

SAC-01-032

การพัฒนานวัตกรรมผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ในระบบผลิตไฟฟ้าจาก พลังงานแสงอาทิตย์

Development of an Innovative Cleaning Product for Solar Panels in Photovoltaic (PV) Power Generation Systems

วันชัย ศรีเจียม^{1*} และ ปาลิดา ศรีสรกำแพง²

Wanchai Srijerm^{1*} and Palida Srisornkompon²

หลักสูตรบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมธุรกิจและการจัดการ คณะบริหารธุรกิจ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์¹

คณะบริหารธุรกิจ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์²

Master of Business Administration Program in Business Innovation and Management, Faculty of Business Administration,

Panyapiwat Institute of Management¹

Faculty of Business Administration, Panyapiwat Institute of Management²

e-mail: wanchaisrij@cpretailink.co.th¹, palidasri@pim.ac.th²

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการใช้งานและประเมินผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพการทำความสะอาดของผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ยี่ห้อโซล่าการ์ด ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมุ่งเน้นการขจัดคราบสกปรก คราบน้ำ คราบต่าง มูลนก และคราบฝังแน่นบนผิวแผงโซลาร์เซลล์ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวแผง ชั้นเคลือบ หรือ ส่วนประกอบของแผงโซลาร์เซลล์ การวิจัยใช้รูปแบบกึ่งทดลอง เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างวิธีล้างแบบเดิมกับวิธีล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์โซล่าการ์ด กลุ่มตัวอย่างคือร้านสะดวกซื้อที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 30 สาขา โดยวิธีคัดเลือกแบบเจาะจง เก็บข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างจากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย ส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติ Paired Sample t-test ผลการวิจัยพบว่า การล้างแผงโซลาร์เซลล์ช่วยเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งสองวิธี โดยค่าเฉลี่ยหลังล้างด้วยวิธีเดิมเท่ากับ 18.67 kWh และวิธีใช้ผลิตภัณฑ์โซล่าการ์ดเท่ากับ 19.80 kWh ขณะที่ผลต่างค่าเฉลี่ยของวิธีเดิมเท่ากับ 4.36 kWh และวิธีใช้ผลิตภัณฑ์เท่ากับ 5.49 kWh ผลการทดสอบพบว่าผลต่างของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากวิธีใช้ผลิตภัณฑ์สูงกว่าวิธีเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($t = 9.93, p < .001$). สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์โซล่าการ์ดมีประสิทธิภาพในการล้างแผงโซลาร์เซลล์ในสภาพหน้างานจริง และสามารถนำไปใช้สนับสนุนการกำหนดมาตรฐานการปฏิบัติงานสำหรับงานบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์ได้

คำสำคัญ: โซลาร์เซลล์ ผลิตภัณฑ์ล้างแผงโซลาร์เซลล์ การทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ พลังงานไฟฟ้า

Abstract

This study evaluated the effectiveness of Solarguard, a solar panel cleaning product for photovoltaic systems. The product removes dirt, water stains, mineral deposits, bird droppings, and persistent stains without damaging panel surfaces, protective coatings, or other components. A quasi-experimental design compared conventional cleaning with Solarguard cleaning. The sample comprised 30 convenience store branches with photovoltaic systems selected through purposive sampling. Electricity generation data before and after cleaning were collected from inverter monitoring systems and analyzed using mean, standard deviation, and paired-samples t-test. The findings showed that both cleaning methods increased electricity generation after cleaning. The average energy yield after conventional cleaning was 18.67 kWh, while that after Solarguard cleaning was 19.80 kWh. The mean difference of the conventional method was 4.36 kWh, whereas that of the Solarguard method was 5.49 kWh. The Paired Sample t-test indicated that the Solarguard method produced a significantly higher improvement in electricity generation than the conventional method at the .05 level ($t = 9.93, p < .001$). The findings suggest that

Solarguard is effective for cleaning solar panels under real field conditions and can support the development of standard operating procedures for photovoltaic system maintenance.

Keywords: Photovoltaic Cell, Solar Panel Cleaning Product, Solar Panel Cleaning, Electricity Generation

บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ Photovoltaic Power Generation System เป็นเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนที่มีบทบาทสำคัญต่อการลดต้นทุนพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และการสนับสนุนแนวทางการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในกลุ่มอาคารพาณิชย์ โรงงานอุตสาหกรรม ห้างสรรพสินค้า และร้านค้าปลีกที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง การติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์จึงเป็นทางเลือกสำคัญที่ช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในระยะยาว และสอดคล้องกับเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมขององค์กร ทั้งนี้ สำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency [IEA], 2024a) รายงานว่าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีอัตราการเติบโตสูงที่สุดของโลก และมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานในหลายประเทศ

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของแผงโซลาร์เซลล์หรืออุปกรณ์ประกอบเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม ลักษณะการติดตั้ง และการบำรุงรักษาระบบอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะการสะสมของคราบสกปรกบนพื้นผิวแผงโซลาร์เซลล์ (Soiling) เช่น ฝุ่นละออง คราบน้ำ คราบแร่ มูลนก เศษใบไม้ เหม่า และมลพิษจากพื้นที่เมืองหรือพื้นที่อุตสาหกรรม คราบดังกล่าวทำหน้าที่บดบังและลดการส่งผ่านของรังสีแสงอาทิตย์เข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบสามารถผลิตได้ลดลง รวมถึงอาจทำให้การประเมินสมรรถนะของระบบคลาดเคลื่อนและกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานในระยะยาว (IEA PVPS, 2022a; IEA PVPS, 2022b) แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดผลกระทบจากการสะสมสิ่งสกปรกบนแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งอธิบายว่า เมื่อฝุ่นและคราบสกปรกสะสมอยู่บนพื้นผิวแผง ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้าสู่เซลล์จะลดลง ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และผลผลิตพลังงานของระบบลดลง โดยระดับความสูญเสียขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งสกปรก สภาพภูมิอากาศ ฤดูกาล มุมเอียงของแผง ตลอดจนความถี่ในการทำความสะอาด (IEA PVPS, 2022b)

ในทางปฏิบัติ การทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์โดยทั่วไปสามารถใช้น้ำสะอาดร่วมกับอุปกรณ์ที่มีความอ่อนนุ่ม เช่น ฟองน้ำ หรือแปรงขนนุ่ม โดยควรใช้แรงดันน้ำในระดับที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อกระจก ชั้นเคลือบ และรอยต่อของแผง อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำสะอาดเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับการขจัดคราบที่ยึดเกาะแน่นบางประเภท เช่น คราบน้ำ คราบแร่ มูลนก และคราบฝังแน่น จึงอาจจำเป็นต้องใช้สารทำความสะอาดชนิดอ่อนที่ไม่กัดกร่อนและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (First Solar, 2017; Kärcher, n.d.)

นอกจากนี้ การใช้สารเคมีทั่วไปที่ไม่ได้ออกแบบมาเฉพาะสำหรับแผงโซลาร์เซลล์อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อพื้นผิวกระจก ชั้นเคลือบ ขอบยาง หรือส่วนประกอบอื่นของแผงโซลาร์เซลล์ แนวคิดด้านการเลือกใช้อุปกรณ์ทำความสะอาดเฉพาะทางจึงได้รับความสนใจมากขึ้น โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการขจัดคราบสกปรกควบคู่กับการรักษาคุณสมบัติและความปลอดภัยต่ออุปกรณ์จากปัญหาดังกล่าว จึงนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ยี่ห้อโซล่าการ์ด ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มุ่งเน้นการขจัดคราบสกปรกบนพื้นผิวแผงโซลาร์เซลล์ โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการทำความสะอาด ความปลอดภัยต่อพื้นผิวแผง ความสะดวกในการใช้งาน และความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในพื้นที่ปฏิบัติงานจริง การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งทดสอบการใช้งานและประเมินผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว โดยเปรียบเทียบกับวิธีล้างแบบเดิม และใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณ เพื่อสะท้อนผลลัพธ์ของการทำความสะอาดอย่างเป็นรูปธรรม

การทบทวนวรรณกรรม

1. ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือระบบโฟโตโวลตาอิก เป็นระบบที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งผลิตจากวัสดุกึ่งตัวนำ เมื่อโฟตอนจากแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเคลื่อนที่และเกิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจึงส่งผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้งานได้ ประสิทธิภาพของระบบจึงขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวแผงและความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์ประกอบด้วยชนิดและคุณภาพของแผง อุณหภูมิของเซลล์ ทิศทางและมุมเอียงในการติดตั้ง เงาบัง สภาพอากาศ และความสะอาดของพื้นผิวแผง โดยเฉพาะอุณหภูมิที่สูงกว่าระดับมาตรฐานอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ารวมลดลง ขณะที่เงาบังและ

สิ่งสกปรกบนผิวแผงจะลดปริมาณแสงที่เข้าสู่เซลล์ ส่งผลให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ไม่เต็มศักยภาพ ดังนั้น การบำรุงรักษาและการทำความสะอาดพื้นผิวแผงอย่างเหมาะสมจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของการรักษาสรรถะระบบในระยะยาว (International Energy Agency, 2024b)

2. ผลกระทบของคราบสกปรกต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า

คราบสกปรกบนพื้นผิวแผงโซลาร์เซลล์ หรือ Soiling หมายถึงการสะสมของฝุ่นละออง คราบน้ำ คราบแร่ มูลนก เศษใบไม้ เหม่า และมลพิษจากสภาพแวดล้อม คราบดังกล่าวทำหน้าที่เป็นสิ่งกีดขวางการส่งผ่านของแสงอาทิตย์เข้าสู่เซลล์ ทำให้จำนวนโฟตอนที่กระทบเซลล์ลดลงและส่งผลให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลง โดย IEA Photovoltaic Power Systems Programme ระบุว่า คราบสกปรกเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการสูญเสียพลังงานในระบบโซลาร์เซลล์ โดยมีระดับความสูญเสียแตกต่างกันตามสภาพภูมิอากาศ ปริมาณฝุ่น มลพิษ ฤดูกาล และลักษณะการติดตั้งแผง ค่าเฉลี่ยการสูญเสียพลังงานจากคราบสกปรกอาจอยู่ประมาณร้อยละ 3-5 ต่อปี และอาจสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีฝุ่นสะสมมากหรือมีสภาพอากาศแห้งแล้ง (IEA PVPS, 2022b) และการสะสมของคราบสกปรกอย่างไม่สม่ำเสมออาจทำให้เกิดความร้อนเฉพาะจุด หรือ Hot Spot บนแผงโซลาร์เซลล์ เนื่องจากบางส่วนของเซลล์ได้รับแสงน้อยกว่าส่วนอื่น ส่งผลให้เซลล์บริเวณดังกล่าวทำงานผิดปกติ มีอุณหภูมิสูงขึ้น และอาจเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของแผงในระยะยาว คราบสกปรกยังทำให้การประเมินสมรรถนะของระบบ เช่น ค่า Performance Ratio คลาดเคลื่อน หากไม่ได้แยกผลกระทบจากคราบสกปรกออกจากปัจจัยด้านอุปกรณ์และสภาพแวดล้อม (IEA PVPS, 2022a)

3. แนวทางการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์

แนวทางของ First Solar (2017) ระบุว่า การทำความสะอาดแผงด้วยวิธีหรืออุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโมดูล กระจก ชันเคลือบ ซิลิโคน หรือส่วนประกอบทางไฟฟ้า โดยเฉพาะในกรณีที่แผงมีรอยแตกร้าวหรือความเสียหายเดิมอยู่แล้ว จึงควรใช้แรงดันน้ำที่เหมาะสม หลีกเลี่ยงวัสดุขัดถูที่แข็ง และดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดด้านความปลอดภัย ทั้งนี้การใช้สารเคมีทั่วไปที่ไม่ได้ออกแบบสำหรับแผงโซลาร์เซลล์อาจทำให้เกิดคราบตกค้าง การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวกระจก หรือความเสียหายต่อชั้นเคลือบและซิลิโคนของแผง ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ควรสามารถชะล้างออกได้ง่าย ไม่ทิ้งฟิล์มหรือสารตกค้าง ไม่เพิ่มโอกาสในการเกาะตัวของฝุ่นหลังการทำความสะอาด และไม่ทำให้ผิวแผงโซลาร์เซลล์ เกิดความเสียหาย (Kärcher, n.d.)

4. คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ล้างแผงโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสม

ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมควรพิจารณาคุณสมบัติอย่างน้อย 5 ด้าน ได้แก่ ประสิทธิภาพ การจัดการคราบ ความปลอดภัยต่อวัสดุของแผง การไม่ทิ้งคราบตกค้าง ความสะดวกในการใช้งานภาคสนาม และความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน โดย 1) ผลิตภัณฑ์ควรสามารถจัดการกับคราบที่พบในสภาพการใช้งานจริง เช่น ฝุ่น คราบน้ำ คราบแร่ มูลนก เหม่า และคราบฝังแน่น โดยไม่จำเป็นต้องใช้แรงขัดมากเกินไป 2) ผลิตภัณฑ์ควรมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม ไม่มีสารกัดกร่อนรุนแรง และไม่มีอนุภาคขัดที่อาจทำให้เกิดรอยขนาดเล็กบนผิวกระจก 3) ผลิตภัณฑ์ควรสามารถล้างออกได้ง่ายและไม่ทิ้งคราบตกค้าง เนื่องจากคราบดังกล่าวอาจลดการส่งผ่านของแสงและเพิ่มการยึดเกาะของฝุ่นในภายหลัง 4) ผลิตภัณฑ์ควรเหมาะสมต่อการใช้งานในสภาพหน้างานจริง สามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์มาตรฐาน ไม่เพิ่มขั้นตอนหรือระยะเวลาการทำงานมากเกินไป และไม่ต้องใช้น้ำในปริมาณสูงกว่าวิธีเดิมอย่างมีนัยสำคัญ 5) ผลิตภัณฑ์ควรมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง ไม่มีกลิ่นฉุนหรือคุณสมบัติไวไฟ และควรมีเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมีประกอบการใช้งาน (Kärcher, n.d.)

สำหรับผลิตภัณฑ์โซลาร์การ์ดที่นำมาใช้ในการวิจัย (ดังแสดงในภาพที่ 1) ได้รับการพัฒนาเพื่อจัดการคราบสกปรกและคราบฝังแน่นบนแผงโซลาร์เซลล์ โดยมีสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบสำคัญ เพื่อช่วยลดแรงยึดเกาะระหว่างคราบกับพื้นผิวแผง รวมถึงมีแนวทางการใช้งานโดยพ่นผลิตภัณฑ์ให้ทั่วพื้นผิวทิ้งไว้ประมาณ 1-3 นาที และล้างออกด้วยน้ำสะอาด ในกรณีที่พบคราบฝังแน่นสามารถใช้แปรงขนนุ่มช่วยทำความสะอาดเฉพาะบริเวณได้



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ยี่ห้อโซลาร์การ์ด (Solarguard) ขนาดบรรจุ 5, 30 และ 200 ลิตร

5. การประเมินประสิทธิภาพการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์

การประเมินประสิทธิภาพการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์สามารถดำเนินการได้ทั้งจากการตรวจสอบสภาพพื้นผิวและการวัด ผลลัพธ์ด้านพลังงาน อย่างไรก็ตาม การประเมินจากลักษณะภายนอกเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถสะท้อนผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน จึงควรใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณร่วมด้วย โดยตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ในการวิจัยด้านสมรรถนะระบบโซลาร์เซลล์ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ หรือ Energy Yield ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง และหมายถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบสามารถผลิตได้จริงในช่วงเวลาที่กำหนด ข้อมูลดังกล่าวสามารถตรวจวัดจากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินสมรรถนะของระบบ (IEA PVPS, 2022a)

การเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการทำความสะอาด ภายได้ช่วงเวลาและสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน ช่วยสะท้อนระดับการฟื้นฟูของสมรรถนะระบบหลังจากลดผลกระทบของคราบสกปรก หากค่าพลังงานไฟฟ้าหลังการล้างเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการทำความสะอาดมีส่วนช่วยเพิ่มการรับแสงและฟื้นฟูความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของระบบ และโดยทั่วไปค่าพลังงานไฟฟ้าหลังการล้างมักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะใช้วิธีการทำความสะอาดแบบใด เนื่องจากการกำจัดฝุ่นละออง คราบสกปรก หรือสิ่งปกคลุมบนผิวแผงจะช่วยลดการสูญเสียจากการบังแสง (Soiling loss) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของแผงลดลง ดังนั้นการทำความสะอาด ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้น โดยระดับการเพิ่มขึ้นอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคราบสกปรก วิธีการทำความสะอาด และสภาพแวดล้อมในช่วงเวลาที่ทำการวัด เช่น ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ และมุมตกกระทบของแสง (IEA PVPS, 2022b; Kärcher, n.d.)

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการใช้งานและประเมินผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพการทำความสะอาดของผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างวิธีล้างแบบเดิมกับวิธีล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ผ่านการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างจากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-experimental Research) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิผลของการล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ระหว่างวิธีล้างแบบเดิมกับวิธีล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ยี่ห้อโซลาร์การ์ด การทดลองดำเนินการในพื้นที่ปฏิบัติงานจริง และพยายามควบคุมเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด ได้แก่ สถานที่ติดตั้งแผง ช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล สภาพแสงอาทิตย์ ลักษณะคราบสกปรก และขั้นตอนการล้าง เพื่อให้ผลการเปรียบเทียบสะท้อนประสิทธิภาพของวิธีล้างทั้งสองรูปแบบได้อย่างเหมาะสม

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ร้านสะดวกซื้อที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 30 สาขา โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ตามเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ 1) เป็นสาขาที่ติดตั้งและใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จริง 2) สามารถเข้าถึงข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ 3) แผงโซลาร์เซลล์มีคราบสกปรกในระดับที่สามารถสังเกตเห็นและเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการล้างได้ 4) พื้นที่ติดตั้งมีความปลอดภัยและสามารถเข้า

ปฏิบัติงานได้ 5) สามารถดำเนินการตามขั้นตอนการทดลองที่กำหนดได้ และ 6) ได้รับความยินยอมและความร่วมมือจากผู้เกี่ยวข้องในพื้นที่

แหล่งข้อมูล

แหล่งข้อมูลหลักเป็นข้อมูลปฐมภูมิที่ได้จากการทดลองภาคสนาม โดยใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบโซลาร์เซลล์ หรือ Energy Yield มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) เป็นตัวชี้วัดหลัก และข้อมูลดังกล่าวอ่านจากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นข้อมูลผลผลิตไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริงในช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละสาขา ทั้งนี้ผู้วิจัยจะบันทึกข้อมูลจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 1) ค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนการล้างด้วยวิธีเดิม 2) ค่าพลังงานไฟฟ้าหลังการล้างด้วยวิธีเดิม 3) ค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์โซลาร์การ์ด 4) ค่าพลังงานไฟฟ้าหลังการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์โซลาร์การ์ด ซึ่งข้อมูลทั้ง 4 ค่าใช้สำหรับคำนวณผลต่างของค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการล้างของแต่ละวิธี และนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีล้างทั้งสองรูปแบบ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ได้แก่

- ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ยี่ห้อโซลาร์การ์ด ซึ่งใช้ในการทดลองล้างแบบใหม่ โดยผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติช่วยขจัดฝุ่น คราบ น้ำ มูลนก และคราบฝังแน่นบนผิวแผงโซลาร์เซลล์
- แบบบันทึกข้อมูลภาคสนาม ซึ่งผู้วิจัยจัดทำขึ้นเพื่อใช้บันทึกข้อมูลทั่วไปของสถานที่ทดลอง ข้อมูลพื้นฐานของระบบโซลาร์เซลล์ วิธีการล้าง และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้าง
- ระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ ใช้สำหรับอ่านและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบโซลาร์เซลล์ก่อนและหลังการล้าง โดยข้อมูลที่ได้มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง

ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 การล้างแบบเดิม เริ่มจากฉีดน้ำสะอาดลงบนผิวแผงเบา ๆ เพื่อชะล้างฝุ่นและคราบที่หลุดออกได้ง่าย จากนั้นใช้ฟองน้ำถูบริเวณที่มีคราบสกปรก ล้างออกด้วยน้ำสะอาด และใช้ไม้ปาดน้ำรีดน้ำออกจากผิวแผงจนแห้ง

วิธีที่ 2 การล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์โซลาร์การ์ด เริ่มจากฉีดน้ำสะอาดลงบนผิวแผงเบา ๆ จากนั้นพ่นผลิตภัณฑ์โซลาร์การ์ดให้ทั่วบริเวณที่ต้องการทำความสะอาด และทิ้งไว้ประมาณ 1-3 นาที เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ช่วยลดการยึดเกาะของคราบ หลังจากนั้นใช้ฟองน้ำหรือแปรงขนนุ่มถูเฉพาะบริเวณที่มีคราบ ล้างออกด้วยน้ำสะอาด และใช้ไม้ปาดน้ำรีดน้ำออกจากผิวแผง

ก่อนดำเนินการล้าง ผู้วิจัยบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้เป็นข้อมูลก่อนการทดลอง เมื่อดำเนินการล้างเสร็จสิ้นแล้วจึงบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าหลังการล้างตามช่วงเวลาที่กำหนด โดยใช้แนวทางเดียวกันทั้งสองวิธี

การรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลในพื้นที่จริงของร้านสะดวกซื้อ 30 สาขา (Field, 2013) ผู้วิจัยตรวจสอบความพร้อมของพื้นที่ สภาพแผง และการเข้าถึงระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ก่อนการทดลอง จากนั้นบันทึกข้อมูลพื้นฐานและค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนการล้างลงในแบบบันทึกข้อมูลภาคสนาม และภายหลังการล้างแต่ละวิธี ผู้วิจัยบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าหลังการล้างจากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูลในแต่ละสาขา การเก็บข้อมูลใช้ขั้นตอนเดียวกันในทุกหน่วยทดลอง เพื่อให้ข้อมูลมีรูปแบบสอดคล้องกันและสามารถนำมาเปรียบเทียบได้

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงพรรณนา และการวิเคราะห์เชิงอนุมาน ในส่วนของการวิเคราะห์เชิงพรรณนา ผู้วิจัยใช้การสรุปข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย เพื่ออธิบายลักษณะของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างในแต่ละวิธี และเพื่อแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดลองภาคสนาม และการวิเคราะห์เชิงอนุมาน ผู้วิจัยใช้การทดสอบ Paired Samples t-test ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลสองชุดที่มีความสัมพันธ์กันหรือเป็นข้อมูลแบบจับคู่ โดยอาศัยหลักการแจกแจงแบบ t ของ Student (Student, 1908; Field, 2013)

วิธีการวิเคราะห์สามารถใช้ตรวจสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในหน่วยทดลองเดียวกันมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดย

1) ในการทดสอบสมมติฐาน ผู้วิจัยกำหนดสมมติฐาน

สมมติฐานหลัก (H_0): ผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Energy Yield: kWh) ก่อนและหลังการล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีล้างแบบเดิม และผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สมมติฐานทางเลือก (H_1): ผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Energy Yield: kWh) ก่อนและหลังการล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์แตกต่างจากผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ก่อนและหลังการล้างทำความสะอาดด้วยวิธีล้างแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2) การตัดสินใจผลการทดสอบใช้ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05 โดยพิจารณาจากค่า Sig. หรือค่า p -value หากค่า p -value มีค่าน้อยกว่า .05 จะสรุปได้ว่ามีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่งผลให้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก และยอมรับสมมติฐานทางเลือกว่า ผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ แตกต่างจากผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างทำความสะอาดด้วยวิธีล้างแบบเดิม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางตรงกันข้าม หากค่า p -value มากกว่าหรือเท่ากับ .05 จะสรุปได้ว่าผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีล้างแบบเดิม และผลต่างค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนและหลังการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเป็นการเปรียบเทียบผลของการล้างแบบเดิมกับการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ จากข้อมูลภาคสนามของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 สาขา โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเชิงอนุมานใช้สถิติ Paired Sample t-test เพื่อทดสอบความแตกต่างของผลการล้างระหว่างสองวิธี โดยมีรายละเอียดดังนี้

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

$\bar{X}$	แทน ค่าเฉลี่ย
S	แทน ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
N	แทน จำนวนกลุ่มตัวอย่าง
t	แทน ค่าสถิติการแจกแจง t (t-distribution)
p	แทน ค่าความน่าจะเป็นของความคาดเคลื่อน

วิเคราะห์เชิงพรรณนา ด้วยการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Energy Yield: kWh) จากการล้างแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีการล้างแบบเดิมและวิธีใหม่ โดยผู้วิจัยวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 สาขา พิจารณาแยกเป็นก่อนล้างและหลังล้างของแต่ละวิธี ได้แก่ วิธีการล้างแบบเดิม และวิธีล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์

ตารางที่ 1

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการล้างแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีเดิมและวิธีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์

วิธีการล้าง	ช่วงการวัด	N	$\bar{X}$	S
วิธีเดิม	ก่อนล้าง	30	14.31	2.19
วิธีเดิม	หลังล้าง	30	18.67	2.26
วิธีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์	ก่อนล้าง	30	14.31	2.15
วิธีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์	หลังล้าง	30	19.80	2.07

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้หลังการล้างของทั้งสองวิธีสูงกว่าก่อนการล้างอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบได้ อย่างไรก็ตาม วิธีล้างแบบใหม่ให้ค่าเฉลี่ยหลังล้างสูงกว่าวิธีเดิม จึงสะท้อนถึงแนวโน้มว่าการใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์มีประสิทธิภาพดีกว่าในเชิงปฏิบัติการ

วิเคราะห์เชิงอนุมาน โดยผู้วิจัยใช้สถิติ Paired Sample t-test เนื่องจากข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบเป็นข้อมูลแบบจับคู่จากหน่วยทดลองเดียวกัน กล่าวคือเป็นข้อมูลจากสาขาเดียวกันที่ได้รับการวัดก่อนและหลังการล้าง และยังมีการคำนวณผลต่างของแต่ละวิธีเพื่อใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างวิธีเดิมและวิธีใหม่

สำหรับการทดสอบสมมติฐาน ผู้วิจัยกำหนดสมมติฐานหลัก (H_0) ว่า ผลต่างค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการล้างด้วยวิธีการล้างแบบเดิมและการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ

กำหนดสมมติฐานทางเลือก (H_1) ว่าผลต่างค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์แตกต่างจากวิธีการล้างแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ .05 โดยผลการทดสอบพบว่าผลต่างของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการล้างแบบใหม่สูงกว่าวิธีเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า $t = 9.93$ และ $p < .001$ ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของผลการล้างด้วยวิธีเดิมและวิธีใหม่มีความแตกต่างกันจริง

ตารางที่ 2

ผลการเปรียบเทียบผลต่างของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการล้างแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีเดิมและวิธีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์โดยใช้สถิติ Paired Sample t-test

ตัวแปรเปรียบเทียบ	N	$\bar{X}$	S	t	p
ผลต่างวิธีเดิม	30	4.36	2.35		
ผลต่างวิธีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์	30	5.49	2.18	9.93	$p < .001$

หมายเหตุ ** $p < 0.01$

จากตารางที่ 2 พบว่าผลต่างค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์สูงกว่า และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบทางสถิติ พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.01$ ดังนั้นผู้วิจัยจึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และ ยอมรับสมมติฐานทางเลือก (H_1) โดยสรุปได้ว่าการล้างด้วยผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ให้ผลในการเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ดีกว่าวิธีล้างแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ล้างทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ ยี่ห้อโซล่าการ์ด มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ โดยสามารถช่วยเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้หลังการล้าง และให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีล้างแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์กับวิธีการล้างแบบทั่วไป และประเมินผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์โซล่าการ์ดมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในพื้นที่ปฏิบัติงานจริง เนื่องจากมีขั้นตอนการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน สามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการล้างแผงโซลาร์เซลล์ และสามารถประเมินผลลัพธ์ได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากระบบมอนิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ จึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นแนวทางการปฏิบัติงานมาตรฐานสำหรับงานดูแลและบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์

การอภิปรายผล

ผลการวิจัยที่พบว่า การล้างแผงโซลาร์เซลล์ช่วยเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้หลังการล้าง สอดคล้องกับแนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของคราบสกปรก (soiling effect) ต่อสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระบุว่าคราบสกปรกที่สะสมอยู่บนผิวแผงจะลดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถผ่านเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าลดลง เมื่อมีการทำความสะอาดผิวแผง แสงอาทิตย์จึงสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในหลายบริบทที่รายงานว่า การทำความสะอาดแผงสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ (First Solar, 2017; Kärcher, n.d.) อย่างไรก็ตาม ในบางงานวิจัยพบว่าผลของการล้างอาจแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อม เช่น ระดับฝุ่น ความชื้น หรือความถี่ในการล้าง ซึ่งอาจทำให้ผลลัพธ์ไม่เด่นชัดในพื้นที่ที่มีคราบสกปรกสะสมน้อย (First Solar, 2017)

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบระหว่างวิธีล้างแบบเดิมกับวิธีล้างโดยใช้ผลิตภัณฑ์โซล่าการ์ด พบว่าผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า การใช้สารทำความสะอาดเฉพาะทางสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดคราบฝังแน่นได้ดีกว่าน้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว (First Solar, 2017; Kärcher, n.d.) อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจแตกต่างจากบางงานวิจัยที่รายงานว่า การใช้น้ำสะอาดเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอในกรณีที่คราบสกปรกไม่รุนแรง ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากลักษณะของคราบสกปรกในพื้นที่ศึกษา หรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกวิธีการทำความสะอาดให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริง

นอกจากนี้ การใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินผลลัพธ์ ทำให้การวิจัยมีความเชื่อมโยงระหว่างการพัฒนาผลิตภัณฑ์กับผลลัพธ์เชิงธุรกิจ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดด้านการจัดการพลังงานที่เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและลดความสูญเสียในระบบผลิตไฟฟ้า โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหลังการล้างสามารถสะท้อนถึงคุณค่าของการบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์ได้โดยตรง (IEA PVPS, 2022a) ดังนั้นผลิตภัณฑ์โซลาร์การ์ดจึงไม่ได้เป็นเพียงผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดทั่วไป แต่เป็นนวัตกรรมที่สามารถเชื่อมโยงกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า การลดความสูญเสียจากคราบสกปรก และการสร้างมาตรฐานการให้บริการในกลุ่มลูกค้าองค์กร

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ คือ ควรนำผลิตภัณฑ์โซลาร์การ์ดไปประยุกต์ใช้กับกลุ่มลูกค้าองค์กร กลุ่มผู้รับเหมาติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ ผู้ให้บริการติดตั้งและบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์ โดยควรจัดทำแนวทางการปฏิบัติงานมาตรฐาน หรือ Standard Operating Procedure (SOP) สำหรับการล้างแผงโซลาร์เซลล์ เช่น ขั้นตอนการเตรียมพื้นที่ การตรวจสอบสภาพแผงก่อนการล้าง การฉีดหรือพ่นผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์บนผิวแผง วิธีการล้างออก การตรวจสอบหลังการล้าง และการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าหลังการดำเนินงาน เพื่อให้การใช้งานผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอ ปลอดภัย และสามารถควบคุมคุณภาพได้

ควรขยายการทดสอบผลิตภัณฑ์ไปยังพื้นที่ที่มีลักษณะคราบสกปรกแตกต่างกัน เช่น พื้นที่เมือง พื้นที่อุตสาหกรรม พื้นที่ใกล้ถนนหลัก พื้นที่ที่มีฝุ่นสะสมสูง หรือพื้นที่ที่พบปัญหามลพิษบ่อยครั้ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายมากขึ้น และนำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงสูตรผลิตภัณฑ์ วิธีใช้งาน และแนวทางการให้บริการให้เหมาะสมกับแต่ละบริบท

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป คือ ควรศึกษาผลกระทบระยะยาวของผลิตภัณฑ์ต่อพื้นผิวแผงโซลาร์เซลล์ ขึ้นเคลือบขบขย และส่วนประกอบอื่นของแผง เพื่อยืนยันความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ต่อการใช้งานต่อเนื่องในระยะยาว นอกจากนี้ควรมีการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ผลิตภัณฑ์ เช่น ต้นทุนการล้างต่อครั้ง ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตเพิ่มขึ้น ระยะเวลาคืนทุน และความคุ้มค่าต่อเจ้าของระบบหรือผู้ให้บริการติดตั้งและบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์ เพื่อสนับสนุนการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้เชิงพาณิชย์อย่างเป็นระบบ

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). *องค์ประกอบและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์*. กระทรวงพลังงาน.
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (4th ed.). SAGE Publications.
- First Solar. (2017). *FS-Series PV module cleaning guidelines*. First Solar, Inc.
- International Energy Agency. (2024a). *Renewables 2023: Analysis and forecasts to 2028*. International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2024b). *Renewables 2024: Analysis and forecasts to 2030*. International Energy Agency.
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2022a). *Guidelines for operation and maintenance of photovoltaic power plants in different climates* (Report IEA-PVPS T13-25:2022). IEA PVPS.
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2022b). *Soiling losses: Impact on the performance of photovoltaic power plants* (Report IEA-PVPS T13-21:2022). IEA PVPS.
- Kärcher. (n.d.). *How to keep balcony power plants and solar systems efficient*. Alfred Kärcher SE & Co. KG.
- Student. (1908). The probable error of a mean. *Biometrika*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1>