคารก่อน ส่วนที่เหลือเกินจึงจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบจําหนายหลัก ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้สามารถใช้ได้กับทั้งระบบ 1 เฟส และ 3 เฟส ดังรูปที่ 2.33 เพื่อป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจําหนายได้สูงสุดเสมอ อินเวอร์เตอร์ประเภทนี้จึงต้องทำงานที่จุดกำลังสูงสุด (MPP) ของพีวีอาร์เรย์ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพอากาศ ดังนั้นตัวติดตามกำลังสูงสุด (MPP Tracker) ภายในอินเวอร์เตอร์จึงต้องปรับจุดกำลังสูงสุดให้เหมาะสมกับค่าแรงดันและกระแสของพีวีอาร์เรย์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวติดตามกำลังสูงสุดจึงมีความจําเป็นต่อนินเวอร์เตอร์ ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรณจําหนาย สามารถใช้งานตามหน้าที่ดังนี้

- แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากระบบแผงเซลล์หรือพีวีอาร์เรย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบจําหนาย
- ปรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานที่จุดสูงสุดของพีวีอาร์เรย์
- สามารถบันทึกข้อมูลการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้
- มีฟังก์ชันป้องกันทั้งด้านไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ

ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรณำหน่ยมีผู้ผลิตในหลายประเทศ ทั้งพิกัดเล็ก ไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ และพิกัดขนาดใหญ่มากกว่า 10 กิโลวัตต์ หลักการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ Grid-controlled และ Self-commutated inverter

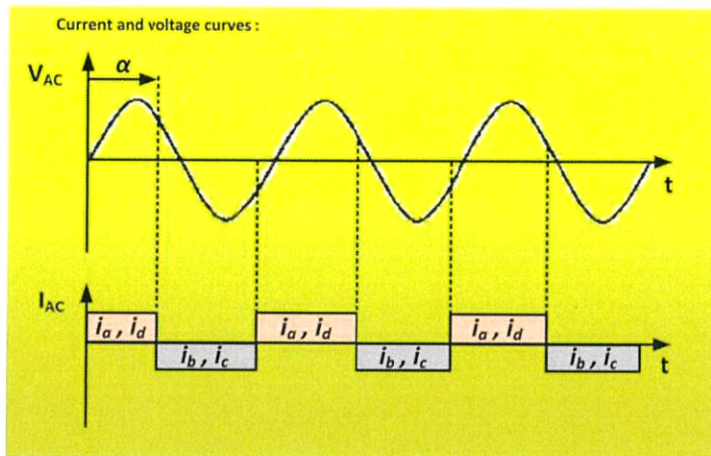
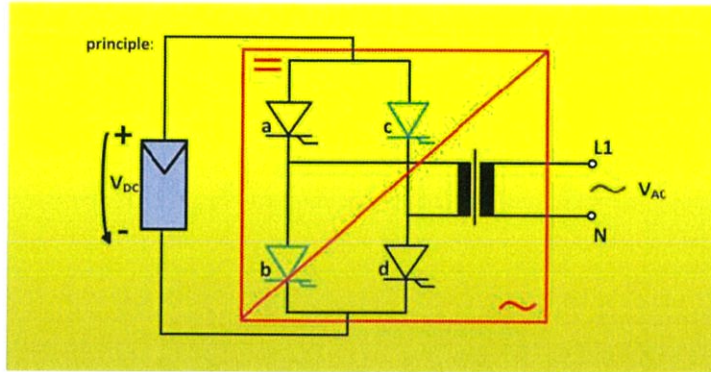


รูปที่ 2.33 การเชื่อมต่อบรรณำหน่ยเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบบรรณำหน่ย

2.7.1.1 อินเวอร์เตอร์แบบ Grid-controlled

ส่วนประกอบพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ลักษณะนี้ คือ วงจรบริดจ์ของอุปกรณ์ สวิทซ์ซึ่งเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป ดังรูปที่ 2.34 อุปกรณ์สวิทซ์ซึ่งที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ ไทริสเตอร์ และ IGBT อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าของระบบบรรณำหน่ยในการควบคุมการสวิทซ์เปิดและปิดของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละคู่ของอุปกรณ์สวิทซ์ซึ่งในวงจรบริดจ์ โดยทำงานที่ 50 เฮิร์ต ดังนั้น จึงเรียก อินเวอร์เตอร์ลักษณะนี้ว่า grid-controlled

หากระบบบรรณำหน่ยไม่มีแรงดันไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์จะหยุดทำงานและเป็นเหตุผลที่ อินเวอร์เตอร์แบบอิสระจึงไม่สามารถใช้แทนอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรณำหน่ยได้ บางครั้งอาจจะ เรียกว่าอินเวอร์เตอร์ลักษณะนี้ว่า square-wave inverter เนื่องจากกระแสเอาต์พุตมีลักษณะเป็นรูปคลื่น สี่เหลี่ยม (square wave) ซึ่งทำให้เกิดองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ค่อนข้างสูงและต้องรับกำลังรีแอกทีฟจาก ระบบบรรณำหน่ยปริมาณมากด้วย การควบคุมการสวิทซ์ในปัจจุบันจะใช้ผ่านไมโครโพรเซสเซอร์ เพื่อหน่วงมุม (delay angle control) สัญญาณการสวิทซ์สำหรับการใช้งาน MPP Tracking

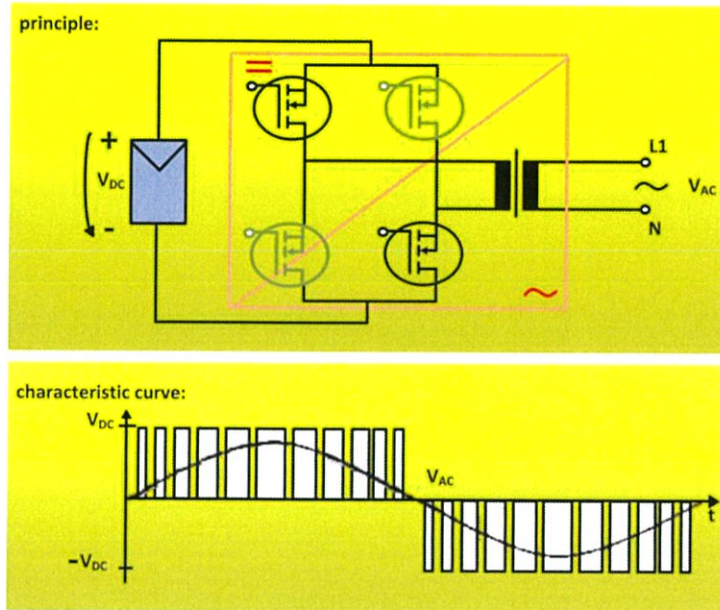


รูปที่ 2.34 หลักการของอินเวอร์เตอร์แบบ grid-controlled

2.7.1.2 อินเวอร์เตอร์แบบ Self-commutated

ส่วนประกอบเป็นวงจรบริดจ์พื้นฐานเช่นเดียวกับรูปที่ 2.35 แต่อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งในวงจรที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบและระดับแรงดันระบบด้านไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถเลือกอุปกรณ์ ได้แก่ MOSFETs, Bipolar transistor, GTO และ IGBT อุปกรณ์เหล่านี้ใช้หลักการควบคุมแบบ pulse width modulation ซึ่งทำให้ได้สัญญาณรูปคลื่นซายน์ที่ดีกว่าการสวิตช์ที่ความถี่สูงประมาณ 10-100 กิโลเฮิร์ต ทำให้ช่วงการสวิตช์ (duration) และรูปของสัญญาณใกล้เคียงรูปซายน์ เมื่อผ่านวงจรกรอง low pass filter แล้วทำให้กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบจำหน่าย

ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์มอนิกจะปรากฏเพียงอันดับต่ำเท่านั้น และกำลังรีแอกตีฟสำหรับการแปลงกระแสไฟให้เดินกลับกัน (commutation) ก็ยังต่ำด้วย อย่างไรก็ตามการสวิตช์ด้วยความถี่สูงจะทำให้เกิด high-frequency interference หรือรู้จักดีว่าเป็นปัญหาของ (EMC: electromagnetic compatibility) ซึ่งต้องการอุปกรณ์ป้องกันวงจรที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วอินเวอร์เตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระ หากนำมาใช้กับอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบริดจ์จำหน่าย ต้องคำนึงถึงความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบจำหน่ายจะต้องซิงโครไนซ์ความถี่ของระบบจำหน่าย



รูปที่ 2.35 หลักการของอินเวอร์เตอร์แบบ self-commutated inverter

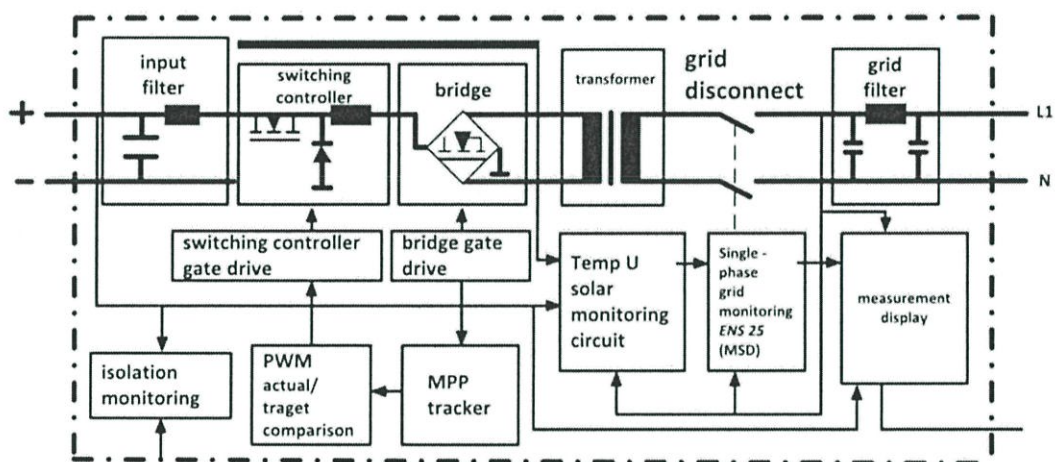
อินเวอร์เตอร์แบบ self-commutated และอินเวอร์เตอร์แบบ grid-controlled ประกอบด้วย หม้อแปลงความถี่ต่ำ 50 เฮิร์ต เป็นอุปกรณ์สำหรับจับคู่แรงดันเข้ากับแรงดันของระบบและแยกโดด ส่วนไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับออกจากกัน ในรูปที่ 2.36 เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ self-commutated with low-frequency (LF) transformer ประกอบด้วยวงจรต่างๆ ดังนี้ เช่น (1) Step down converter (2) Full bridge circuit (3) Grid transformer (4) Maximum power point tracker (MPPT) และ (5) Monitoring circuit with ENS และ grid monitoring

ข้อดีของการแยกโดดทางไฟฟ้าด้วยหม้อแปลง ทำให้สามารถออกแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับความปลอดภัยด้านแรงต่ำได้ นอกจากนี้ยังป้องกัน potential equalization, lightning protection, surge protection, grounding และ electromagnetic interference อย่างไรก็ตามการใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง ดังนั้นขนาดของอินเวอร์เตอร์จึงใหญ่ขึ้นตามขนาดของหม้อแปลง จึงทำให้ราคาของอุปกรณ์ราคาสูงขึ้นด้วย กรณีของหม้อแปลงความถี่สูง หมายถึง หม้อแปลงที่ทำงานที่ระดับความถี่ 10-50 kHz หากเปรียบเทียบกับหม้อแปลงความถี่ต่ำจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียขนาดและราคาต่ำกว่า อย่างไรก็ตามจะทำให้วงจรของอินเวอร์เตอร์มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของอินเวอร์เตอร์สามารถลดได้โดยไม่ใช้หม้อแปลง ยังเป็นการลดทั้งขนาดน้ำหนักและราคาด้วย โดยทั่วไปแรงดันระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องสูงกว่า crest value ของแรงดันด้านระบบจำหน่าย หรือใช้ step-up dc to dc converter เพื่อเพิ่มแรงดัน เมื่อเพิ่มวงจร dc to dc converter จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์มากขึ้น ซึ่งส่วนหนึ่งสามารถลดได้โดยไม่ใช้หม้อแปลง สิ่งสำคัญของอินเวอร์เตอร์แบบไม่มีหม้อแปลง คือ ไม่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรกำลังด้านไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องการระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์สูงขึ้นด้วย ซึ่งโดยทั่วไปมาตรฐานการติดตั้งและระบบจำหน่ายต้องการการการแยกวงจรด้านไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับออกจาก

กัน หากไม่มีต้องมีอุปกรณ์ป้องกันความไวกระแสดับสากล (universal current sensitivity) (DIN VDE 0126) เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยา (reaction) ของอุปกรณ์ต่อความผิดพลาดทั้งด้านไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ซึ่งอุปกรณ์นี้อาจรวมอยู่ในวงจร ENS/MSD

ข้อควรระวัง คือ อินเวอร์เตอร์ลักษณะนี้จะมีค่าความจุของกระแสปล่อยประจุ (capacitive discharge current) มากกว่า 30 มิลลิแอมป์ ระหว่างการทำงานปกติ ซึ่งสามารถไหลลงดินผ่านแผงเซลล์ส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันไฟรั่ว (RDC : residual current device) ซึ่งตัดการทำงานที่ 30 mA ไม่สามารถนำมาใช้ได้ การไม่แยกโดดทางไฟฟ้าจะทำให้ผลของ couple electromagnetic interference pulse (electro-smog) ในแผงเซลล์เกิดได้ง่าย ซึ่งหมายความว่าอินเวอร์เตอร์ลักษณะนี้จะมีผลกระทบด้านแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสิ่งแวดล้อมสูงมาก



รูปที่ 2.36 ส่วนประกอบวงจรของอินเวอร์เตอร์ที่มีหม้อแปลงความถี่ต่ำ

2.7.2 ลักษณะและสมบัติของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศ

ลักษณะและสมบัติของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศ ประกอบด้วย

- 1) ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Conversion Efficiency) เป็นพารามิเตอร์บ่งบอกถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลง อุปกรณ์สวิชชิ่ง และการจัดการด้านการใช้กำลังของอินเวอร์เตอร์และอื่น ๆ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานขึ้นอยู่กับกำลังอินพุตและแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์ (ซึ่งมีค่าน้อยแต่ไม่ต้องนำมาคิดผลก็ได้) การคิดผลจากแรงดันอินพุตต่อประสิทธิภาพอยู่บนฐานของการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในสภาวะจริง ซึ่งสภาวะอากาศ (อุณหภูมิและความเข้มแสงอาทิตย์) มีผลต่อการทำงานของเซลล์

$$\eta_{CON} = \frac{P_{AC} \text{ Input real power (of fundamental component)}}{P_{DC} \text{ Input real power}} \quad (2.4)$$

2) ประสิทธิภาพการติดตาม (Tracking Efficiency) จากที่ได้กล่าวแล้วว่าอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบันต้องมีฟังก์ชันการติดตามหาจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์ ซึ่งการทำงานในหนึ่งวันของแผงเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ ซึ่งเปลี่ยนจุดกำลังสูงสุดของแผง อินเวอร์เตอร์จึงต้องปรับและติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยอัตโนมัติ คุณภาพของอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปจากจุดการทำงานที่เหมาะสม ซึ่งอธิบายโดยประสิทธิภาพการติดตามดังสมการที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ของจุดการทำงานเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่าง grid voltage frequency ในด้านไฟฟ้ากระแสตรง และควมค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ผลกระทบของการขึ้นลงนี้จะชัดเจนในอินเวอร์เตอร์แบบไม่มีหม้อแปลง ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของระบบ MPP Tracking จะส่งผลต่อค่าสูงสุดของความเข้มแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาสั้น ๆ เช่น ขณะเมฆเคลื่อนตัวผ่านอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ค่าสูงสุดของกำลังที่สูงมากกว่า 1000 วัตต์/ตารางเมตร จะถูก cut off โดยขีดจำกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์

$$\eta_{\text{CON}} = P_{\text{DC instantaneous input real power}} / P_{\text{PV maximum instantaneous PV array power}} \quad (2.5)$$

- 3) ประสิทธิภาพสถิต (Static Efficiency) ประสิทธิภาพสถิตขึ้นอยู่กับรูปผลคูณของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานและประสิทธิภาพการติดตาม หรืออาจคำนวณได้จากค่าภาระต่าง ๆ โดยทั่วไปประสิทธิภาพการแปลงพลังงานหมายถึงเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานตามพิกัดแรงดันและพิกัดกระแสตามที่ระบุ (nominal) และเป็นประสิทธิภาพที่ระบุ หรือผู้ผลิตบางรายอาจระบุประสิทธิภาพสูงสุด (maximum efficiency) ด้วย ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดจะอยู่ระหว่างเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงาน 50-80 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกำลัง ประสิทธิภาพที่ระบุและประสิทธิภาพสูงสุดจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิค่าหนึ่งเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์อาจไม่นำมาคิดผลได้ หากอินเวอร์เตอร์ทำงานตามการเปลี่ยนแปลงของภาระและทำงานที่พิกัดเท่านั้น แต่สำหรับการพิจารณาในรูปของ solar yield ตลอดทั้งปีแล้ว ประสิทธิภาพจะแตกต่างกันไปแล้วแต่พิกัดของแต่ละระบบ ดังนั้น efficiency characteristic curves ดังรูปที่ 2.37 จึงเหมาะสมสำหรับการพิจารณาอินเวอร์เตอร์ เมื่อกล่าวถึงที่พิกัดภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมการทำงานของอินเวอร์เตอร์และแรงดันอินพุตด้านไฟฟ้ากระแสตรง
- 4) ประสิทธิภาพแบบยูโร (Euro Efficiency) เป็นการใช้งานและเปรียบเทียบอินเวอร์เตอร์อย่างง่าย ๆ บนพื้นฐานของประสิทธิภาพสามารถใช้วิธีการของมาตรฐานยุโรป (European standard) ในการกำหนดประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นวิธีถ่วงน้ำหนักค่าประสิทธิภาพ เมื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมของกลุ่มประเทศยุโรป พิจารณาจากรูปที่ 2.38 แสดงให้เห็นว่าความถี่และพลังงานที่ระดับความเข้ม

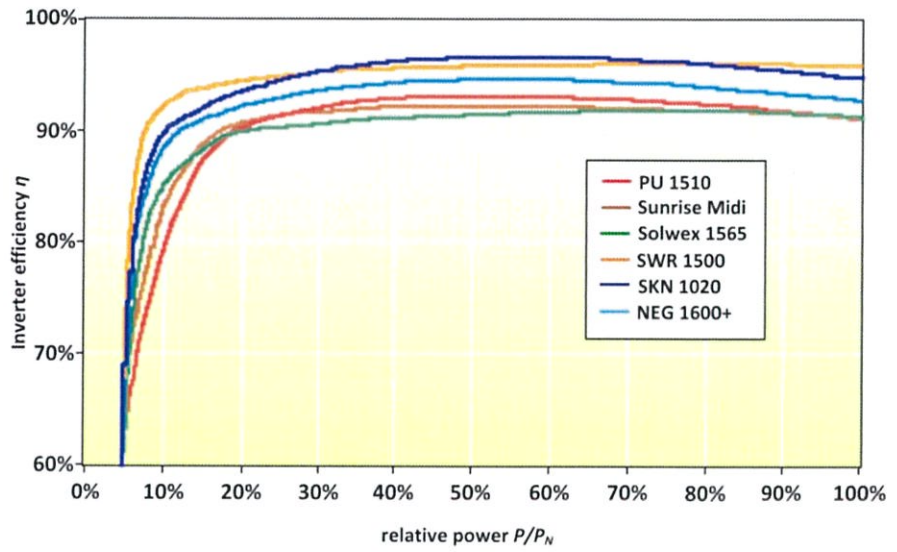
แสงอาทิตย์ต่าง ๆ จากการแผ่รังสีอาทิตย์ตลอดปีในประเทศเยอรมัน เนื่องจากความเข้มรังสีอาทิตย์บนแผงเซลล์จะขึ้นลงบ่อยครั้งในระหว่างวัน โดยพิจารณาว่าอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้ภาระต่าง ๆ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าเข้าชั่วขณะ ถ้าภาระมีค่ามากเนื่องจากความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งการรวมกันของสภาวะเมื่อภาระต่าง ๆ จึงใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพตามมาตรฐานยุโรป แสดงให้เห็นดังสมการที่ 2.6 โดยแบ่งการคิดประสิทธิภาพออกเป็น 6 ช่วงของค่าเอาต์พุท จะพิจารณาว่าอินเวอร์เตอร์ทำงานที่พิกัดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ของเวลาการทำงานตลอดปี ทำงานที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดเป็น 48 เปอร์เซ็นต์ของเวลาการทำงาน ส่วนอีก 4 ช่วงจะอธิบายในลักษณะเดียวกัน ประสิทธิภาพตามมาตรฐานยุโรปทำให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่แตกต่างกัน แต่สังเกตว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้อ้างอิงสภาพภูมิอากาศของยุโรปกลาง ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์จะมีประสิทธิภาพตามมาตรฐานยุโรปประมาณ 92-96 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพนี้ปกติจะใช้การคำนวณจากผู้ผลิตที่แรงดันที่ระบุเท่านั้น ซึ่ง MPP Tracking จะทำงานครอบคลุมช่วงแรงดันกว้าง ๆ และประสิทธิภาพจะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิแวดล้อมและแรงดันอินพุตด้วย การวัดประสิทธิภาพจึงควรวัดตามมาตรฐาน IEC 61683, Photovoltaic System-Power Conditioners – Procedure for Measuring Efficiency ซึ่งกำหนดอุณหภูมิแวดล้อมที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียสที่แรงดันอินพุตต่อไปนี้

- แรงดันขาเข้าต่ำสุด (minimum input voltage)
- แรงดันปกติ (nominal voltage)
- 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันขาเข้าสูงสุด (90% of the maximum input voltage)

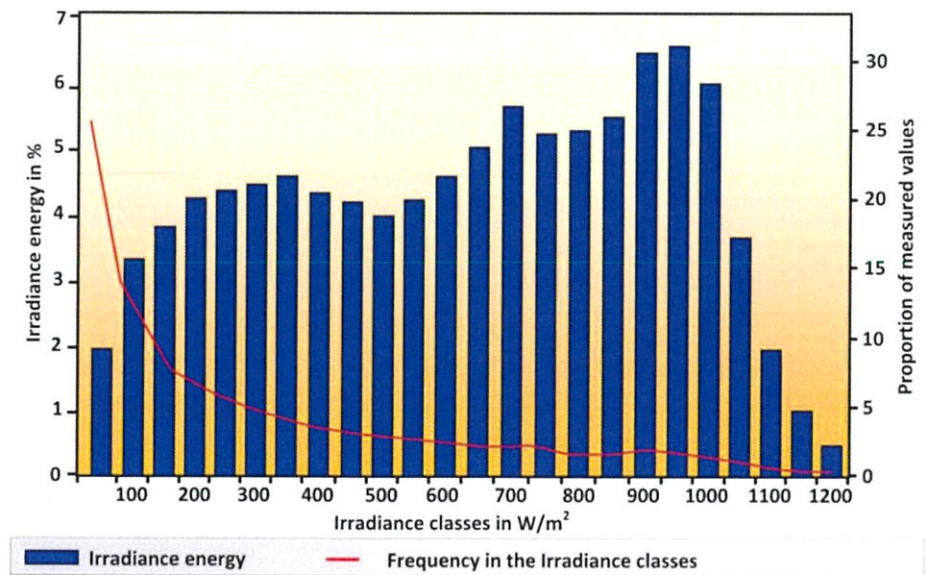
$$\eta_{\text{CON}} = 0.3 \eta_{5\%} + 0.06 \eta_{10\%} + 0.13 \eta_{20\%} + 0.1 \eta_{30\%} + 0.48 \eta_{50\%} + 0.2 \eta_{100\%} \quad (2.6)$$

- 5) พฤติกรรมขณะภาระเกิน (Overload Behavior) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกติดตั้งไม่ถูกทิศทาง (optimum orientation) หรือมีการบังเงา (Partial shading) เป็นสาเหตุที่ลดความสามารถบางอย่างของอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้ จึงต้องพิจารณาพฤติกรรมของอินเวอร์เตอร์เมื่อทำงานเกิดพิกัด ถ้าอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังเกินพิกัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในเครื่อง จะทำงานภายใต้ภาระทางความร้อนที่มากขึ้น การจ่ายภาระเกินจะต้องไม่ทำให้อุปกรณ์ภายในเครื่องเกิดความร้อน จนทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งทำได้โดยใช้ควบคุมการลดกำลังไฟฟ้า (power reduction control) เมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ถึงจุดวิกฤต กำลังไฟฟ้าจะถูกลดลงอัตโนมัติโดย

เลื่อนจุดการทำงานทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่ทำงานที่จุดกำลังสูงสุด หรือใช้การสวิทชิงเป็นแบบเปิด-ปิดแทน



รูปที่ 2.37 ตัวอย่าง characteristic curve ของอินเวอร์เตอร์ชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.38 ความถี่และพลังงานที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดหนึ่งปี ในประเทศเยอรมัน

2.8 ลักษณะของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกออกแบบ เพื่อให้การจ่ายประจุมีค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่อย่างต่อเนื่อง มีความแตกต่างจากแบตเตอรี่สำหรับการสตาร์ทเครื่องยนต์ ซึ่งได้รับการออกแบบให้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้มาก ๆ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ๆ ส่วนการแบ่งแบตเตอรี่โดยทั่วไปแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ แบบปฐมภูมิ (Primary Battery) และแบบทุติยภูมิ (Secondary Battery) โดยแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ คือ แบตเตอรี่ที่ใช้งานได้เพียงครั้งเดียวแล้วต้องทิ้ง เนื่องจากไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีแบบย้อนกลับได้ ส่วนแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ คือ แบตเตอรี่ที่สามารถทำการเก็บประจุไฟใหม่และนำกลับมาใช้งานได้ อีก หรือกล่าวได้ว่าสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีแบบย้อนกลับได้ ตัวอย่างเช่น ตะกั่ว-กรด นิกเกิล-แคดเมียม นิกเกิล-ไฮไดรด์ และลิเทียมแบตเตอรี่ เป็นต้น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียมใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ เป็นต้น สำหรับแบตเตอรี่นิกเกิล-เหล็กไม่นำมาใช้เนื่องจากการคายประจุโดยตัวเองมีค่าสูง ส่วนแบตเตอรี่นิกเกิล-ไฮไดรด์ราคาค่อนข้างสูงเมื่อคิดราคาต่อชั่วโมงเทียบกับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด อย่างไรก็ตามค่าความจุของแบตเตอรี่นี้มีช่วงให้เลือกใช้งานได้หลายระดับหลายร้อยจนถึงพันแอมป์แอมป์-ชั่วโมง และต้องการระบบป้องกันในวงจรการประจึจเหมาะสมควรกับการใช้งานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ซึ่งส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแสดงดังรูปที่ 2.39 ดังนี้



รูปที่ 2.39 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

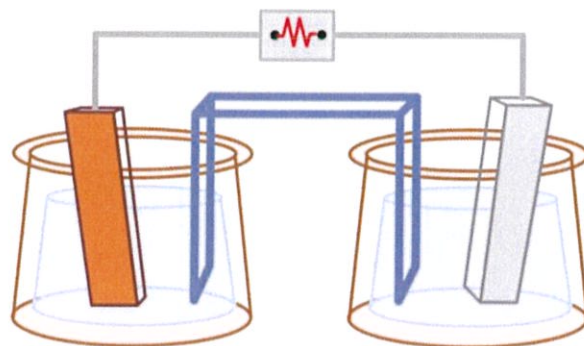
- 1) เปลือกและฝาแบตเตอรี่ เพื่อใช้บรรจุกลุ่มแผ่นธาตุบวกและลบ โดยทั่วไปทำจากยางแข็งหรือพลาสติกทนทานต่อกรดกำมะถัน ซึ่งในรูปเป็นแบตเตอรี่ชนิด 12 โวลต์ แบ่งเป็น 6 ช่อง
- 2) กลุ่มแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ เป็นโครงตะกั่วผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง หรือตะกั่วกับแคลเซียมแล้วฉาบด้วยผงตะกั่วบริสุทธิ์ผสมสารเคมี แผ่นธาตุบวกมีเนื้อแผ่นสีน้ำตาล แผ่นธาตุลบมีเนื้อแผ่นสีเทา ซึ่งทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำกรดแล้วเกิดกระแสไฟฟ้า

- 3) แผ่นกั้น ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบสัมผัสกัน แผ่นกั้นทำจากแผ่นยางพารา แผ่นพลาสติกที่มีรูพรุนเล็ก ๆ หรือแผ่นกระดาษสังเคราะห์ ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้อย่างดีระหว่างแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบเมื่อมีน้ำกรด
- 4) น้ำกรดผสมหรือน้ำอิเล็กโทรไลต์ เป็นส่วนผสมระหว่างน้ำกลั่นหรือน้ำกรดกัมมะถันชนิดเข้มข้น ทำให้เจือจางโดยในประเทศเขตร้อนใช้น้ำกรดผสมที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.240-1.260 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
- 5) ฝาจุกแบตเตอรี่ ทำหน้าที่รักษาและมิให้น้ำกรดผสมออกมาจากช่องเซลล์แบตเตอรี่พร้อมระบายก๊าซที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี สามารถป้องกันได้โดยการรักษาความสะอาดไม่ให้เกิดการอุดตัน

ความแตกต่างของโครงสร้างที่สำคัญระหว่างแบตเตอรี่แบบ Deep cycle lead-acid ซึ่งเหมาะสมใช้งานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดทั่วไป คือแผ่นตะกั่วของแบตเตอรี่แบบแรกเป็นแบบแข็งทึบ แต่ในแบตเตอรี่อีกแบบหนึ่งเป็นแบบของแข็งมีรูพรุนเหมือนฟองน้ำ ทั้งนี้อาจพบแบตเตอรี่แสดงไว้ที่ฉลากเป็น Deep cycle lead-acid แต่ภายในไม่ใช่แผ่นตะกั่วแบบของแข็งทึบจึงอาจเรียกแบตเตอรี่นี้เป็นแบบผสมผสาน (hybrid battery) อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่แบบ Deep cycle lead-acid ถูกออกแบบให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถึง 20% ของค่าความจุ และสามารถทำการประจุได้หลายพันรอบ ทั้งนี้หลายๆ บริษัทได้แนะนำว่าแบตเตอรี่แบบผสมผสานจะไม่สามารถจ่ายประจุได้ถึง 50% ของค่าความจุ

2.9 การทำงานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่หรือเซลล์โวลตาอิก (Voltaic Cell) แสดงด้วยสองครึ่งเซลล์ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสะพานเกลือเพื่อเป็นตัวกั้นระหว่างแต่ละเซลล์ และยินยอมให้ส่งผ่านไอออนได้เท่านั้น แต่ไม่ยินยอมให้โมเลกุลของน้ำผ่านดังในรูปที่ 2.40 แสดงส่วนประกอบในเซลล์โวลตาอิก



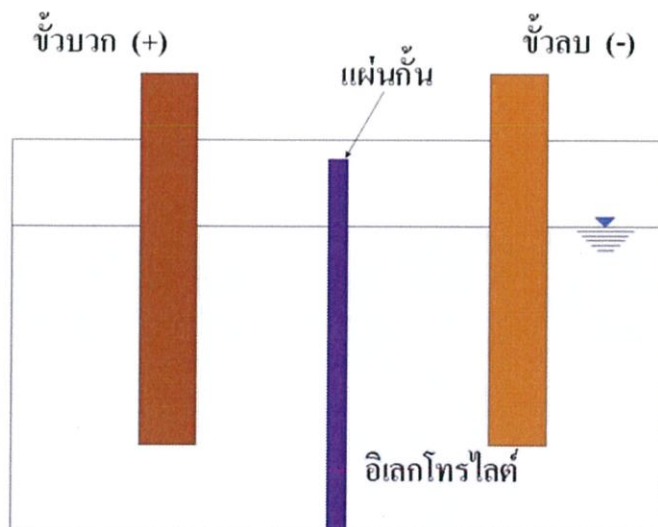
รูปที่ 2.40 ส่วนประกอบของเซลล์โวลตาอิก

แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แบตเตอรี่ประกอบไปด้วยหนึ่งเซลล์โวลตาอิกหรือมากกว่าหนึ่งเซลล์ โดยแต่ละเซลล์โวลตาอิกประกอบไปด้วยสองครึ่งเซลล์ ซึ่งเป็นการต่อแบบอนุกรม ทั้งนี้หนึ่งครึ่งเซลล์จะรวมไปถึงสารอิเล็กโทรไลต์

และอิเล็กโทรดที่ส่งผ่านประจุลบ เรียกว่า แอโนด ส่วนอีกหนึ่งครึ่งเซลล์โดยรวมสารอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรดส่งผ่านประจุบวก เรียกว่า แคโทด

ในปฏิกิริยารีดอกซ์ผลิตกำลังไฟฟ้าจะประกอบด้วย ปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเป็นการเพิ่มอิเล็กตรอนและเกิดขึ้นในด้านแคโทด ขณะที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นการดึงอิเล็กตรอนเกิดขึ้นในด้านแอโนด ทั้งนี้อิเล็กโทรดจะไม่สัมผัสกันโดยตรงแต่จะเกิดการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งของแข็งและของเหลว นอกจากนี้ยังอาจพบว่ากรณีแบตเตอรี่ที่มีหลายเซลล์จะใช้ครึ่งเซลล์ซึ่งมีสารอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกันในแต่ละเซลล์และถูกปิดผนึกไว้ในบรรจุภัณฑ์ ในแต่ละครึ่งเซลล์จะมีแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (emf : Electromotive) หรืออีเอ็มเอฟ จากค่านี้ทำให้ทราบถึงความสามารถในการเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าจากภายในสู่ภายนอกเซลล์ ค่าอีเอ็มเอฟสุทธิของแบตเตอรี่ คือค่าความแตกต่างระหว่างอีเอ็มเอฟของแต่ละครึ่งเซลล์ทั้งหมด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าอีเอ็มเอฟสุทธิ คือความแตกต่างระหว่างศักย์ของปฏิกิริยารีดักชันของแต่ละครึ่งเซลล์ ซึ่งแรงขับเคลื่อนไฟฟ้าหรือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างขั้วของแบตเตอรี่เป็นค่าแรงดันที่ทราบได้จากกรวัด โดยมีหน่วยเป็นโวลต์ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่เป็นการอัดประจุหรือคายประจุจะเท่ากับค่าอีเอ็มเอฟของแบตเตอรี่ ทั้งนี้แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะจ่ายประจุจะมีค่าน้อยกว่าหากเทียบกับขนาดของแรงดันที่ขั้วขณะอัดประจุ เนื่องจากค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่อย่างง่ายประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ ขั้วบวก (Positive Electrode), ขั้วลบ (Negative Electrode), อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และแผ่นกั้น (Separator) ดังแสดงในรูปที่ 2.41 โดยที่ขั้วบวกเป็นส่วนที่สูญเสียอิเล็กตรอน เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี ส่วนขั้วลบเป็นตัวรับอิเล็กตรอน สำหรับอิเล็กโทรไลต์จะเป็นตัวกลางให้ประจุไหลระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ และตัวคั่นเซลล์ทำหน้าที่แยกทางไฟฟ้าในส่วนขั้วบวกและขั้วลบออกจากกัน



รูปที่ 2.41 เซลล์ไฟฟ้าพื้นฐาน

แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกกำหนดโดยวัสดุที่ใช้งาน ซึ่งทางปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแต่ละขั้วอิเล็กโทรด จะให้ค่าศักย์ทางไฟฟ้าค่าหนึ่ง เช่น ตะกั่ว-กรด ที่ขั้วบวกจะให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -1.685 โวลต์ ส่วนที่ขั้วลบ จะให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $+0.365$ โวลต์ จากศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองทำให้ได้ผลรวม แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 2.05 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันทางไฟฟ้านี้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของเซลล์หลายเซลล์ภายในแบตเตอรี่ โดยให้ขั้วบวกของเซลล์หนึ่งต่อกับขั้วลบของ เซลล์ถัดไป และต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้เท่ากับผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ รวมกัน เรียกการต่อแบบนี้ว่า “การต่อแบบอนุกรมหรือการต่อแบบอันดับ” ส่วนวิธีการเพิ่มความจุไฟฟ้า ให้กับแบตเตอรี่จะต้องต่อให้ขั้วบวกของเซลล์ทุกเซลล์เข้าด้วยกัน และขั้วลบของเซลล์ทุกเซลล์เข้าด้วยกัน เรียกการต่อแบบนี้ว่า “การต่อแบบขนาน” นอกจากศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากขั้วอิเล็กโทรดแล้ว ความเข้มข้น ของอิเล็กโทรไลต์ภายในแบตเตอรี่ก็มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เพียงเล็กน้อย ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าโดยทั่วไปจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดจะประมาณ 2.15 โวลต์ สำหรับเซลล์นิเกิล-แคดเมียมให้ แรงดันไฟฟ้าประมาณ 1.2 โวลต์ ส่วนเซลล์ลิเทียมให้แรงดันไฟฟ้าสูงถึง 4 โวลต์

2.9.1 การทำปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในแบตเตอรี่

ปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่เป็นการรับและให้อิเล็กตรอน หรือเรียกว่า “ปฏิกิริยารีดอกซ์” ซึ่งการเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก ทำให้เกิดสภาพขาดแคลนอิเล็กตรอน แต่การรับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ ขั้วลบ ทำให้เกิดสภาพที่อุดมไปด้วยอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรไลต์หรือน้ำกรด กำมะถัน (Sulfuric acid) กับแผ่นธาตุบวก (เป็นตะกั่วออกไซด์) และแผ่นธาตุลบ (เป็นตะกั่วพูน) และ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ การคายประจุ และการอัดประจุ

- 1) การคายประจุหรือการจ่ายกระแสไฟฟ้า แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อ ขั้วบวกและขั้วลบต่อวงจรภายนอก (อุปกรณ์ไฟฟ้า) โดยที่ออกซิเจนจากแผ่นธาตุบวก จะรวมตัวกับไฮโดรเจนในกรดกำมะถันเกิดเป็นน้ำ ขณะเดียวกันจะเกิดสารประกอบที่ เรียกว่า ตะกั่วซัลเฟตหรือซีเกลือ (คราบหรือผลึกสีขาว) เช่นเดียวกับตะกั่วพูนในแผ่น ธาตุลบก็จะรวมตัวกับอนุมูลซัลเฟตจากกรดกำมะถันเกิดเป็นตะกั่วซัลเฟตเช่นกัน
- 2) การอัดประจุไฟฟ้า เครื่องประจุไฟฟ้าถูกนำมาต่อกับแบตเตอรี่โดยการต่อขั้วบวกที่ ของเครื่องประจุไฟฟ้าเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และต่อขั้วลบของเครื่องประจุ ไฟฟ้าเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่แบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะ ไหลผ่านแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ ทำให้สารประกอบตะกั่วซัลเฟตจากแผ่นธาตุ ทั้งสองออกมารวมตัวกับน้ำกลายเป็นน้ำกรดอีกครั้ง

แบตเตอรี่ขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า (คายประจุ) จะเกิดตะกั่วซัลเฟต (ซีเกลือ) ขึ้นที่แผ่นธาตุ บวกและแผ่นธาตุลบ การที่อนุภาคซัลเฟตจากกรดกำมะถันถูกใช้ไปและเกิดเป็นน้ำมาแทน ทำให้เกิดความ หนาแน่นของน้ำกรดลดลง ในทางกลับกันขณะอัดประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะแยกตะกั่วซัลเฟตจากแผ่น ธาตุโดยน้ำจะแยกตัวไฮโดรเจน และออกซิเจน อนุมูลซัลเฟตจะรวมตัวกับไฮโดรเจนกลายเป็นกรด ปฏิกิริยา จะเกิดเช่นนี้สลับไปมาจนกระทั่งแผ่นธาตุทั้งสองเสื่อมสภาพไม่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้

แบตเตอรี่ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 3-4 เท่าของแบตเตอรี่ทั่วไป เนื่องจากการจ่ายไฟต่อเนื่องได้นานกว่าด้วยอัตรากระแสเท่ากัน และการบำรุงรักษาต่ำกว่าโดยการเติมน้ำกลั่นน้อยกว่า ทั้งนี้โครงสร้างของแผ่นธาตุใหญ่และหนา ทำให้เนื้อของแผ่นธาตุหลุดร่วงได้ยากและมีความเหมาะสมสำหรับใช้งานในเขตเมืองร้อน

2.9.2 สมรรถภาพของแบตเตอรี่และคำจำกัดความ

การใช้งานแบตเตอรี่ต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับศัพท์ทางเทคนิคและความหมาย บอกให้ทราบถึงคุณสมบัติของแบตเตอรี่นั้น ๆ เพื่อประกอบการพิจารณาการเลือกใช้งานดังนี้

- 1) ประสิทธิภาพ ค่าความจุ และการประจุไฟฟ้ามากเกินไป พลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่สามารถวัดได้ในหน่วยวัตต์-ชั่วโมง หรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง คำนวณหาประสิทธิภาพของพลังงาน (energy efficiency) ได้โดยใช้สมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ทั่วไปมีค่าในช่วง 70-80%

$$e_E = \frac{E_D \times 100}{E_{CMAX}} \quad (2.7)$$

โดยที่ e_E คือ ประสิทธิภาพของพลังงาน
 E_D คือ พลังงานที่คายประจุ (วัตต์-ชั่วโมง)
 E_{CMAX} คือ พลังงานที่ต้องใช้ในการอัดประจุจนเต็มพิกัด

ส่วนค่าความจุของแบตเตอรี่ (Capacity) สามารถวัดได้ในหน่วยของแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) ประสิทธิภาพของการอัดประจุ (charge efficiency) หรืออาจเรียกว่า ประสิทธิภาพของแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah efficiency) คำนวณได้จากสมการที่ 2.8 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดจะมีค่าประมาณ 95% แต่ในแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียมจะมีค่าน้อยกว่านี้ โดยทั่วไปค่าประสิทธิภาพของพลังงานน้อยกว่าประสิทธิภาพของการอัดประจุหรือประสิทธิภาพของแอมแปร์-ชั่วโมง เนื่องจากการคายประจุของแบตเตอรี่ใช้แรงดันต่ำกว่าการอัดประจุ

$$e_{Ah} = \frac{Ah_D \times 100}{Ah_{CMAX}} \quad (2.8)$$

โดยที่ e_{Ah} คือ ประสิทธิภาพของแอมแปร์-ชั่วโมง
 Ah_D คือ แอมแปร์-ชั่วโมงของการคายประจุ
 Ah_{CMAX} คือ แอมแปร์-ชั่วโมงที่ต้องใช้ในการอัดประจุจนเต็มพิกัด

การอัดประจุหรือการคายประจุเกิน ปฏิกริยาเคมีซึ่งเกิดในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม จะเกิดก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนจากการแตกตัวของกรด

- 2) อัตราการคายประจุ (Discharge rate) และอัตราการอัดประจุ (Charge rate) จะสัมพันธ์กับความจุสูงสุด ซึ่งผู้ผลิตมักจะแสดงค่า spec rated capacity ในหน่วย Ah ที่อัตราการคายประจุจำเพาะค่าหนึ่ง ๆ อาทิ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดความจุ 200 Ah (อัตรา 10 hour rate) แสดงว่า แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นต้น กระแสที่ใช้งานนี้คำนวณโดยใช้สมการ 2.9 จากความจุของแบตเตอรี่ หารด้วยจำนวนชั่วโมง

$$I_{dis} = \frac{C}{h}$$

โดยที่ I_{dis} คือ กระแสที่จ่าย (แอมแปร์)
 C คือ ค่าความจุ (แอมแปร์-ชั่วโมง)
 h คือ เวลา (ชั่วโมง)

- 3) ความลึกของการคายประจุและการอัดประจุ ค่าดีโอดี (DOD : Depth of Discharge) เป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความจุซึ่งถูกใช้งานจากการอัดประจุเต็มพิกัด ในทางส่วนกลับของค่าดีโอดี คือ ค่าเอสโอซี (SOC : State of Charge) เป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความจุที่คงใช้งานได้ ค่าดีโอดีหรือเอสโอซีจะใช้เพื่ออ้างอิงความจุปกติ (Nominal Capacity) ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์อย่างง่ายของค่าดีโอดีและค่าเอสโอซี

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีโอดีกับค่าเอสโอซี

เอสโอซี (%SOC)	ดีโอดี (%DOD)
100	0
75	25
50	50
25	75
0	100

อย่างไรก็ตามอาจพิจารณาคล้ายแก้วน้ำที่มีน้ำอยู่ระดับหนึ่ง ซึ่งจะมีส่วนที่ว่างเปล่าหรือส่วนจะต้องเติมให้เต็ม ค่าดีโอดีและค่าเอสโอซี คือ ค่าความสูงของส่วนที่ว่างเปล่า ไม่มีน้ำในแก้วและความสูงของน้ำที่มีอยู่ในแก้ว ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ความจุที่อัตรา 10 ชั่วโมง (10 hour rate) การจ่ายกระแสจะทำให้ค่าดีโอดีมากกว่า 100% ซึ่งมีความหมายอย่างง่าย คือ แบตเตอรี่ที่มีความจุในการใช้งานได้มากกว่า 100% เมื่ออัตราการคายประจุปกติ

- 4) อัตราการคายประจุด้วยตัวเอง เป็นการสูญเสียประจุของแบตเตอรี่ ถ้าหากปล่อยทิ้งไว้ที่เปิดวงจรหรือไม่มีการจ่ายกระแสในระยะเวลาหนึ่ง เช่น แบตเตอรี่ปฐมภูมิที่ถูกวางบนชั้นจำหน่ายในร้านค้า เมื่อเวลาผ่านไปหลาย ๆ ปี จะพบว่าค่าความจุจะเหลืออยู่ไม่เท่ากับค่าความจุตั้งต้น แต่สำหรับแบตเตอรี่ทุติยภูมิอัตราการคายประจุด้วยตัวเองจะอ้างถึงด้วยเปอร์เซ็นต์ความจุที่หายไปต่อเดือน โดยตั้งต้นที่ค่าความจุเต็มพิกัดแต่ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ควบคู่ไปด้วยกัน ในหลาย ๆ กรณีค่านี้จะเป็นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 องศาเซลเซียส จากการคำนวณแบตเตอรี่ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าอัตราการคายประจุด้วยตัวเองจะมีค่าต่ำโดยอยู่ในช่วง 1-4% ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส
- 5) วงจรอายุ (Cycle Life) ความหมายของคำว่า ไซเคิล (Cycle) คือ การทำซ้ำ ๆ เพื่อการคายประจุและการอัดประจุ ซึ่งเป็นการทำงานปกติของแบตเตอรี่ ดังนั้นหนึ่งไซเคิลหรือ หนึ่งรอบเท่ากับการคายประจุหนึ่งครั้งตามด้วยการอัดประจุหนึ่งครั้ง ในวงจรอายุของแบตเตอรี่เป็นการวัดจำนวนไซเคิลของแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่สามารถทำงานเป็นปกติได้ตลอดชั่วอายุ โดยปกติทั่วไปจะพิจารณาจากจำนวนไซเคิลของการคายประจุและค่าดีโอดี รวมถึงสัดส่วนของค่าความจุก่อนที่จะลดลงไปต่อความจุตั้งต้น (ปกติใช้ค่า 80%) ซึ่งวงจรอายุขึ้นกับค่าความลึกของแต่ละไซเคิล หากทดสอบโดยการวัดที่ค่าดีโอดีสูง และค่าดีโอดีต่ำลง จากนั้นนำผลของจำนวนไซเคิลคูณด้วยค่าดีโอดี พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงความจุมีค่าเช่นเดียวกับค่าดีโอดีที่ลดลง

2.10 เครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้า

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องควบคุมประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ และโหลด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรเหมาะสมกับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 12, 24 และ 48 โวลต์ ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ 12 โวลต์ มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 14.4 โวลต์ หากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิดผลึกซิลิกอนจำนวน 36 ถึง 40 เซลล์ มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานได้ถึง 15 ถึง 18 โวลต์ (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ) ข้อจำกัดทางเทคนิคที่ต้องกำหนดให้แรงดันใช้งานต้องมากกว่าแรงดันการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ แม้ว่าอุณหภูมิจะสูงขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จะเห็นว่าแรงดันใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงพอต่อการประจุไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ แม้เกิดการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าในสายไฟและไดโอด (โดยทั่วไป 2%)

เครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าทำหน้าที่ประจุไฟฟ้า ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงในแบตเตอรี่ และควบคุมไม่ให้ประจุไฟฟ้าเกิน (overcharging) หลักการทำงานของเครื่อง คือ ตรวจจับแรงดันของแบตเตอรี่ เพื่อกำหนดสถานะการประจุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่ที่มีประจุอยู่เต็มแรงดันไฟฟ้าจะสูงขึ้น เช่น แบตเตอรี่ 12 โวลต์ เครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าจะตัดการประจุเมื่อแรงดันสูงถึง 14.4 โวลต์ และจะประจุไฟฟ้าใหม่อีกครั้งเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 13.4 โวลต์ และทำหน้าที่เบี่ยงเบนไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อแรงดันไฟฟ้ามากเกินไป หรือต่ำกว่าแบตเตอรี่จะรับได้ ส่วนการป้องกันการจ่ายย้อนกลับ

ของแบตเตอรี่ไปยังแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีไดโอดป้องกันกระแสไหลย้อนกลับ ซึ่งปกติจะมีรวมอยู่ในเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้า ตัวอย่างเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีทั่วไปแสดงรูปที่ 2.42 และสามารถสรุปหน้าที่ของเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าได้ดังนี้

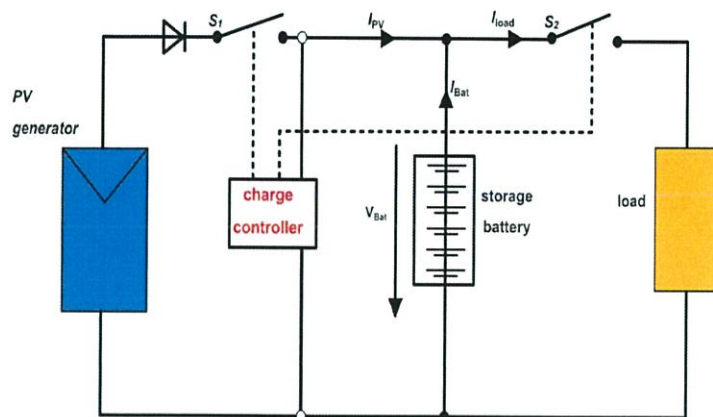
- ควบคุมให้มีการประจุไฟฟ้าที่เหมาะสม
- ป้องกันการประจุไฟฟ้าเกินกว่าแบตเตอรี่จะรับได้
- ป้องกันการคายประจ้ย้อนกลับ
- ป้องกันการคายประจุเกิน
- แสดงสถานะของแบตเตอรี่ (บางรุ่น)



รูปที่ 2.42 ตัวอย่างเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าที่มีทั่วไป

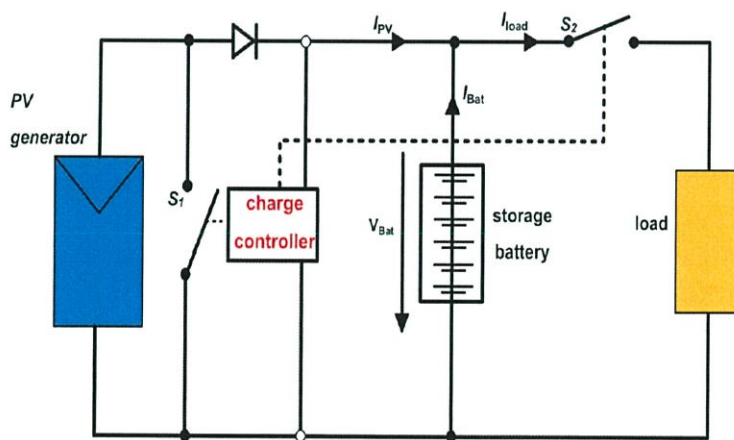
เครื่องควบคุมประจุไฟฟ้ามีอยู่ทั่วไปแบ่งได้ 4 แบบ คือ การประจุแบบอนุกรม (Series controllers) การประจุแบบขนาน (Shunt controllers/Parallel controllers) การประจุแบบป้องกันการคายประจุเกิน (Deep discharge protection) และการประจุแบบควบคุมกำลังสูงสุด (MMP charge controllers) หลักการทำงานของเครื่องควบคุมการประจุแบบต่าง ๆ มีดังนี้

- 1) เครื่องควบคุมการประจุแบบอนุกรม (Series controllers) การต่อเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม โดยจะตัดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเกินแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่รับได้ และต่อวงจรเมื่อแรงดันไฟฟาลดลง อาศัยสวิตช์ควบคุมที่เป็นแม่เหล็ก เรียกว่า รีเลย์ (Relay) หรือตัวนำสัญญาณ S_1 และหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.43 ข้อดีคือ การสั้นของสวิตช์แม่เหล็กเนื่องจากการปิด-เปิดวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า และก่อให้เกิดการสูญเสียขึ้นในระบบ ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาเครื่องควบคุมการประจุที่มีการควบคุมการทำงานต่อเนื่อง



รูปที่ 2.43 หลักการทำงานของเครื่องควบคุมประจุแบบอนุกรม

- 2) เครื่องควบคุมการประจุแบบขนาน (Shunt controllers/Parallel controllers) การต่อเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน เมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน ตัวควบคุมจะทำหน้าที่ลดกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์อย่างต่อเนื่อง การต่อแบบนี้จะปลอดภัยกับแบตเตอรี่ แต่แผงเซลล์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกระแสลัดวงจรของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์ไม่ได้จ่ายออกมา หลักการทำงานของเครื่องควบคุมการประจุแบบขนานแสดงดังในรูปที่ 2.44

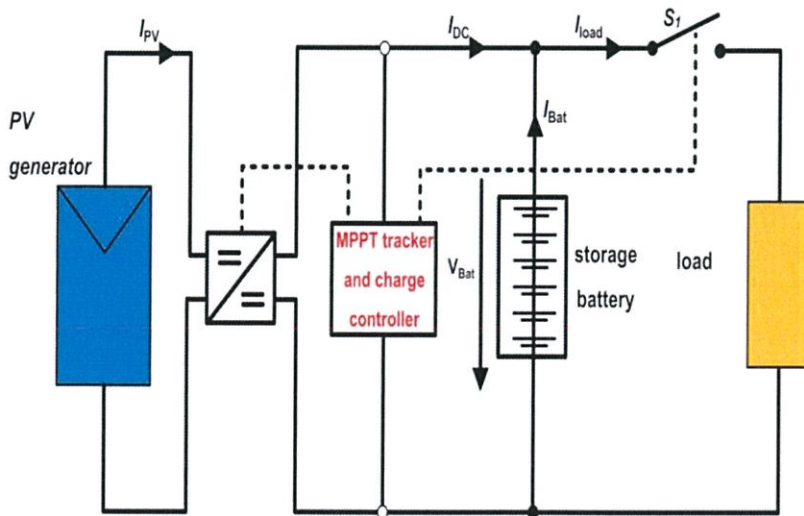


รูปที่ 2.44 หลักการทำงานของเครื่องควบคุมประจุแบบขนาน

- 3) การประจุแบบป้องกันการคายประจุเกิน (Deep discharge protection) เครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าโดยทั่วไป ป้องกันการคายประจุเกิดด้วยรีเลย์ เพื่อแยกโหลดออกจากแบตเตอรี่ดังสัญลักษณ์ S_2 ดังในรูปที่ 2.43 และรูปที่ 2.44 และสัญลักษณ์ S_1 ในรูป 2.45 ตัวอย่างเช่น แรงดันของแบตเตอรี่ลดลงต่ำกว่าแรงดันจ่ายของแบตเตอรี่เนื่องจากโหลดต้องการจ่ายกระแสสูง (ตู้เย็น) เหตุการณ์เช่นนี้ตัวควบคุมจะแยกโหลดออก และนำ

แรงดันไฟฟ้ากลับมาโดยเร็วที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปจะเพียงพอต่อการจ่ายโหลดขนาดเล็ก เครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้ารุ่นใหม่จะมีตัววัดอุณหภูมิด้วย เพื่อวัดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม และปกติเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าจะต่อกับแบตเตอรี่โดยตรง ดังนั้นอุณหภูมิของทั้งสองจึงใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณีแบตเตอรี่รับภาระโหลดมากอาจจะเกิดความร้อนขึ้น ทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องควบคุมประจุ ทั้งนี้แบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้อย่างดีจะไม่ได้รับผลกระทบนี้ การควบคุมการประจุไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการจำกัดกระแสไฟฟ้าทั้งด้านแผงเซลล์และแบตเตอรี่ ผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดความเสียหายได้ง่าย จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันด้วยการติดตั้งฟิวส์ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจำกัดจากแผงเซลล์และจากโหลดอยู่ในช่วง 5 ถึง 30 แอมแปร์ หากทำเป็นระบบขนาดใหญ่จะมีรุ่นเฉพาะหรือแบ่งระบบเป็นกลุ่มย่อย ๆ จึงทำให้ไม่เกิดภาวะทั้งระบบทำงานล้มเหลว

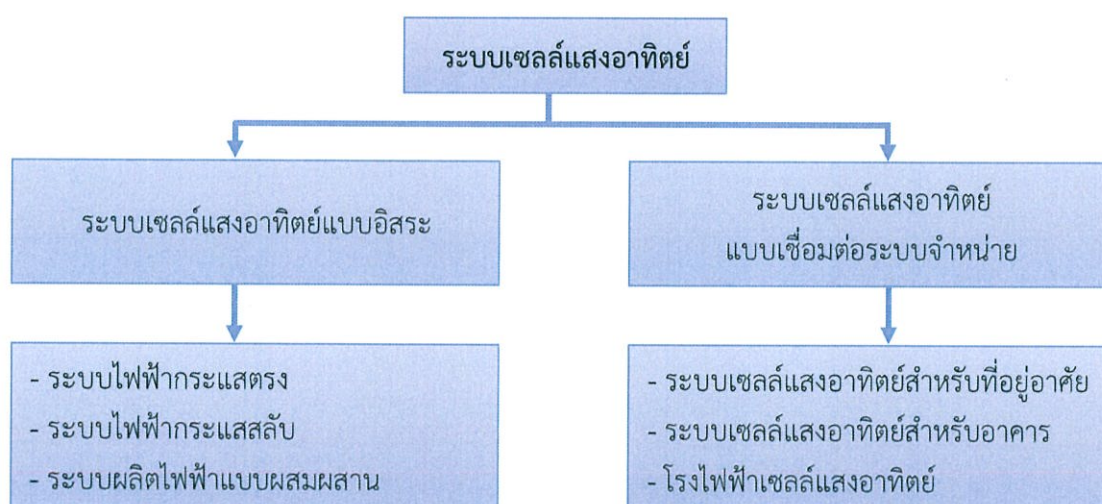
- 4) เครื่องควบคุมการประจุแบบควบคุมกำลังสูงสุด (MPPT charge controllers) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าได้ขึ้นกับความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิ ซึ่งการต่อเครื่องควบคุมการประจุและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการสูญเสียกำลัง 10-40% ทั้งนี้การหลีกเลี่ยงทำได้โดยการใช้ตัวติดตามจุดกำลังสูงสุด (MPPT : Maximum Power Point) หรือเรียกว่า MPPT (Maximum Power Point Tracker) ซึ่ง MPPT ประกอบด้วย ตัวควบคุมการแปลงกระแสไฟตรงเป็นไฟตรง และจะทำงานทุก ๆ 5 นาที เพื่อวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นำมาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จากนั้นจะมีวงจรควบคุม เพื่อปรับให้เหมาะสมกับการประจุแบตเตอรี่ โดยทั่วไปเครื่องแปลงไฟฟ้าแบบนี้มีประสิทธิภาพ 90-96% ส่วนระบบที่เหมาะสมกับการใช้ MPPT ควรมีขนาดตั้งแต่ 200 วัตต์ขึ้นไป หากระบบมีขนาดเล็กกว่านี้จะเกิดการสูญเสียในระหว่างการแปลงมากกว่าจะได้รับมา เนื่องจากวงจรมีความซับซ้อน ปัจจุบันพบว่าเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้าแบบนี้จะมีใช้ในระบบขนาดตั้งแต่ 500 วัตต์ขึ้นไป นอกจากนี้เครื่องควบคุมการประจุแบบควบคุมกำลังสูงสุดมีราคาค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.45 หลักการทำงานของเครื่องควบคุมการประจุแบบควบคุมกำลังสูงสุด

2.11 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมระบบจำหน่าย ตามลักษณะการเชื่อมต่อบริษัทจำหน่ายดังรูปที่ 2.46 ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (Stand Alone PV System) หมายถึงระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเชื่อมต่อบริษัทจำหน่ายไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กับงานเฉพาะด้านหรือเฉพาะแหล่ง โดยเฉพาะในแหล่งทุรกันดารหรือห่างไกลจากระบบจำหน่าย ซึ่งระบบจะถูกออกแบบให้ผลิตไฟฟ้าโดยมีปริมาณการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าที่จำกัด ส่วนระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่าย (Grid-Connected PV System) หมายถึง ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อวัตถุประสงค์หลายด้าน เช่น การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า การขายไฟฟ้า การลดภาระค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้า หรือการลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานอื่น รวมถึงการลดมลภาวะจากการผลิตไฟฟ้าด้วยแหล่งพลังงานอื่น เป็นต้น



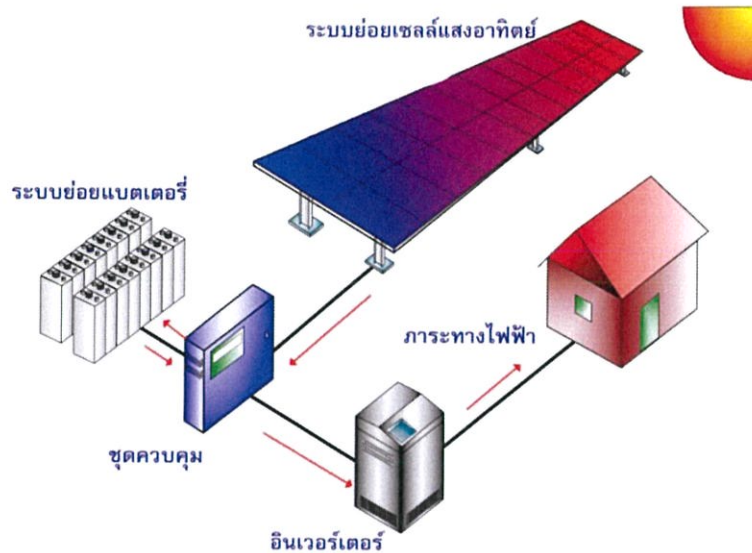
รูปที่ 2.46 ประเภทของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ สามารถจำแนกตามประเภทของสัญญาณไฟฟ้าหรือแหล่งผลิตไฟฟ้าได้ดังนี้

- 1) ระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการผลิตไฟฟ้ากระแสตรงป้อนสู่วงจรไฟฟ้า สำหรับภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ผลิตไฟฟ้ากระแสสลับป้อนสู่วงจรไฟฟ้าและหากมีแหล่งผลิตไฟฟ้าหลายแหล่งเชื่อมต่อเป็นระบบเดียวกันถูกเรียกว่า ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน เช่น ไฟฟ้าจากพลังงานลม ไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ปั่นไฟ เป็นต้น

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่ายไฟฟ้าสามารถจำแนกประเภทได้ดังนี้

- 1) ระบบผลิตไฟฟ้าติดตั้งกับตัวอาคารหรือติดตั้งตามบ้าน เช่น บนหลังคาบ้านหรืออาคาร ฝ้าของอาคาร และติดตั้งบนผนังด้านนอกอาคาร เป็นต้น
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อเป็นโรงงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.47 ส่วนประกอบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.47 โดยแต่ละส่วนประกอบมีหน้าที่ดังนี้

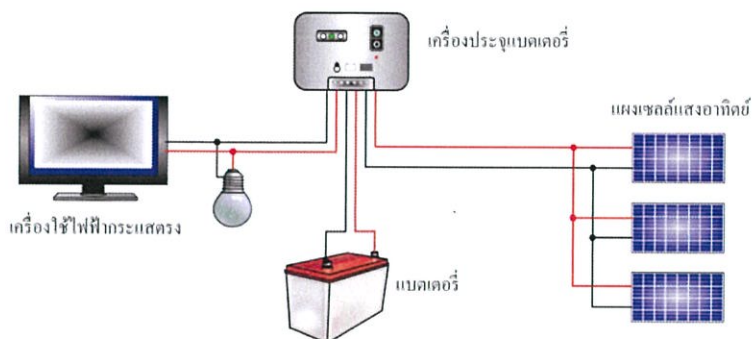
- 1) ระบบย่อยเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจเป็นแผงเซลล์เพียงแผ่นเดียว หรือหลายแผงเซลล์ต่อรวมกัน ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า
- 2) ระบบย่อยแบตเตอรี่ อาจเป็นแบตเตอรี่เพียงหนึ่งเดียวหรือแบตเตอรี่หลายชุดต่อรวมกัน ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานเคมี ทั้งนี้การเก็บสะสมพลังงานเพื่อจะจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ให้กับภาระทางไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้น้อยหรือไม่เพียงพอต่อภาระโหลด
- 3) ระบบควบคุมการประจุแบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุและควบคุมการคายประจุของแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้า เพื่อรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่
- 4) ระบบแปลงสัญญาณไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์ ในกรณีที่ภาระทางไฟฟ้าของระบบเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ จึงจำเป็นต้องมีอินเวอร์เตอร์เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

2.11.1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

ระบบผลิตไฟฟ้าประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งผลิตพลังงานหลัก และไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถจำแนกตามประเภทของสัญญาณไฟฟ้าหรือแหล่งผลิตไฟฟ้าได้ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ และระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน

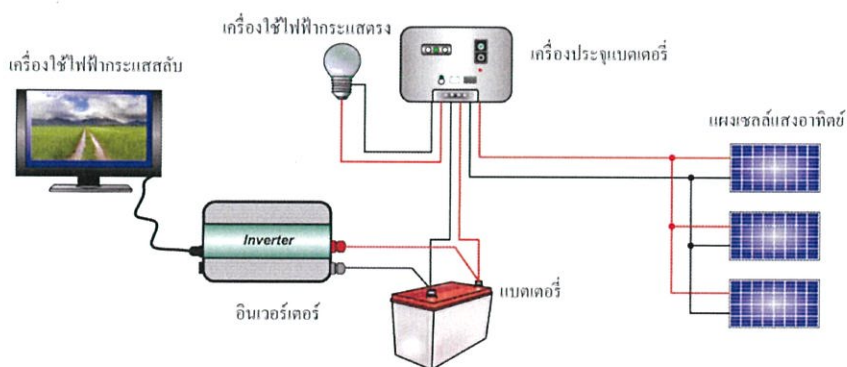
- 1) ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power System) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้แก่วงจรไฟฟ้าโดยไม่มีอุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้า แต่อาจมีอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้าประเภทอื่น เช่น หากระบบมีแบตเตอรี่ต้องมีเครื่อง

ควบคุมการประจุแบตเตอรี่รวมในระบบ หรืออาจมีเครื่องควบคุมและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้า หรือเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น โดยเครื่องใช้ไฟฟ้าในระบบต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น ตัวอย่างของระบบแสดงดังรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 ไดอะแกรมระบบไฟฟ้ากระแสตรง

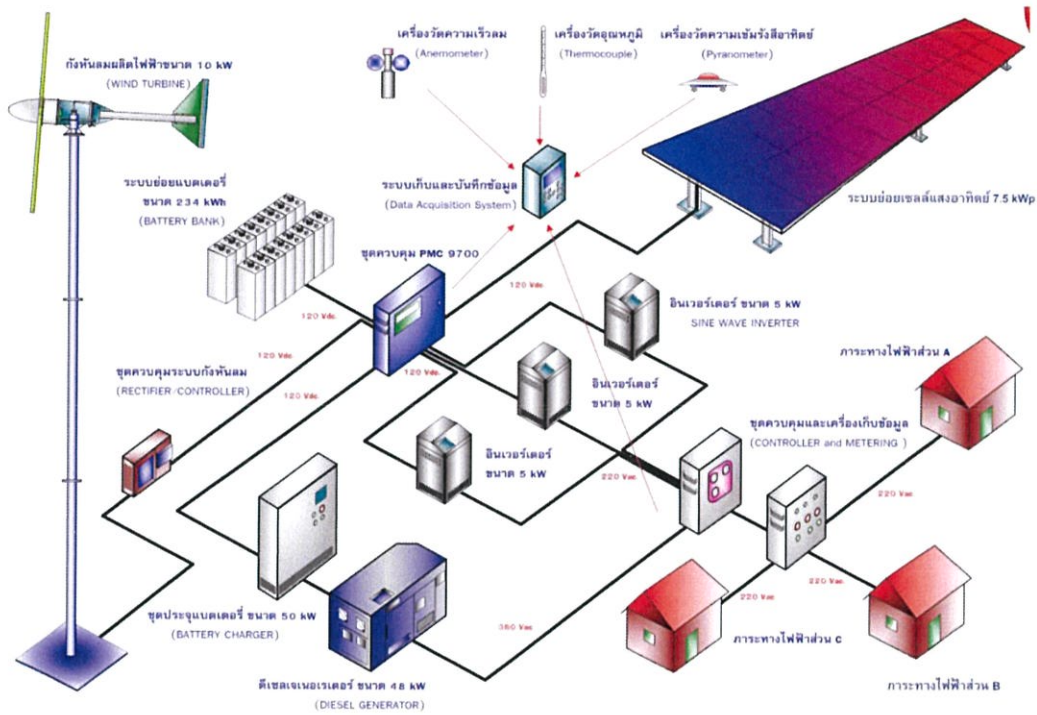
2) ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Power System) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้แก่อุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณไฟฟ้า จากกระแสตรงเป็นกระแสสลับซึ่งเรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยส่วนใหญ่จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าพร้อมทั้งควบคุมและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วย เครื่องใช้ไฟฟ้าในระบบจะเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ หรืออาจจะมีเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงร่วมอยู่ด้วยในส่วนที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนถูกแปลงโดยอินเวอร์เตอร์ ตัวอย่างไดอะแกรมของระบบแสดงดังในรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 ไดอะแกรมระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

3) ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Hybrid Power System) ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน เป็นระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกันระหว่างแหล่งพลังงานหลายแหล่ง เนื่องจากระบบที่มีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้งานเป็นระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพราะต้องลงทุนสูง ดังนั้น

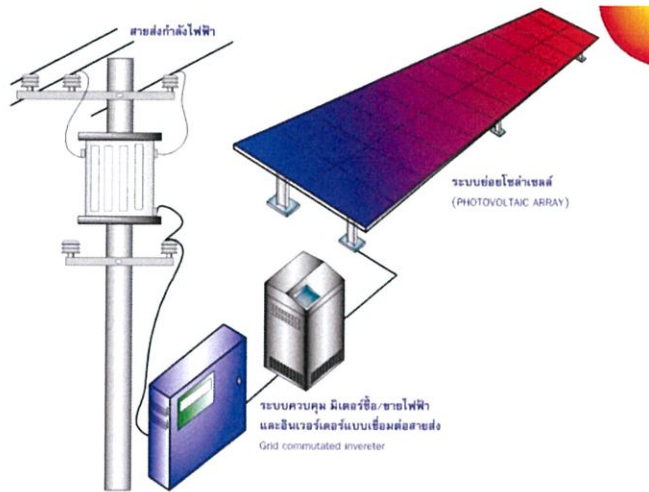
ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพ และความ เชื่อถือ ผลที่เกิดขึ้นกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน คือ ขนาดของระบบย่อยโดยเฉพาะแหล่งพลังงานในระบบลดลง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายใน การลงทุนลดลง ลักษณะระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานแสดงดังรูปที่ 2.50



รูปที่ 2.50 ไดอะแกรมระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน

2.11.2 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรณจําหนาย

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรณจําหนาย คือ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ป้อนเข้าระบบจําหนายโดยรวมทั้งใช้แบตเตอรี่สะสมพลังงานขนาดใหญ่ ให้สามารถรับพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการจ่ายภาระทางไฟฟ้าและสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้าส่วนอื่น ๆ ซึ่งเป็นการยืดเวลาในการสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงทางพานิชย์เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการใช้ หรือในช่วงเวลากลางคืนหรือในวันที่มีเมฆมาก พลังงานส่วนที่ขาดดังกล่าวสามารถดึงมาจากระบบจําหนายได้ในรูปที่ 2.51 แสดงส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรณจําหนาย



รูปที่ 2.51 ส่วนประกอบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ในปัจจุบันระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายจัดแบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายสำหรับที่อยู่อาศัย (Grid-connected PV system for residences) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายสำหรับอาคาร (Grid-connected PV system for building) และโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Power Plant)

- 1) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายสำหรับที่อยู่อาศัยซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดไม่เกิน 2 กิโลวัตต์สูงสุด บางครั้งเรียกว่า Grid commutated inverter หรือ synchronous inverter เป็นการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่แรงดันและความถี่ไฟฟ้าเดียวกับระบบจำหน่ายโดยผ่านมิเตอร์ซื้อ (debit) และมิเตอร์ขาย (credit) ซึ่งใช้วัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ซื้อหรือขายให้การไฟฟ้า
- 2) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายสำหรับอาคาร เช่น การติดตั้งด้านบนและผนังของอาคาร (PV Cladding for the roofs and walls of nondomestic building) และการติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของอาคาร (BIPV: Building-Integrated PV System) เป็นต้น ระบบเหล่านี้เป็นอีกลักษณะหนึ่งของการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอาคารที่อยู่อาศัยดังแสดงในรูปที่ 2.52 ถึงรูปที่ 2.53 แสดงตัวอย่างระบบเซลล์แสงอาทิตย์ด้านบนและผนังของอาคาร ระบบย่อยเซลล์แสงอาทิตย์สามารถยึดติด หรือวางบนพื้นที่ของหลังคา หรือผนังของอาคารทั่ว ๆ ไป ซึ่งในปัจจุบันลักษณะดังกล่าวกำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีข้อดีต่าง ๆ และความเหมาะสมในการนำไปใช้กับอาคารพาณิชย์และอาคารอุตสาหกรรม ทั้งนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถใช้แทนวัสดุที่ใช้สร้างผนังหรือวัสดุสร้างหลังคาได้ ซึ่งจะลดราคาสุทธิของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้อาคารพาณิชย์และอาคารอุตสาหกรรมมีการทำงานเป็นปกติ โดยเฉพาะช่วงเวลากลางวันจึงสามารถใช้ประโยชน์ทั้งการผลิตไฟฟ้าและแสงสว่างที่ส่องมายังภายใน

อาคารได้ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบย่อยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยึดติดอยู่กับผนังหรือหลังคาของอาคารพาณิชย์เป็นส่วนสำคัญ ในการลดค่าใช้จ่ายของบริษัท ในการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า เนื่องจากราคาค่าไฟฟ้าที่การไฟฟ้ารับซื้อจากผู้ผลิต พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าระบบจำหน่าย มีราคาสูงกว่าอัตราค่าไฟฟ้าจากการ ขาย

- 3) โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย เป็นหนึ่งในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เพื่อผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า ตัวอย่างระบบ แสดงดังรูปที่ 2.54 เป็นตัวอย่างโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 500 กิโลวัตต์ ติดตั้งที่จังหวัดแม่ฮ่องสอนของประเทศไทย



รูปที่ 2.52 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งด้านบน (ซ้าย) และผนัง (ขวา) ของอาคาร



รูปที่ 2.53 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกใช้แทนผนังอาคาร (ซ้าย) และหลังอาคาร (ขวา)



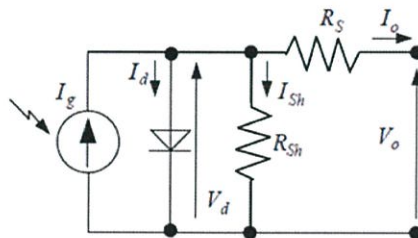
รูปที่ 2.54 โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผาบ่องที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้ทำการศึกษาการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ให้หมุนตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เพื่อให้ได้พลังงานมากที่สุด โดยมีการออกแบบระบบให้มีความเหมาะสมและคำนึงถึงต้นทุนในการสร้างระบบกลไกการหมุน และการดูแลบำรุงรักษาที่ง่าย สามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้อย่างเพียงพอ และยังสามารถควบคุมการทำงานของระบบต่าง ๆ ได้ด้วยสมาร์ตโฟนผ่านเครือข่ายไร้สาย

3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Marc, 2014) คือ กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง เมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าง่ายๆ ไปใช้งานได้ ส่วนคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ (Characteristic of the Solar) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเคลื่อนที่ของโปรตอนและอิเล็กตรอน เมื่อมีแสงตกกระทบทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจากสมการ (1) และ (2) แรงดันไฟฟ้า V_o ที่สูงขึ้นเกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงทำให้เกิดกระแส I_o ทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เมื่อต่อครบวงจร



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

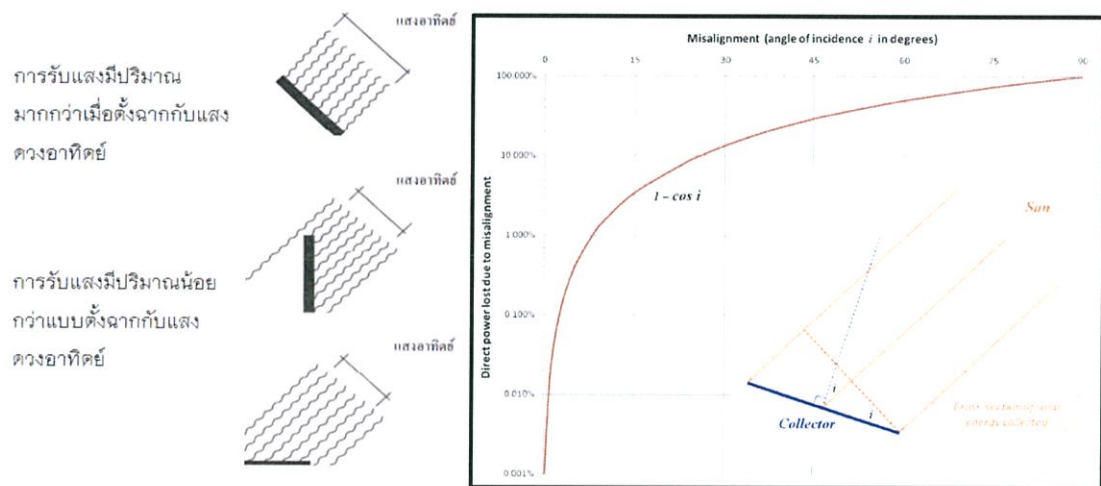
$$I_o = I_q - I_{sat} \left(e^{\frac{q}{AKT}(V_o + I_o R_s)} - 1 \right) \quad (1)$$

$$V_o = -I_o R_s + \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_q - I_o + I_{sat}}{I_{sat}} \right) \quad (2)$$

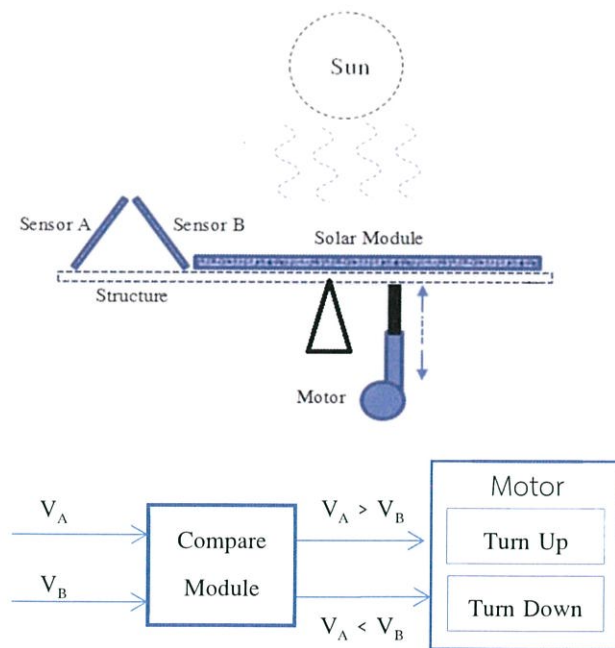
- โดยที่ I_q คือ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการกระตุ้นจากแสง
 I_{sat} คือ กระแสไหลย้อนกลับอิมิตัว
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์
 K คือ ค่าคงที่ Boltzmann
 T คือ อุณหภูมิหน่วยเคลวิน (K)

3.2 การออกแบบระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

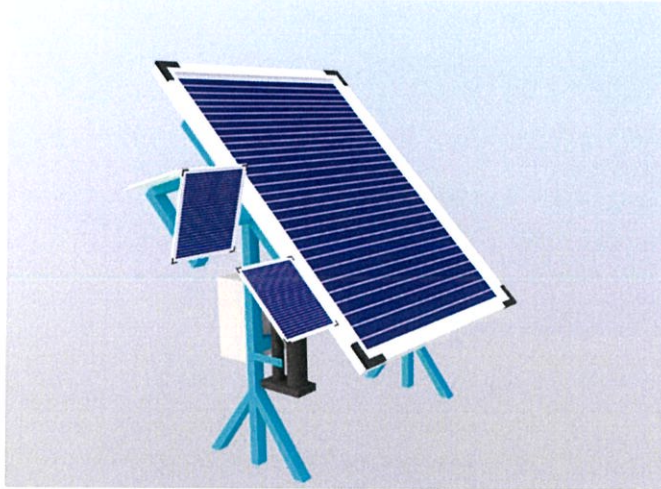
จากแนวคิดที่ต้องการให้การง่ายต่อการบำรุงรักษา และต้นทุนในการสร้างระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่มีราคาต่ำ จึงได้ออกแบบให้มีแรงดันไฟฟ้า V_0 สูงที่สุดเมื่อแสงดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module) ตามหลักการความสัมพันธ์ของผลิตไฟฟ้า คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีพลังงานไฟฟ้า 100% เมื่อการรับแสงตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ (William, 2013) ซึ่งจากหลักการนี้จึงได้นำมาออกแบบระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การรับแสงของดวงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.3 หลักการออกแบบระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์



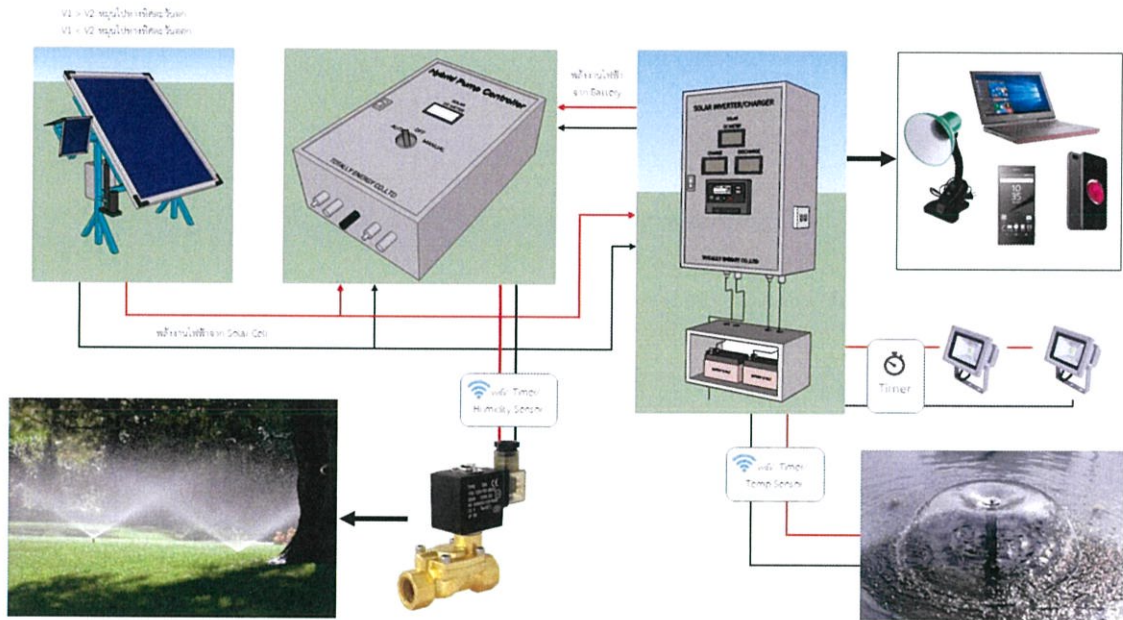
รูปที่ 3.4 โครงสร้างและการติดตั้งระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.3 หลักการทำงานของระบบตรวจจับดวงอาทิตย์ จะอาศัยการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่ทำหน้าที่ตรวจจับดวงอาทิตย์ กล่าวคือระบบจะประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก 2 แผง ขนาด 5W 12V วางทำมุม 60 องศา, โมดูลเปรียบเทียบแรงดัน (Compare Module) และ วงจรขับมอเตอร์เพื่อดันให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นลง ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กตามรูปเป็น sensor A และ sensor B วางทำมุม 60 องศา ทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้าจากการรับแสงจากดวงอาทิตย์ ทั้งสองเซลล์จะผลิตแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากัน เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแผ่นวางทำมุมตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ ด้วยหลักการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแผง sensor A (V_A) และ sensor B (V_B) ใช้หลักการเปรียบเทียบแรงดันและส่งสัญญาณไปยังวงจรขับมอเตอร์ที่เป็นแบบมอเตอร์เกียร์กันชัก ทำหน้าที่ดันให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นลงตามแรงดันไฟฟ้า จึงทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ปรับเคลื่อนที่หันที่เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนไปตามรูปที่ 3.3 โดยโครงสร้างของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แสดงให้เห็นตามรูปที่ 3.4 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าแผงขนาดเล็กอีก 1 แผง เพื่อชาร์จไฟให้กับแบตเตอรี่ที่จะใช้สำหรับวงจรขับมอเตอร์ที่เป็นแบบมอเตอร์เกียร์กันชัก ในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดดสำหรับการหมุนกลับของแผงเซลล์อาทิตย์เพื่อรอรับแสงในเช้าวันถัดไป

3.3 ออกแบบระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.6 หลักการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีตู้ควบคุมอยู่ 3 ตู้ ซึ่งประกอบด้วย ตู้ควบคุมการหมุนแผงโซลาร์เซลล์ตามดวงอาทิตย์ ตู้ควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบไฮบริด และ ตู้ควบคุมวาล์วน้ำแบบไฮบริด ตู้ควบคุมวาล์วน้ำแบบไฮบริดจะเป็นจุดเชื่อมต่อสายไฟจุดแรกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และควบคุมการทำงานของวาล์วน้ำที่ เปิด-ปิด สปริงเกอร์ โดยสามารถควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน ได้ทั้งแบบแมนนวลและแบบอัตโนมัติ ซึ่งในแบบอัตโนมัติจะมีเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดค่าความชื้นของพื้นดินเพื่อนำมาเป็นตัวบ่งชี้ในการเปิด-ปิดวาล์วน้ำ ส่วนตู้ควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบไฮบริดเป็นตู้ที่ใช้แปลงพลังงานไฟฟ้าแบบกระแสตรง (24 VDC) เป็นกระแสสลับ (220 VAC) เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และยังควบคุมการชาร์จพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ซึ่งจะมีคอนโทรลชาร์จโซลาร์

เซลล์เป็นตัวควบคุมการชาร์จไฟจากแผงโซลาร์เซลล์สู่อินเวอร์เตอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Over charge รวมไปถึงการควบคุมการทำงานของน้ำพุและไฟสปอร์ตไลท์อีกด้วย โดยสามารถควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนได้ทั้งแบบแมนนวลและแบบอัตโนมัติ ซึ่งในแบบอัตโนมัติจะมีเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิเพื่อนำมาเป็นตัวควบคุมในการเปิด-ปิด สวิตซ์การทำงานของน้ำพุอีกด้วย

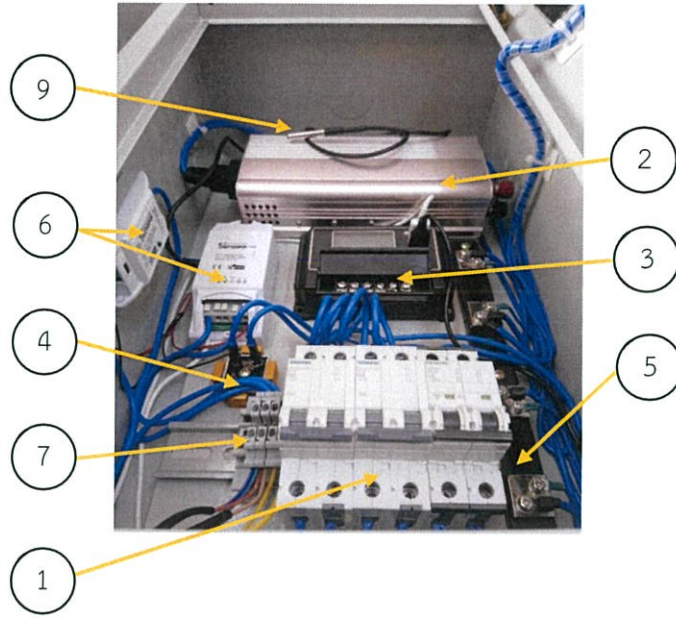


รูปที่ 3.6 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

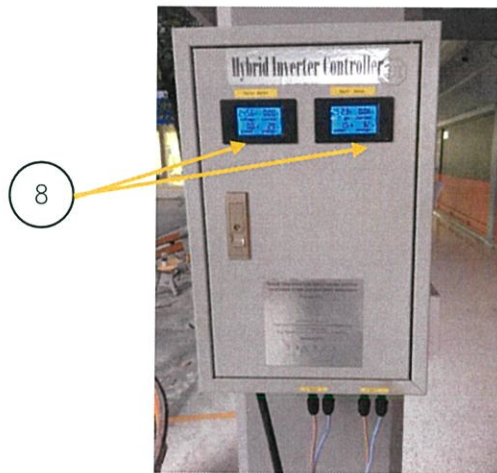
3.4 ออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์และการวางระบบสายไฟภายในตู้ควบคุม

การออกแบบตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้ควบคุม เพื่อจัดการกับการวางระบบสายไฟภายในตู้ให้เหมาะสม และเป็นการจัดการพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เพียงพอต่ออุปกรณ์ที่ต้องใช้ในระบบทั้งหมด ซึ่งอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่ใช้ประกอบไปด้วย

1. เซอร์คิตเบรกเกอร์ 2 โพล 3 ตัว
2. อินเวอร์เตอร์
3. คอนโทรลชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์
4. ไดโอด
5. R shunt ใช้วัดกระแสไฟฟ้า DC
6. Wi-Fi smart switch
7. เทอร์มินอลบล็อก
8. จอแสดงผลของมิเตอร์
9. เทอร์โมคัปเปิ้ล



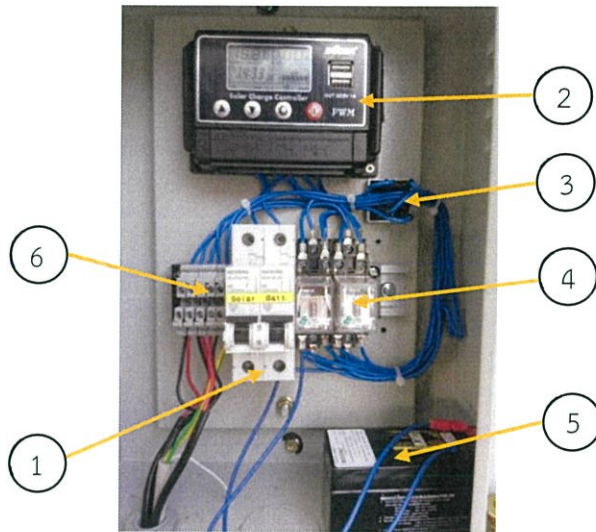
รูปที่ 3.8 การจัดวางอุปกรณ์และการวางระบบสายไฟภายในตู้ควบคุมอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.9 การจัดวางอุปกรณ์หน้าตู้ควบคุมอินเวอร์เตอร์

อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมการหมุนตามดวงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ประกอบไปด้วย

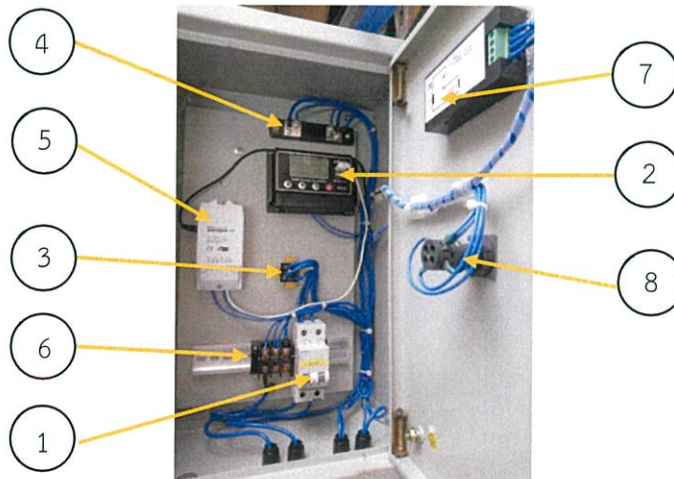
1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ 1 โพล 2 ตัว
2. คอนโทรลชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์
3. ไดโอด
4. Relay 12 VDC
5. แบตเตอรี่ 12 V 1.2 AH/20HR
6. เทอร์มินอลบล็อก



รูปที่ 3.10 การจัดวางอุปกรณ์และการวางระบบสายไฟภายในอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมการหมุนตามดวงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมโซลีนอยด์วาล์วแบบไฮบริดที่ใช้ประกอบไปด้วย

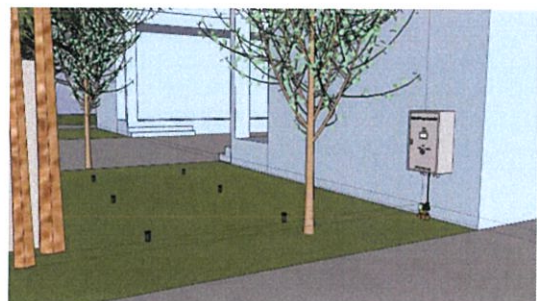
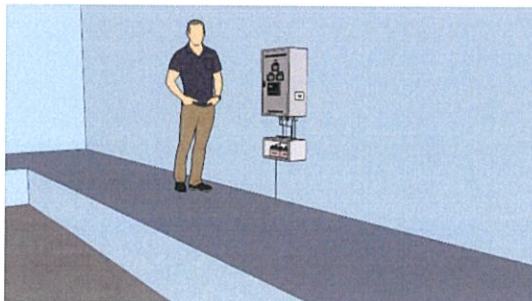
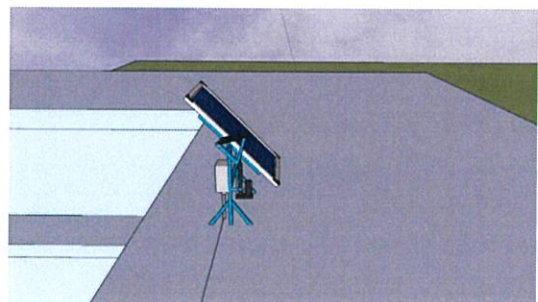
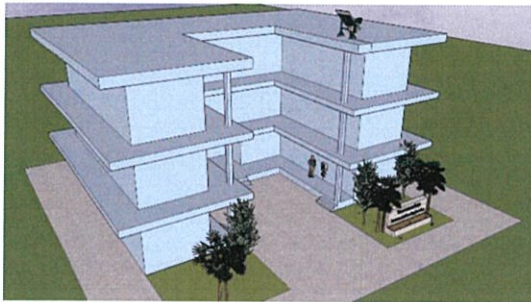
1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 โพล 1 ตัว
2. คอนโทรลชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์
3. ไดโอด
4. R shunt ใช้วัดกระแสไฟฟ้า DC
5. Wi-Fi smart switch
6. เทอร์มินอลบล็อก
7. จอแสดงผลของมิเตอร์ (ติดอยู่หน้าหน้าตู้ควบคุม)
8. ซีล็คเตอร์สวิตช์



รูปที่ 3.10 การจัดวางอุปกรณ์และการวางระบบสายไฟภายในอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมการหมุนตามดวงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.5 ออกแบบการติดตั้งระบบปรับแสงโซล่าเซลล์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ

การออกแบบการติดตั้งระบบปรับแสงโซล่าเซลล์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ เป็นการวางระบบสายไฟจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังตู้ควบคุมต่าง ๆ และอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สเปคโตรไลท์ น้ำพุ และโซลินอยด์ รวมถึงการวางระบบท่อน้ำของสปริงเกอร์ด้วย



รูปที่ 3.11 ภาพสเก็ทออกแบบตำแหน่งการติดตั้งระบบ

3.6 ติดตั้งระบบปรับแสงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ

ระบบปรับแสงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เลือกติดตั้งบริเวณที่เป็นพื้นที่โล่งไม่มีเงาของต้นไม้มาบดบังแสงแดด เลือกติดตั้งตู้ควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบไฮบริดบริเวณที่ร่ม และสามารถนำอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ มาใช้งานได้ง่าย



รูปที่ 3.12 ติดตั้งระบบปรับแสงโซล่าเซลล์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ และระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ

3.7 ทดสอบการทำงานของระบบปรับแสงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ

1. การทดสอบการใช้งานระบบปรับแสงเซลล์แสงอาทิตย์ตามดวงอาทิตย์โดยการใช้มือ หรือ กระดาษมาบังแสงแดด เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากแผง sensor A กับ sensor
2. ทดสอบการทำงานของระบบอัจฉริยะผ่านสมาร์ทโฟน โดยให้ตัว Module Wi-Fi smart switch เชื่อมต่อสัญญาณอินเทอร์เน็ตจาก router Wi-Fi หรือ Hotspot ที่แชร์ผ่าน เครือข่าย 3G หรือ 4G

บทที่ 4

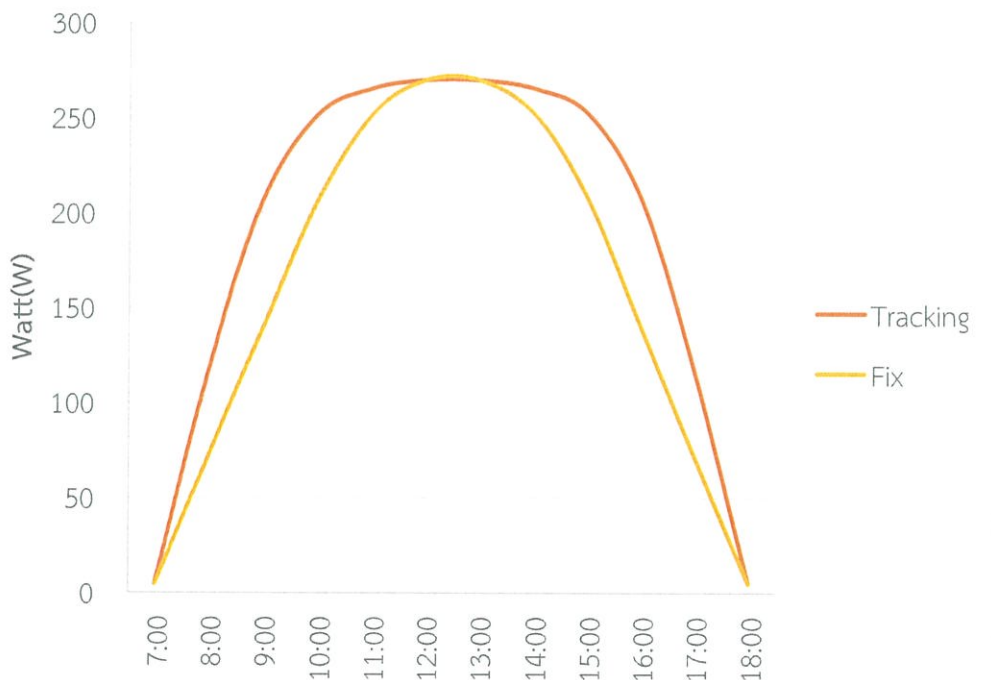
ผลการดำเนินงาน

จากบทที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงการออกแบบระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามดวงอาทิตย์ และการนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ โดยสามารถควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ โดยสมาร์ตโฟนที่มีการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

4.1 ผลการทดสอบ

4.1.1 การทดสอบการใช้งานระบบปรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามดวงอาทิตย์

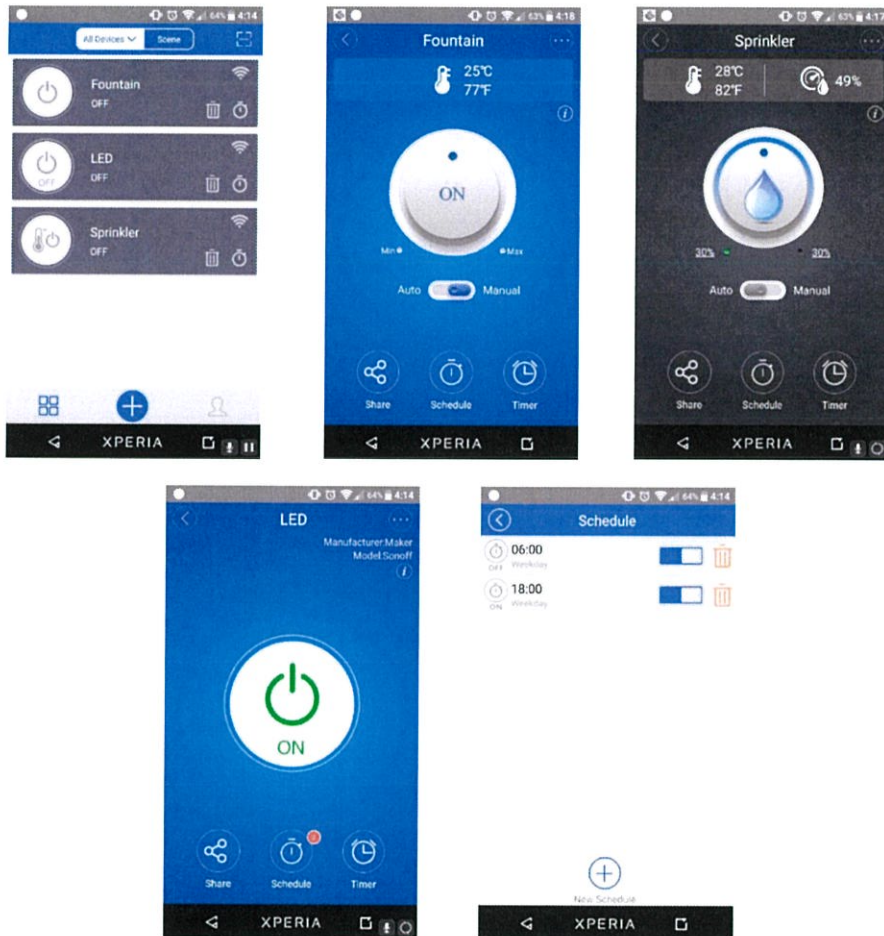
จากการทดสอบระบบการปรับแผงหมุนตามดวงอาทิตย์ โดยการวัดพลังงานไฟฟ้าแบบตลอดเวลาจากเครื่องวัดไฟฟ้าของการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โพลีซิลิกอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell) พบว่า การผลิตไฟฟ้าต่อ 1 แผงมีพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นมากกว่า 20% ในช่วงเช้าเท่ากันในช่วงเที่ยงและมีค่าผลิตไฟฟ้าในช่วงบ่ายที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 15% เช่นกัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.1 สำหรับค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 215.6 W เมื่อติดตั้งแบบมีการปรับแผงหมุนตามดวงอาทิตย์ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 15.6 % เมื่อเปรียบเทียบกับแบบติดตั้งแผงเซลล์อาทิตย์แบบคงที่มุม 15 องศา



รูปที่ 4.1 พลังงานไฟฟ้าแบบการปรับแผงหมุนตามดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับแบบติดตั้งแผงเซลล์อาทิตย์แบบคงที่มุม 15 องศา

4.1.2 การทดสอบการทำงานของระบบอัจฉริยะผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน

จากการทดสอบการทำงานของระบบอัจฉริยะผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน สามารถใช้งานได้ตามฟังก์ชันที่ต้องการ โดยมีทั้งหมดแมนนวล อัตโนมัติ รวมถึงการตั้งเวลา



รูปที่ 4.2 แสดงการทำงานของแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลจากการดำเนินการ ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน รวมทั้งข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เพื่อให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงตามที่ตั้งเป้าหมายไว้

5.1 สรุปผล

การออกแบบระบบการปรับแสงตามดวงอาทิตย์ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีต้นทุนการสร้งน้อยกว่า 5,000 บาท ในการควบคุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 แผงตามรูปที่ 3.4 ซึ่งนับว่ามีราคาที่ถูกมากซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของงานโครงการนี้คือต้นทุนราคา ระบบต่ำ โครงสร้างไม่ซับซ้อน การบำรุงรักษาง่าย และมีประสิทธิภาพการทำงานค่อนข้างดี ซึ่งจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า 15.6% โดยเฉลี่ยของแต่ละวัน จึงทำให้ได้รับประโยชน์จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดใช้ในงานระบบฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm) (Drishti, 2014) ภาคการเกษตรหรือฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ห่างไกลจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่อีกด้วย หากพิจารณาถึงต้นทุนในการสร้ง นับว่าเป็นระบบการปรับแสงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามดวงอาทิตย์นี้มีความเที่ยงตรงในการหมุนตามดวงอาทิตย์ และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพแผงได้ เมื่อเทียบกับระบบแผงแสงอาทิตย์แบบยึดคงที่

ทั้งนี้การใช้งานของระบบอัจฉริยะผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์โฟน สามารถใช้งานได้ตามฟังก์ชันที่ต้องการ เช่น การตั้งค่าเวลาให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ทำงาน การใช้งานในโหมดอัตโนมัติก็สามารถใช้ได้ตรงตามความการ คือ การนำเซ็นเซอร์ตรวจอุณหภูมิและเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นมาเป็นตัวควบคุมการทำงาน ซึ่งทำให้สะดวกสบายต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน

5.2 ปัญหาและวิธีการแก้ไขปัญหา

5.2.1 ปัญหาที่พบ

- 1) ไม่นัดการใช้งานอุปกรณ์งานช่างบางชนิด หรือใช้เป็นแต่ก็ยังไม่เข้า
- 2) ไม่สามารถสั่งการทำงานของระบบผ่านสมาร์โฟนได้ เมื่อโมดูล Wi-Fi smart switch ไม่ได้เชื่อมต่อสัญญาณอินเทอร์เน็ต
- 3) ความรู้ที่ศึกษามายังไม่เพียงพอต่อการทำงาน

5.2.2 วิธีการแก้ไขปัญหา

- 1) ฝึกทักษะการใช้เครื่องมือช่างบ่อย ๆ จนเกิดความชำนาญ
- 2) ใช้การตั้งค่าเวลาให้ระบบทำงาน โดยตัวโมดูล Wi-Fi smart switch จะมีแบตเตอรี่ Backup ข้อมูลอยู่แล้ว ก็จะสามารถทำงานได้ตามเวลาที่เรากำหนด
- 3) ศึกษาหาข้อมูลที่ใช้ในการทำรายงาน เพื่อให้เข้าใจและทำงานได้อย่างถูกต้อง

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบระบบการปรับแสงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามดวงอาทิตย์ ต้องมีการศึกษาและทำความเข้าใจการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่นำมาใช้กับโครงงาน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ ไดโอด รีเลย์ ซีล็กเตอร์สวิตช์ และอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น เพื่อให้ง่ายต่อการเขียนวงจรไฟฟ้าและการทำงานของระบบมากขึ้น เพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554). *หลักสูตรเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [2] Kagermann, H., W. Wahlster and J. Helbig, eds., (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industries 4.0*: Final report of the Industries 4.0 Working Group
- [3] Marc Köntges et al. (2014). *Review of Failures of Photovoltaic Modules External final report IEA-PVPS* Institute for Solar Energy Research Hamelin.
- [4] William David Lubitz. (2011). *Effect of Manual Tilt Adjustments on Incident Irradiance on Fixed and Tracking Solar Panels*, *Applied Energy*, Volume 88 (2011), pp. 1710-1719

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวอัจฉรา พาสุวรรณ

วัน เดือน ปีเกิด 9 เมษายน 2538

ที่อยู่ 49 หมู่ 4 ต.กุดเค้า อ.มัญจาคีรี จ.ขอนแก่น 40160

E-mail atchara.phasuwan@hotmail.com

โทรศัพท์ 09 4483 0436

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2553 - 2556 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมัธยมศึกษา จ.ขอนแก่น
- พ.ศ. 2557 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนก Instrument Engineer บริษัท ทีทีซีแอล จำกัด (มหาชน)
- นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา บริษัท โททอลลี เอ็นเนอร์ยี จำกัด