

การจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา
แบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
PERFORMANCE SIMULATION OF GRID-CONNECTED ROOFTOP
SOLAR PV SYSTEM OF MAE MOH SUB-DISTRICT MUNICIPALITY,
LAMPANG PROVINCE

วันที่รับ: 29 กันยายน 2564

วันที่แก้ไข: 14 ธันวาคม 2564

วันที่ตอบรับ: 1 กุมภาพันธ์ 2565

ธัญญพัทธ์ ทิพย์ศุภวงศ์¹, วัชร วงศ์ปัญญา¹,
บุญวัฒน์ วิจารณ์พล¹, เกศนีย์ อินอ้าย² และ วราคม วงศ์ชัย^{3*}
Thanyapat Thipsuppawong¹,
Watchara Wongpanyo¹, Bunyawat Vichanpol¹,
Kesanee Inai² and Warakhom Wongchai^{3*}

¹คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

¹School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao 56000

²คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จังหวัดลำปาง 52100

²Faculty of Education, Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จังหวัดลำปาง 52100

³Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

*Corresponding author e-mail: dolic45@gmail.com



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยทำการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงตามภาระโหลดของเทศบาลย้อนหลัง 1 ปี บนพื้นที่หลังคา 704 ตารางเมตร ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ ระบบสายไฟฟ้า อุปกรณ์ต่างๆ และการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากนั้นทำการจำลองระบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และระยะเวลาคืนทุน (PP) ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปีมีค่าเท่ากับ 152.12 เมกะวัตต์ชั่วโมง สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.711 การสูญเสียพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด

จำแนกเป็นการสูญเสียจากอัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ร้อยละ 12.50 (ระยะเวลา 25 ปี) การสูญเสียเนื่องจากอุณหภูมิเซลล์ ร้อยละ 11.00 และมีการสูญเสียขณะใช้งาน Inverter ร้อยละ 3.50 โดยประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (STC) เท่ากับ ร้อยละ 16.81 ที่อายุโครงการ 25 ปี มีค่าผลตอบแทนจากการลงทุน เท่ากับร้อยละ 164.30 มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 2,364,334 บาท และระยะเวลาคืนทุน 8.3 ปี โครงการนี้ยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 91.06 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี หรือตลอดทั้งอายุโครงการ 25 ปี มีค่าเท่ากับ 2,139.89 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ข้อมูลที่ได้งานวิจัยนี้เทศบาลตำบลแม่เมาะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการลงทุนสร้างระบบผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์, การเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง, การจำลองระบบ, PVsyst



Abstract

The objective of this research is to study performance simulation and economic analysis of grid-connected rooftop solar PV system for Mae Moh sub-district municipality Lampang province. A PV system based on the past 1-year electricity load on a roof area of 704 m² was designed in this research. PV system was consisted of PV array, Inverters, electrical wiring systems, various devices and the connections of the power distribution system. The system was simulated using PVsyst 7.1 software and assessed the economic in term of return on investment (ROI), net present value (NPV) and payback period (PP). The study found that the total annual power generation was 152.12 MWh. The average power generation system performance was 0.711. The loss of the power generation system occurs in solar panels which are power loss from solar panel degradation rate of 12.50% (during 25 years), power loss due to cell temperature 11.00%, and power loss during inverter use 3.50%. The efficiency of the grid-connected rooftop solar PV system (STC) is 16.81%. At 25 years of the project life, the return on investment is 164.30%, the net present value is 2,364,334 baht and the payback period is 8.3 years. This project can also reduce greenhouse gas emissions by 91.06 tCO₂eq/year or the entire project life of 25 years is equal

to 2,139.89 tCO₂eq. The information obtained in this research can be used as a guideline for investment in building an efficient and appropriate grid-connected rooftop solar PV system of Mae Moh sub-district municipality.

Keywords: Solar PV System, Grid-connected, Simulation, PVsyst



บทนำ

เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทย ปัจจุบันภาคการผลิตพลังงานต้องเผชิญกับความท้าทายของการเติบโต ความผันผวนของราคาเชื้อเพลิง ความต้องการที่เพิ่มขึ้น และยิ่งไปกว่านั้นการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังเป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาเศรษฐกิจที่ยั่งยืนจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีความมั่นคงทางด้านแหล่งพลังงาน ราคามีความคุ้มค่า และมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ต่ำ (Pearce, 2002; Sgroi et al., 2015) ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นทุกปีจาก 23,900 MW ในปี 2554 เป็น 28,636 MW ในปี 2563 คิดเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้น 19.80% (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2564) ปัจจุบันประเทศไทยมีการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าเป็นหลัก ประกอบด้วยใช้ก๊าซธรรมชาติสัดส่วน 56% ถ่านหินสัดส่วน 17% นอกจากนี้ยังมีการนำเข้าไฟฟ้าสัดส่วน 14% พลังงานหมุนเวียนสัดส่วน 11% และอื่นๆ สัดส่วน 2% (กระทรวงพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2564ก)

พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ชนิดต่างๆ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิล เนื่องจากเป็นประโยชน์ในด้านของการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความสามารถในการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ในระยะยาวและยั่งยืน (Karakosta, Flouri, Dimopoulou, & Psarras, 2012; Sgroi, Tudisca, Di Trapani, Testa, & Squatrito, 2014) พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ของโลก หาได้ง่าย และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ (Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016) ถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับประเทศไทย เนื่องจากมีศักยภาพความเข้มรังสีอาทิตย์สูงถึง 17.6 MJ/m²-day ซึ่งเหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้า และจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561–2580 ยังสนับสนุนและส่งเสริมให้มีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งระบบที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง (On-grid) และไม่เชื่อมต่อกับสายส่ง (Off-grid) เพิ่มขึ้นจากปี 2561 ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้ารวม 2,962 MW เป็น 14,864 MW ภายในปี 2580 ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนมากที่สุด

เมื่อเทียบกับพลังงานทางเลือกชนิดอื่นๆ (กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaic System) เป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) เป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความน่าสนใจสูงขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยเสริมความมั่นคงในระบบสายส่งไฟฟ้า (Zeyringer et al., 2015) ระบบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามการใช้งานเป็น 2 ระบบ คือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ในปี พ.ศ. 2563 เทศบาลตำบลแม่เมาะมีการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 178.0 kW ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 223.0 MWh เป็นเงิน 1,052,623 บาท คิดเป็นค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.74 บาท/kWh ลักษณะการใช้งานของอาคารเทศบาลมีความเหมาะสมต่อการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา เนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้ามากในช่วงเวลากลางวัน การศึกษาสมรรถนะความเป็นไปได้ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการลงทุนสร้างระบบผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม



วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
2. เพื่อศึกษาความแม่นยำของการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย PVsyst วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก



วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panels) อินเวอร์เตอร์ (Inverters) หน่วยปรับสภาพพลังงาน (Power Conditioning Unit) และอุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่าย (Network Connected Equipment) แล้วทำการจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 มีรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

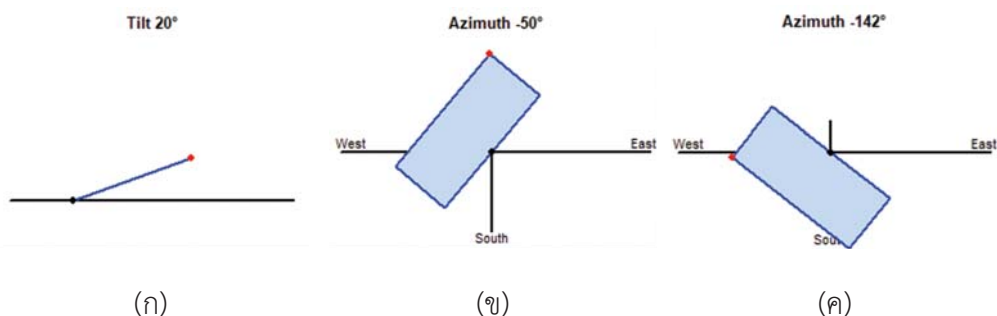
ข้อมูลพื้นที่ทำการศึกษา

พื้นที่ทำการศึกษา คือ พื้นที่หลังคาของอาคารสำนักงานหลักและอาคารอเนกประสงค์ของเทศบาลตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งอยู่ในพิกัดละติจูด 18.2728°N และลองจิจูด 99.6508°E ความสูงจากระดับน้ำทะเล 378 เมตร พื้นที่หลังคาของเทศบาลทำมุมเอียง 20° จากแนวนอน โดยมีพื้นที่หลังคาที่หันไปทางทิศใต้ รวมทั้งหมด 704 m^2 แบ่งออกเป็นมุม Azimuth -50° มีพื้นที่ 541 m^2 และมุม Azimuth -142° มีพื้นที่ 163 m^2

แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในการศึกษานี้ ใช้ PVsyst 7.1 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ที่ช่วยในการคำนวณการทำงานของระบบ ซอฟต์แวร์นี้ช่วยในการออกแบบการกำหนดค่าของระบบและคำนวณปริมาณพลังงานที่เกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงในค่ารายเดือน รายวัน หรือรายชั่วโมง และยังแสดงแผนภาพการสูญเสีย เพื่อใช้ทำนายจุดอ่อนในการออกแบบระบบ (Irwana et al., 2015; Kandasamy, Prabu, & Niruba, 2013)

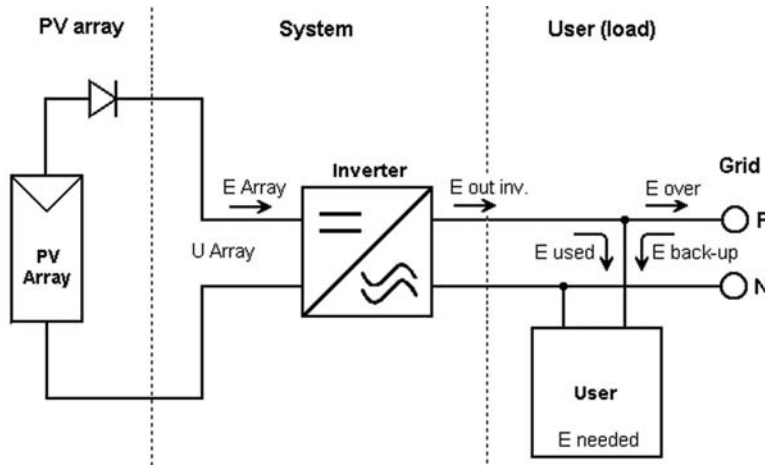
การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงตามภาระโหลดของเทศบาลมีค่าเฉลี่ย 223.0 MWh/ปี และพื้นที่หลังคาที่หันไปทางทิศใต้ รวม 704 m^2 โดยมุมเอียงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20° รูปที่ 1(ก) ตามความลาดชันของหลังคา และทิศทางการวางทำมุม Azimuth -50° รูปที่ 1(ข) และ -142° รูปที่ 1(ค) มีพื้นที่หลังคาเท่ากับ 541 m^2 และ 163 m^2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 แสดงมุมเอียง 20° (ก) และแนวทิศการวางโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
Azimuth -50° (ข) และ -142° (ค)

ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง ประกอบด้วย PV array แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า Inverter แปลงกระแสไฟตรงเป็นกระแสสลับ ระบบสายไฟฟ้า อุปกรณ์ต่างๆ และการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เลือกใช้วัสดุ

อุปกรณ์ที่มีขายในประเทศไทยและมีราคาต่ำสุดจากใบเสนอราคาของบริษัทที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรูปแบบการเชื่อมต่อของระบบ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ย (Levelized Cost of Electricity: LCOE) ตลอดอายุโครงการโดยไม่คำนึงถึงมูลค่าของเงินตามเวลา เป็นที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าระหว่างเทคโนโลยีการผลิตต่างๆ การคำนวณดังสมการที่ (1) (International Renewable Energy Agency, 2015; ธนาพล ตันดิสัยกุล, พีรพล รัศมีธรรมโชติ, และ เมฆาพร อยู่สกุล, 2560)

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1 + r/100)}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_t}{(1 + r/100)}} \quad (1)$$

เมื่อ $LCOE$ คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (บาท/kWh)

I_t คือ เงินลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (บาท)

M_t คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาในปีที่ t (บาท/ปี)

E_t คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปีที่ t (kWh/ปี)

r คือ อัตราการคิดลด (%)

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการศึกษาในครั้งนี้ พิจารณาจากต้นทุนของระบบ ต้นทุนค่าบำรุงรักษาระบบ และผลประโยชน์จากการดำเนินโครงการ ซึ่งพิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment: ROI) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PP)

การวิเคราะห์การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คำนวณจากปริมาณการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่งของเทศบาล ดังสมการที่ (2) โดยค่า Emission factor ของไฟฟ้า 1 kWh เท่ากับ 0.5986 kgCO₂eq (องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2564)

$$\begin{array}{l} \text{ปริมาณการลด} \\ \text{ก๊าซเรือนกระจก} \end{array} = \begin{array}{l} \text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้า} \\ \text{ที่ผลิตได้ (kWh)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Emission} \\ \text{factor} \end{array} \quad (2)$$



ผลการวิจัย

ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาศมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ครั้งนี้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีขายในประเทศไทยเป็นหลักและมีราคาต่ำสุด พบว่าพื้นที่หลังคาเทศบาลตำบลแม่เมาะ ขนาด 704 m² สามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 325 W_p ยี่ห้อ Jinkosolar รุ่น JKM 325PP-72 (Plus) ชนิดแผง Poly-crystalline จำนวน 356 แผง ใช้ Inverter ขนาด 27.6 kW_{ac} ยี่ห้อ SolarEdge รุ่น SE27.6K-EU-APAC/AUS จำนวน 4 ชุด สามารถผลิตไฟฟ้าได้กำลังสูงสุด (STC) 116 kW_p รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ผลการศึกษาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์และสภาพภูมิอากาศของเทศบาลตำบลแม่เมาะ โดยใช้ PVsyst 7.1 พบว่ามีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์พื้นที่ 1 m² ตลอดทั้งปี (Global incident in collector plane) เท่ากับ 1,859.0 kWh/m² โดยในเดือนพฤษภาคมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 177.9 kWh/m² อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (T_a) มีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 26.36°C เมื่อเทียบกับข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาย้อนหลัง 5 ปี (T_{a_tmd}) มีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 27.30°C (กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม กรมอุตุนิยมวิทยา, 2564) ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.4 m/s และการกระจายของดัชนีความใสบรรยากาศ (Clearness Index) มีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.532 รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงคุณลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา เทศบาล
ตำบลแม่เมาะ

Configuration	PV module	Inverter
PV/Inverter model	Jinkosolar	SolarEdge
	JKM 325PP-72 (Plus)	SE27.6K-EU-APAC/AUS
Unit Nom. Power	325 W _p	27.6 kW _{ac}
Number of PV/Inverter modules	356 units	4 units
Nominal (STC)	116 kW _p	110 kW _{ac}
Total module area	691 m ²	-
Phom ratio	-	1.05
SolarEdge Power Optimizer		
Model	P730 Worldwide	
Unit Nom. Power	730 W	
Modules	1 String x 2 in series	
Array	PV array 1	PV array 2
Tilt/Azimuth	20/-50°	20/-142°
Number of PV modules	264 units	92 units
Nominal (STC)	85.8 kW _p	29.9 kW _p
Optimizer Array	6 Strings x 22 In series	2 Strings x 23 In series
Number of inverters	3 units	1 unit

จากข้อมูลการจำลองระบบในตารางที่ 2 เมื่อนำค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบใน
แนวราบ (GlobHor) และค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ 1 ตารางเมตร ตลอดทั้งปี
(GlobInc) มาวิเคราะห์อัตราส่วนของแสงที่ตกกระทบลงแผงโซลาร์เซลล์เทียบกับแสง
ที่ตกกระทบในแนวราบ (Transposition Factor) พบว่ากลุ่มโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ Azimuth
-142° หันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ส่งผลทำให้ได้รับปริมาณแสงน้อย มีค่า Transposition
Factor เท่ากับ 0.90 เมื่อเทียบกับกลุ่มโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ Azimuth -50° ที่หันไปทาง
ทิศตะวันตกเฉียงใต้ มีค่า Transposition Factor เท่ากับ 1.03 เฉลี่ยทั้งระบบมีค่า
Transposition Factor เท่ากับ 0.994 สำหรับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ (Energy
injected into grid) ทั้งปีมีค่าเท่ากับ 152.12 MWh ปัจจัยของค่า GlobHor และ GlobInc
มีผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยหากมีค่ามากจะส่งผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้า

ที่ผลิตได้มากตามขึ้นไปด้วย และอุณหภูมิแวดล้อม (T_a) ก็มีส่วนสำคัญ หากมีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำจะส่งผลทำให้การระบายความร้อนที่แผงทำได้ดี ส่งผลทำให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มากตามขึ้นไปด้วยเช่นกัน โดยในเดือนพฤษภาคมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 14.54 MWh และเดือนสิงหาคมผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ต่ำสุดเท่ากับ 10.81 MWh เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า (PR) พบว่ามีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.711 โดยในเดือนมกราคมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.722 และเดือนเมษายนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.697

ตารางที่ 2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และสมรรถนะตามช่วงเดือนต่างๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

Month	GlobHor kWh/m ²	GlobInc kWh/m ²	T_a °C	T_{a_tmd} °C	PR ratio	E_Grid MWh	E_User MWh	SolFrac ratio
January	141.5	149.6	22.22	23.28	0.722	12.50	12.38	0.990
February	137.6	140.6	25.01	25.14	0.714	11.62	13.92	1.198
March	166.5	165.8	28.01	29.16	0.706	13.54	21.74	1.605
April	173.3	169.1	29.81	31.12	0.697	13.64	24.61	1.804
May	184.7	177.9	28.21	30.34	0.706	14.54	24.57	1.690
June	164.7	156.8	27.83	29.00	0.708	12.84	23.39	1.822
July	174.7	167.8	27.94	28.48	0.710	13.79	22.55	1.635
August	134.8	130.8	27.61	27.54	0.714	10.81	20.58	1.904
September	141.4	137.1	26.68	27.80	0.716	11.35	19.81	1.745
October	153.2	154.4	26.52	27.06	0.711	12.71	15.28	1.202
November	137.7	140.9	23.98	25.56	0.718	11.71	14.12	1.206
December	148.9	157.4	22.47	23.06	0.719	13.09	10.09	0.700
Year	1,859.0	1,848.2	26.36	27.30	0.711	152.12	223.03	1.466

หมายเหตุ: GlobHor Global horizontal irradiation

GlobInc Global incident in collector plane

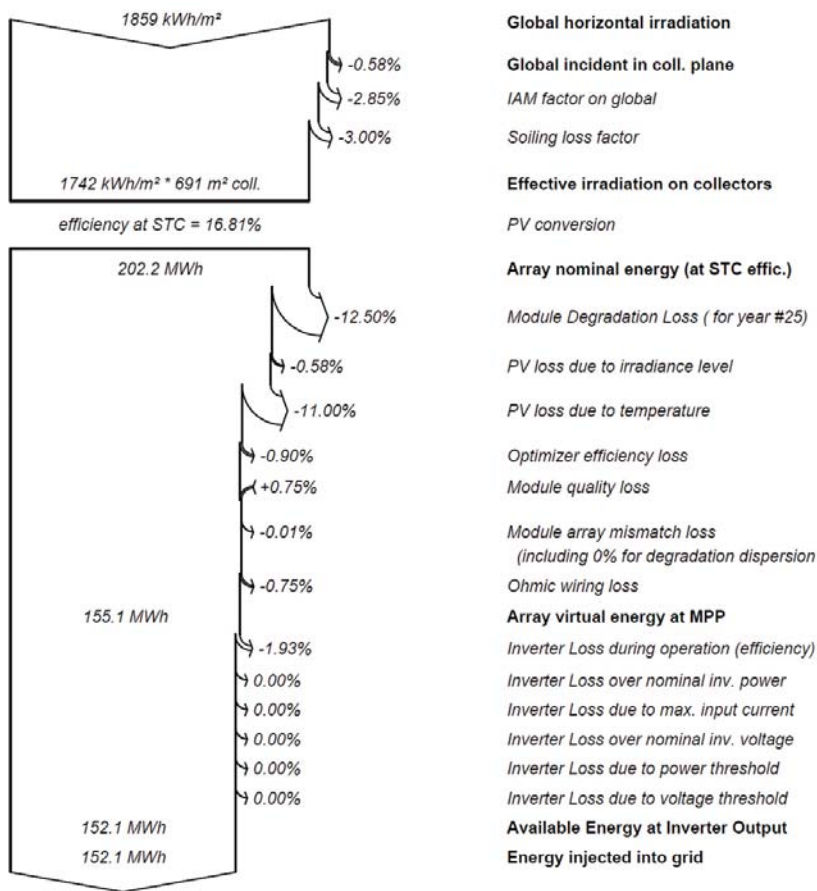
T_a Ambient temperature

T_{a_tmd} Ambient temperature from Thai Meteorological Department

E_Grid Energy injected into grid

E_User Energy demand of user

PR Performance ratio



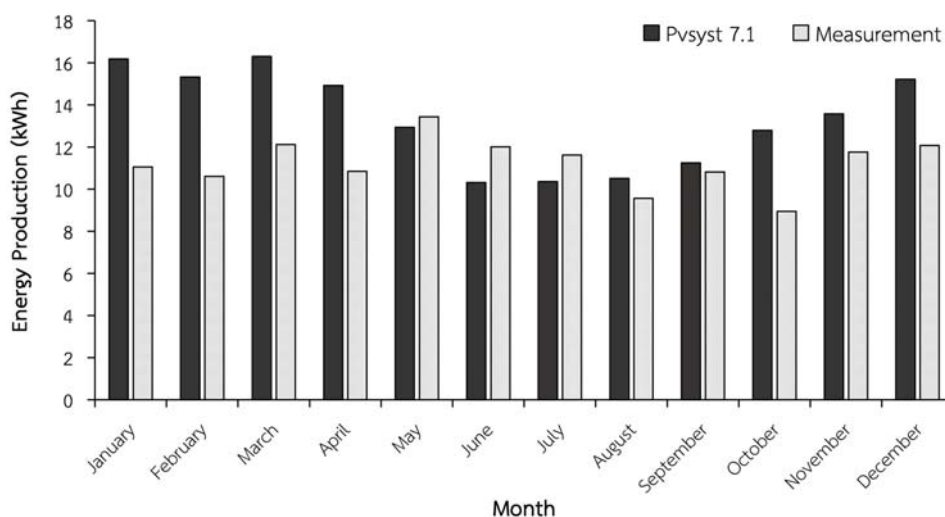
รูปที่ 3 แผนภาพการสูญเสียพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า (E_{User}) ของเทศบาลตำบลแม่เม้าะ โดยเฉลี่ย
ทั้งปีมีค่าเท่ากับ 223.03 MWh ซึ่งสูงกว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ (E_{Grid})
มีค่าเท่ากับ 152.12 MWh ทางเทศบาลไม่มีระบบสำรองพลังงาน (E_{BkUp}) โดยมีค่าอัตราส่วน
การผลิตไฟฟ้าต่อความต้องการ (Solar fraction) เท่ากับ 1.466 มีเพียงเดือนมกราคม
และธันวาคมเท่านั้นที่ระบบผลิตไฟฟ้าเกินความต้องการใช้ของเทศบาลตำบลแม่เม้าะ

การสูญเสียพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุดจำแนก
เป็นการสูญเสียจากอัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 12.50% (ระยะเวลา 25 ปี)
การสูญเสียเนื่องจากอุณหภูมิเซลล์ 11.00% และมีการสูญเสียขณะใช้งาน Inverter 3.5%
โดยประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (STC) เท่ากับ 16.81%
รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3

ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วย PVsyst

การวิเคราะห์ความแม่นยำในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 เปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตจริง ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้เป็นข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งขนาด 104 kW_p ของ หจก. พี แอนด์ พี พรีพาร์ต ตั้งอยู่ในอำเภอเมือง จังหวัดลำปาง ซึ่งอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกับเทศบาลตำบลแม่เมาะที่ทำการการศึกษา ในครั้งนี้ โดยระบบของ หจก. พี แอนด์ พี พรีพาร์ต คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ จำลองระบบ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของ หจก. พี แอนด์ พี พรีพาร์ต ใช้วัสดุอุปกรณ์เหมือนกับที่ทำการการศึกษาในครั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตจริง ระหว่างเดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 มีค่าเท่ากับ 159.71 kWh/ปี และพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตจริงมีค่าเท่ากับ 134.86 kWh/ปี รายละเอียดดังรูปที่ 4 ความแม่นยำของการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 เปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตจริงมีค่าเท่ากับ 84.44% ซึ่งถือว่ามีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำค่อนข้างสูง (พงษ์ศักดิ์ มะขามป้อม และคนอื่นๆ, 2561)



รูปที่ 4 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1
และการผลิตจริง

ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

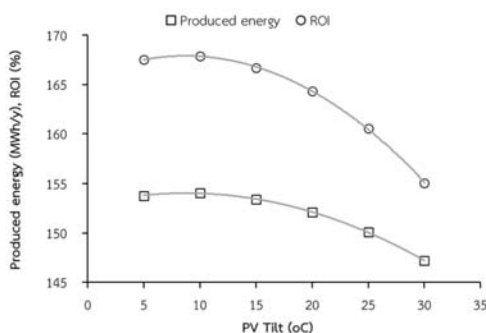
ต้นทุนในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ต้นทุนการติดตั้ง (Installation Costs) และต้นทุนการดำเนินการ (Operating Costs) โดยต้นทุนราคาของส่วนประกอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ค่าเฉลี่ยจากการสำรวจข้อมูลราคาขายจริงของบริษัทต่างๆ ในประเทศไทย ณ เดือนมิถุนายน 2564 อายุโครงการนี้ กำหนดให้เท่ากับ 25 ปี อัตราการคิดลด 7% อัตราเงินเฟ้อ 3% และอัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 0.5% ต่อปี มีรายละเอียดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

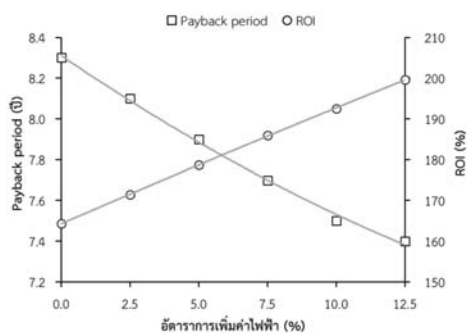
รายการ	คำอธิบาย
อายุโครงการ	25 ปี
อัตราการคิดลด	7%
อัตราเงินเฟ้อ	3%
อัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	0.5%
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	2,693,140 บาท
อินเวอร์เตอร์และหน่วยปรับสภาพพลังงาน	1,308,000 บาท
อุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่าย การติดตั้ง และการบริหารจัดการ	1,719,150 บาท
การบำรุงรักษา	30,300 บาท/ปี
LCOE	3.278 บาท/kWh
NPV	2,364,334 บาท
ROI	164.3%
PP	8.3 ปี

โครงการนี้ผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ย 152.12 MWh/ปี คิดเป็นปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 91.06 tCO₂eq/ปี หรือตลอดทั้งอายุโครงการ 25 ปี มีค่าเท่ากับ 2,139.89 tCO₂eq จากผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าเป็นโครงการที่น่าลงทุนเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 3.28 บาท/kWh ซึ่งต่ำกว่าค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่เทศบาลตำบลแม่เมาะต้องจ่ายในปัจจุบันเท่ากับ 4.74 บาท/kWh ในโครงการนี้ยังมีค่าผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) สูงถึง 164.3% มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 2,364,334 บาท และระยะเวลาคืนทุน

(PP) 8.3 ปี เมื่อเทียบกับอายุโครงการสามารถใช้งานได้ถึง 25 ปี แต่ถ้าหากในอนาคตราคา
ค่าไฟฟ้ามีการปรับตัวสูงขึ้น 10% จะทำให้โครงการมีค่าผลตอบแทนจากการลงทุนเพิ่มขึ้น
เป็น 192.5% และจะมีระยะเวลาคืนทุนเร็วขึ้นเป็น 7.5 ปี ดังรูปที่ 5(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ผลของมุมเอียง (ก) และอัตราการเพิ่มค่าไฟฟ้า (ข)



อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้พบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ย 152.12 MWh/ปี โดยทิศทางการวางโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีความสำคัญต่อปริมาณการผลิตไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ซึ่งพบว่า การวางโมดูลทำมุม Azimuth -50° มีค่า Transposition Factor เท่ากับ 1.03 และ Loss with Respect to Optimum 2.7% ในส่วนของการวางโมดูลทำมุม Azimuth -142° จะมีประสิทธิภาพการรับแสงที่ต่ำกว่า โดยมีค่า Transposition Factor เท่ากับ 0.90 และ Loss with Respect to Optimum 14.9% ในการสร้างระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หากสามารถวางโมดูลทำมุม Azimuth เข้าใกล้ 0° จะทำให้ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น (ศาตรา ศิริแก้ว, วุฒิสาสตร์ โชคเกื้อ, อนุสรณ์ แสงประจักษ์, และ ชโลธร สีหาทิพย์, 2562) นอกจากนี้มุมเอียงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นอย่างมาก การศึกษาในครั้งนี้พบว่า ณ พิกัดเทศบาลตำบลแม่เมาะ (ละติจูด 18.2728°N และลองจิจูด 99.6508°E) มุมเอียงโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 20° สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า 152.10 MWh/ปี มีค่า ROI ของระบบเท่ากับ 164.3% แต่หากปรับมุมเอียงเท่ากับ 10° จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด 154.10 MWh/ปี มีค่า ROI ของระบบเท่ากับ 167.9% ดังรูปที่ 5(ก) เนื่องจากโมดูลบางส่วนมีทิศทางหันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ดังนั้นเพื่อให้การรับแสงอาทิตย์ที่ดี ต้องมีมุมเอียงที่ต่ำ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (T_a) มีผลทำให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง โดยเมื่ออุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีค่าสูงจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูงตามไปด้วย ส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า (PR) มีค่าลดลง (พีระวุฒิ ชินวรรังสี

และคนอื่นๆ, 2558) จากตารางที่ 3 ในเดือนเมษายน ($T_a = 29.81^\circ\text{C}$) มีค่า GlobInc เท่ากับ 169.1 kWh/m^2 ซึ่งสูงกว่าเดือนมกราคม ($T_a = 22.22^\circ\text{C}$) มีค่า GlobInc เท่ากับ 149.6 kWh/m^2 แต่กลับมีสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า (PR) ต่ำกว่า โดยเดือนเมษายนมีค่า $\text{PR} = 0.697$ และเดือนมกราคมมีค่า $\text{PR} = 0.722$ การจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst มีความแม่นยำและให้ความถูกต้องสูงมากถึง $79.59\text{--}89.77\%$ เมื่อเทียบกับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง (พงษ์ศักดิ์ มะขามป้อม และคนอื่นๆ, 2561; กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564)

ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง ทางภาครัฐให้การสนับสนุนในรูปแบบ Feed-in Tariff (FiT) มีการรับซื้อในราคา 6.40 บาท/kWh ตลอดอายุโครงการ 25 ปี ทำให้มีราคาที่ชัดเจนและแน่นอน (กระทรวงพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2564) ดังนั้นหากทำสัญญาซื้อขายกระแสไฟฟ้าให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในราคา 6.40 บาท/kWh จะทำให้โครงการนี้มีอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนเพิ่มขึ้นจาก 164.3% เป็น 263.7% และมีระยะเวลาคืนทุนเร็วขึ้นจาก 8.3 ปี เป็น 6.1 ปี ส่งผลทำให้โครงการมีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้น การสนับสนุนเงินลงทุนและมาตรการส่งเสริมการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของภาครัฐมีส่วนสำคัญมากที่จะช่วยผลักดันให้ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยเสริมความมั่นคงในระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยได้



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

พิกัดเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์พื้นที่ 1 m^2 ตลอดทั้งปีเท่ากับ $1,859.0 \text{ kWh/m}^2$ อุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.36°C ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 m/s และการกระจายของดัชนีความใสบรรยากาศ มีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.532 เมื่อจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ PVsyst 7.1 โดยใช้พื้นที่หลังคาของเทศบาลรวม 704 m^2 พบว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปีมีค่าเท่ากับ 152.12 MWh สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.711 การสูญเสียพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด จำแนกเป็นการสูญเสียจากอัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 12.50% (ระยะเวลา 25 ปี) การสูญเสียเนื่องจากอุณหภูมิเซลล์ 11.00% และมีการสูญเสียขณะใช้งาน Inverter 3.5% โดยประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (STC) เท่ากับ 16.81% และความแม่นยำของการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 เปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตจริงมีค่าเท่ากับ 84.44% โครงการนี้มีค่าผลตอบแทนจาก

การลงทุนสูงถึง 164.3% มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 2,364,334 บาท และระยะเวลาคืนทุน 8.3 ปี โครงการนี้ยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 91.06 tCO₂eq/ปี หรือตลอดทั้งอายุโครงการ 25 ปี มีค่าเท่ากับ 2,139.89 tCO₂eq

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. จากการนำเสนอข้อมูลการวิจัยต่อเทศบาลตำบลแม่เมาะ พบว่าทางเทศบาลมีความสนใจในการสร้างระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง และได้แนะนำให้ทางเทศบาลบรรจุโครงการในแผนพัฒนาเทศบาลตำบลแม่เมาะเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเขียนข้อเสนอโครงการในการของบประมาณจากกองทุนพัฒนาไฟฟ้า โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งกองทุนนี้มีงบประมาณมากกว่า 280 ล้านบาทต่อปี และมีการสนับสนุนโครงการด้านพลังงานของชุมชนในพื้นที่อำเภอแม่เมาะ

2. ผลการศึกษานี้นำไปสู่การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและสามารถขยายผลสู่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นๆ เนื่องจากให้ผลตอบแทนสูง คืนทุนเร็ว สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรทำการศึกษาข้อมูลความสามารถในการรับน้ำหนักระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารที่จะทำการติดตั้งระบบ เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในโครงการ



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเทศบาลตำบลแม่เมาะที่ให้อำนาจหน้าที่และอนุเคราะห์ให้ข้อมูลขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา และมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ที่สนับสนุนการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้



เอกสารอ้างอิง

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม กรมอุตุนิยมวิทยา. (2564). *สารสนเทศอุตุนิยมวิทยาเพื่อการบริหาร*. สืบค้น 21 ธันวาคม 2564, จาก http://www.cmmet.tmd.go.th/forecast/pt/pt_map.php

กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2564ก). *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4 พลังงานชีวมวล*. สืบค้น 25 สิงหาคม 2564, จาก http://www.dede.go.th/article_attach/h_biomass.pdf

กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2564ข). *รายงานการจัดการพลังงาน ประจำปี 2562*. ลำปาง: หจก. พี แอนด์ พี พรีพาร์ท.

- กระทรวงพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2564ก). *สถิติพลังงานไฟฟ้า*. สืบค้น 25 สิงหาคม 2564, จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/staticenergy/static-electricity>
- กระทรวงพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2564ข). *นโยบายการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน*. สืบค้น 20 ธันวาคม 2564, จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/electricity/plan-buy-renewenergy>
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2564). *ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด*. สืบค้น 25 สิงหาคม 2564, จาก https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=353&Itemid=200
- ธนาพล ตันติสัตยกุล, พีรพล รัชมีธรรมโชติ, และ เมธาพร อู่สกุล. (2560). การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงาน สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 25(6), 1083–1099.
- พงษ์ศักดิ์ มะขามป้อม และคนอื่นๆ. (2561). การศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาขนาด 3 kWp เพื่อรองรับระบบโซลาร์เสรีสำหรับเมืองไทย. ใน *รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14*, (น. 815–821). 13–15 มิถุนายน 2561. ระยอง: โรงแรมโนโวเทล ระยองริมเพ รีสอร์ท.
- พีระวุฒิ ชินวรรังสี และคนอื่นๆ. (2558). การประเมินสมรรถนะ และความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายเทคโนโลยีที่ติดตั้งบนหลังคาในประเทศไทย. *วิศวกรรมลาดกระบัง*, 32(2), 19–24.
- ศาดตรา ศิริแก้ว, วุฒิสาสตร์ โชคเกื้อ, อนุสรณ์ แสงประจักษ์, และ ชโลธร สีหาทิพย์. (2562). การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์: กรณีศึกษา อาคารสำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 11(21), 179–192.
- องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2564). *Emission Factor คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ มีนาคม 2564*. สืบค้น 25 สิงหาคม 2564, จาก http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_b934985782.pdf

- International Renewable Energy Agency. (2015). *Renewable Power Generation Costs in 2014*, 75–92. Retrieved August 25, 2021, from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf
- Irwana, Y. M. et al. (2015). Stand-alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYST Software. *Energy Procedia*, 79, 596–603.
- Kandasamy, C. P., Prabu, P., & Niruba, K. (2013). Solar Potential Assessment using PVSYST Software. In *International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)*, (pp. 667–672). Chennai: India.
- Karakosta, C., Flouri, M., Dimopoulou, S., & Psarras, J. (2012). Analysis of Renewable Energy Progress in the Western Balkan Countries: Bosnia-Herzegovina and Serbia. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5166–5175.
- Pearce, J. M. (2002). Photovoltaics-a Path to Sustainable Futures. *Futures*, 34(7), 663–674.
- Sgroi, F. et al. (2015). Economic Assessment of *Eucalyptus* (spp.) for Biomass Production as Alternative Crop in Southern Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 614–619.
- Sgroi, F., Tudisca, S., Di Trapani, A. M., Testa, R., and Squatrito, R. (2014). Efficacy and Efficiency of Italian Energy Policy: the Case of PV Systems in Greenhouse Farms. *Energies*, 7(6), 3985–4001.
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). A Comprehensive Review on Design of Building Integrated Photovoltaic System. *Energy Build*, 128, 99–110.
- Zeyringer, M. et al. (2015). Analyzing Grid Extension and Stand-alone Photovoltaic Systems for the Cost-effective Electrification of Kenya. *Energy Sustain Dev.*, 25, 75–86.