

การศึกษาความเป็นไปได้เชิงพื้นที่ของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
กรณีศึกษา พื้นที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

The Study of Location Analysis for Installation of Electric Power System
from Solar Cells with the Study Case of Mae Moh, Lampang

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชร วงศ์ปัญญา¹

Assistant Professor Dr. Watchara Wongpanyo

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศธร คำใจหนัก²

Assistant Professor Dr. Pongsatorn Khamjainuk

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราคม วงศ์ชัย³

Assistant Professor Dr. Warakhom Wongchai

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาภรณ์ ทองแป้น⁴

Assistant Professor Dr. Ratchadaporn Thongpaen

ดร.ธัญญพัทธ์ ทิพย์ศุภวงศ์^{5*}

Dr. Thunyapat Tipsupawong

¹คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา พะเยา 56000 ประเทศไทย

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

^{2, 4}คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100 ประเทศไทย

^{2, 4}Faculty of Education, Lampang Rajabhat University, Lampang 52100, Thailand

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100 ประเทศไทย

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

^{5*}หน่วยปฏิบัติการส่วนหน้า อว.มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100 ประเทศไทย

^{5*}Operation unit Rajabhat University, Lampang 52100, Thailand

*Corresponding Author. thunyapat_jeab@hotmail.co.th

(Received: May 19, 2024, Revised: July 1, 2024, Accepted: July 15, 2024)

บทคัดย่อ : สถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้หน่วยงานภาครัฐต้องจัดหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า และเสริมความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่ได้จากธรรมชาติเป็นพลังงานที่สะอาดที่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างไม่จำกัดและสามารถเข้าถึงได้ทุกพื้นที่ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เชิงพื้นที่เพื่อการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีศึกษา พื้นที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง วิธีการศึกษาเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลและสำรวจเชิงพื้นที่เพื่อออกแบบระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และได้มีการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จากการศึกษาพื้นที่กรณีศึกษา โดย

สำรวจพื้นที่ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์หาทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมพร้อมทั้งดำเนินการประเมินพื้นที่ หมู่บ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีพื้นที่ว่างเปล่ามากกว่า 420,000 ตารางเมตร จากการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 พบว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ย 815.2 MWh ต่อปี ส่งผลทำให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 488.0 tCO₂-eq /ปี หรือ 11,494.8 tCO₂-eq ตลอดอายุโครงการ 25 ปี เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ย (LCOE) ตลอดอายุโครงการเท่ากับ 1.102 บาท/kWh มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 26,836,588 บาท มีค่าผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) เท่ากับ 311.97% มีค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 27.66% และมีค่าระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3.63 ปี พื้นที่ดังกล่าวจึงเป็นพื้นที่ที่สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้และเกิดความคุ้มค่าในการดำเนินโครงการ

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ การจำลองระบบ PVsyst การปล่อยก๊าซเรือนกระจก พลังงานทดแทน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Abstract: The situation of consuming electrical energy in Thailand is increasing rapidly. Therefore, government agencies should provide new energy sources to comply with the demand and to strengthen national energy security. Solar energy is renewable and clean energy from nature that can be used without limitations, and it is accessible to everybody. This research aimed to study location possibility for installing electric power system from solar cells with the study case of the area in Mae Moh, Lampang. At the location, according to geographic information system used for finding and evaluating proper location in Jampui, Ban Dong, Mae Moh, Lampang, there is vacant land of 420,000 Sq.m. According to the simulation of using PVSyst 7.1 software to generate electric power from solar cells, it was found that it can generate electricity 815.2 MWh per year. It can reduce the Greenhouse gas emission down to 488.0 tCO₂-eq /year or 11,494.8 tCO₂-eq in 25 years. When considering economic, it was found that the Levelized Cost of Electricity for the project is 1.102 baht/kWh and Net Present Value is 26,836,588 baht. The Return-on-Investment equals 311.97% with 3.36 years of payback period. The area is possible for installation of electric power system from solar cells and it will make benefits from the project.

Keywords: Solar PV System, Geographic Information System, Simulation, PVSyst, Greenhouse Gas Emission, Renewable energy, Economics Value

1. บทนำ

จากรายงานการสำรวจตลาดและนโยบายภาครัฐของประเทศต่าง ๆ ขององค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency, IEA) ระบุว่ารายงานแนวโน้มพลังงานโลก (World Energy Outlook 2018) มีความต้องการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้นเกิน 1 ใน 4 ระหว่างปี 2017 จนถึง 2040 โดยตัวเลขนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าทั่วโลกใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่หากไม่มีพัฒนาการดังกล่าวความต้องการใช้พลังงานจะเพิ่มเป็น 2 เท่าของที่คาดการณ์เอาไว้ [1]

สถานการณ์การใช้พลังงานของประเทศไทยปี พ.ศ. 2566 จากรายงานสถิติพลังงาน, กระทรวงพลังงานพบว่าโดยภาพรวมมีการใช้พลังงานในประเทศเพิ่มขึ้นจากการใช้พลังงานในภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม ภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจการค้า และภาคขนส่ง มีปริมาณ 1,361, 19,092, 5,840, 4,136 และ 19,560 ktoe. ตามลำดับ ทั้งนี้ภาคเศรษฐกิจ ที่เป็นการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายมากที่สุดคือ ภาคขนส่ง คิดเป็น 39.1% รองลงมาเป็นการใช้ในภาคอุตสาหกรรม ภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจการค้า และภาคเกษตรกรรม 38.2%, 11.7%, 8.3% และ 2.7% ตามลำดับ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณปีละ 6,666 จิกะวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 3.4 มีการใช้รวมทั้งสิ้น 203,923 จิกะวัตต์ชั่วโมง [2] จากการเติบโตและการพัฒนาประเทศไทยอย่างรวดเร็วในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมา ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้หน่วยงานภาครัฐต้องจัดหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า และเสริมความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ ซึ่งทางรัฐบาลจึงได้มอบหมายให้กระทรวงพลังงานจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan : AEDP 2015) เพื่อแก้ปัญหาพลังงานในประเทศ

สำหรับการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจจากทั้งในภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และภาคประชาชน ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพของพลังงานทดแทนที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้มีหลายประเภทด้วยกัน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล และที่ผ่านมามีการนำพลังงานเหล่านี้มาใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วในบางส่วน เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ทำการผลิตไฟฟ้าผ่านโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เขื่อนสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผาป่อง จังหวัดแม่ฮ่องสอน เป็นต้น เพื่อตอบสนองนโยบายของภาครัฐที่ต้องการกระจายแหล่งเชื้อเพลิง ผลิตไฟฟ้าที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในราคาที่เป็นธรรม

ปัจจุบันประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงฟอสซิล ไฟฟ้านำเข้า พลังงานหมุนเวียนและอื่น ๆ คิดเป็น 59%, 14%, 13%, 9% และ 5% ตามลำดับ [3] ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนขนาดใหญ่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดำเนินการผลิตกระแสไฟฟ้าส่งให้กับประชาชน เมื่อปี พ.ศ. 2521 จนถึงปัจจุบัน มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าตามสัญญา จำนวน 2,220 เมกะวัตต์ ถือเป็นโรงไฟฟ้าหลักที่สร้างความมั่นคงด้านพลังงาน สามารถรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าในภาคเหนือ ถึงแม้ว่าปัจจุบันโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ติดตั้งเครื่องกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization : FGD) และนำมาตรการควบคุมตามมาตรฐานสากล มาใช้ในการดำเนินงานภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะแล้วก็ตาม แต่ก็ยังประสบปัญหาการไม่ยอมรับของประชาชนในพื้นที่ เนื่องจากความกังวลเรื่องการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ

จากสภาพปัญหาและข้อจำกัดที่กล่าวมาแล้วนั้น ผู้วิจัยจึงมองเห็นความจำเป็นในการพัฒนาพลังงานทดแทนมาใช้ในพื้นที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เนื่องจาก

ภายในอำเภอแม่เมาะมีแหล่งทรัพยากรทางธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ ทั้งป่าไม้ แหล่งน้ำ รวมถึงประชาชนในพื้นที่มีอาชีพทำการเกษตรเป็นหลักและมีภูมิประเทศอยู่ในบริเวณที่มีความพร้อมทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาพัฒนาใช้ประโยชน์ อีกทั้งเสริมศักยภาพความมั่นคงด้านพลังงานให้กับหมู่บ้านที่อยู่ห่างไกลรวมถึงบ้านจำปุย หมู่ 4 ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นหมู่บ้าน OTOP นวัตกรรม เป็นหมู่บ้านท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมีสถานที่ท่องเที่ยวหลายแห่ง เช่น ฝายปรง ภาพเขียนสี ค่ายประตูลา และมีอัตลักษณ์ที่สำคัญของหมู่บ้านคือ เป็นหมู่บ้านที่มีหลากหลายชนเผ่า มีกลุ่มชาติพันธุ์อาศัยอยู่ร่วมกัน 4 กลุ่มคือ เมี่ยน (เย้า) ปกาเกอญอ (กะเหรี่ยง) ขมุและคนพื้นเมือง ซึ่งในแต่ละปีมีนักท่องเที่ยวมาเที่ยวชมหมู่บ้านนี้เป็นจำนวนมาก ที่ผ่านมามีบ้านจำปุย ประสบปัญหากระแสไฟฟ้าตกบ่อย เนื่องจากเป็นหมู่บ้านที่อยู่ปลายสายทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าชำรุดเกิดความเสียหายขึ้นบ่อยครั้ง

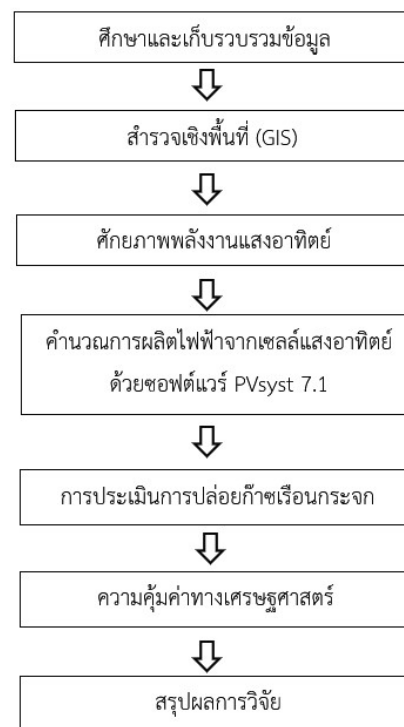
ในปี พ.ศ. 2565 เทศบาลตำบลแม่เมาะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 221.10 MWh เป็นเงิน 1,052,623 บาท คิดเป็นค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.74 บาท/kWh [4] ดังนั้นเพื่อเสริมความมั่นคงทางด้านพลังงานไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงศึกษาความเป็นไปได้เชิงพื้นที่ ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในด้านศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปีหรือค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (kW/m^2) การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกการติดตั้ง และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อนำระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาให้กับหมู่บ้านแห่งนี้

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่หมู่บ้านจำปุย

3. วิธีดำเนินการศึกษา

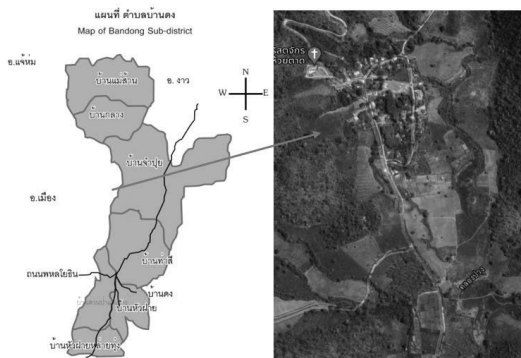
ขั้นตอนวิธีการศึกษาความเป็นไปได้เชิงพื้นที่ การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีศึกษา พื้นที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีรายละเอียดของการศึกษาดำเนินการวิจัย ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลพื้นที่การศึกษา คือบ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นหมู่บ้านชาวเขาอยู่กลางดอย มีประชากร จำนวน 771 คน มีจำนวนครัวเรือนทั้งหมด 230 ครัวเรือน ลักษณะภูมิประเทศของตำบลบ้านดง มีลักษณะเป็นที่ราบสลับภูเขาโดยมีภูเขาล้อมรอบ มีแนวเขาที่เป็นสันปันน้ำเชื่อมต่อกับเขตอุทยานแห่งชาติแจ้ซ้อนและอุทยานแห่งชาติถ้ำผาไท โดยมีที่ตั้งและลักษณะหมู่บ้าน [5] ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนที่ตั้งและลักษณะหมู่บ้านจำปุย

จากการศึกษาข้อมูลในพื้นที่พบว่าชุมชน มีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 500 kVA และเป็นชุมชนที่อยู่ปลายสาย จึงทำให้เกิดไฟฟ้าตกอยู่บ่อยครั้ง ดังนั้นหากมีการสร้างระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ก็จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้

3.2 สำรวจเชิงพื้นที่ (GIS)

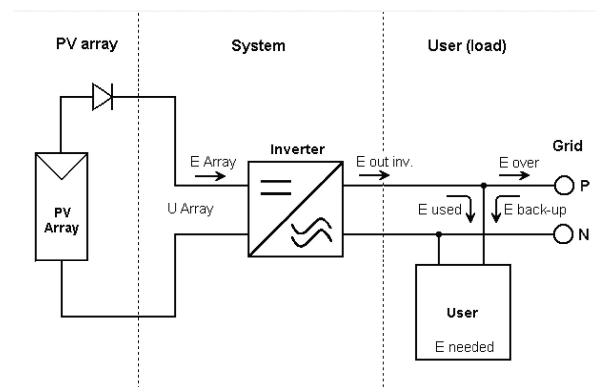
ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์หาทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม พร้อมทั้งดำเนินการประเมินพื้นที่ด้วย Google map และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS)

3.3 คำนวณศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์และการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1

ข้อมูลศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย ข้อมูลศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปีหรือค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (kW/m^2) วิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 พื้นที่หมู่บ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

การออกแบบระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โครงการนี้ เป็นการเชื่อมโยงแบบระบบสายส่ง มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Poly Crystalline Silicon) และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อสายส่งจะต้องมีคุณสมบัติในการสร้างไฟฟ้ากระแส

สลับที่มีลักษณะรูปคลื่นที่ออกมาแบบ Sine wave และเครื่องแปลง กระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อบรรยากาศสามเฟส (Grid-connected or Grid tied inverter) ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) ระบบจำหน่าย (Grid) และภาระไฟฟ้า (AC loads) โดยรับไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งมีความถี่และแรงดันเดียวกับระบบจำหน่าย และมีส่วนประกอบอื่น ๆ ตามมาตรฐานไฟฟ้า ได้แก่ ก่อ่ง ฟิวส์ อุปกรณ์จับยึดแผง ตู้รวมสาย ระบบป้องกันฟ้าผ่า เบรกเกอร์ สายส่งไฟฟ้า การเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายหลักโดยตรง สามารถใช้ได้กับระบบ 3 เฟส เพื่อให้ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่ายได้สูงสุดเสมอ การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยและมีราคาต่ำสุดจากใบเสนอราคาของบริษัทที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีภาพการเชื่อมต่อของระบบ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของตำบลแม่เมาะ

3.4 การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการคำนวณจากการใช้ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของโครงการมาคูณกับค่าการ

ปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจกและแสดงผลให้อยู่ในรูปของมวล (ตันต่อกิโลกรัม) คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂eq) ดังสมการที่ 1 [6]

$$GHG_i = A_i \times EF_i \quad (1)$$

GHG_i คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจก tCO₂eq

A_i คือ ข้อมูลกิจกรรมที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก (Unit)

EF_i คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วย

3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการศึกษาในครั้งนี้พิจารณาจากต้นทุนของระบบ ต้นทุนค่าบำรุงรักษาระบบ และผลประโยชน์จากการดำเนินโครงการ ซึ่งพิจารณาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ย (Levelized cost of electricity; LCOE) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value; NPV) ผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on investment; ROI) ระยะเวลาคืนทุน (Payback period; PP) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return; IRR)

3.5.1 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (LCOE)

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ยตลอดอายุโครงการโดยไม่คำนึงถึงมูลค่าของเงินตามเวลา เป็นที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าระหว่างเทคโนโลยีการผลิตต่าง ๆ การคำนวณดังสมการที่ 2 [7]

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{I_i + M_i}{(1+r/100)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1+r/100)^i}} \quad (2)$$

เมื่อ LCOE คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (บาท/kWh)

I_t คือ เงินลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท)

M_t คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาในปีที่ t (บาท/ปี)

E_t คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปีที่ t (kWh/ปี)

r คือ อัตราการคิดลด (%)

n คือ อายุโครงการ

3.5.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นวิธีคำนวณหาผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับในอนาคตตามอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการหรือต้นทุนเงินทุนกับต้นทุนเงินทุนเริ่มแรก คำนวณดังสมการที่ 3 [8]

$$NPV = \sum_{t=1}^n \left(\frac{C_t}{(1+r)^t} \right) - I \quad (3)$$

เมื่อ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

I คือ เงินลงทุนเริ่มแรก

C_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิในแต่ละงวด

t คือ ปีที่ 1 ถึงปีที่ n

n คือ จำนวนงวดดอกเบี้ย/จำนวนปี

r คือ อัตราดอกเบี้ย/ผลตอบแทน

3.5.3 ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI)

ผลตอบแทนจากการลงทุนเป็นตัวเลखวัดผลตอบแทนหรือกำไรจากการลงทุน เพื่อวัดประสิทธิภาพในการลงทุนว่ามีความคุ้มค่า มีกำไรหรือขาดทุนมากน้อยเพียงใด คำนวณดังสมการที่ 4 [9]

$$ROI = \frac{\text{รายรับ-ต้นทุน}}{\text{ต้นทุน}} \times 100 \quad (4)$$

3.5.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

อัตราผลตอบแทนภายใน หมายถึง อัตราส่วนลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับศูนย์ หรืออัตราส่วนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของ

ผลประโยชน์เท่ากับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนคำนวณ
ดังสมการที่ 5 [10]

$$IRR = \sum_{t=1}^n \left(\frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \right) = 0 \quad (5)$$

เมื่อ B_t คือ ผลตอบแทนในปีที่ t

C_t คือ ต้นทุนในปีที่ t

i คือ อัตราผลตอบแทนของโครงการ

t คือ ระยะเวลาของปี มีค่าตั้งแต่ 0,1,2,... , n

n คือ อายุของโครงการ n ปี

3.5.5 ระยะเวลาคืนทุน (PP)

ระยะเวลาคืนทุนเป็นการหารระยะเวลาที่ผลตอบแทนจากการดำเนินงานแต่ละปีรวมกันเท่ากับจำนวนเงินที่ลงทุนทั้งหมดคำนวณดังสมการที่ 6 [11]

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนเมื่อเริ่มโครงการ}}{\text{กระแสเงินสดรับสุทธิรายปี}} \quad (6)$$

4. ผลการศึกษา

การศึกษาความเป็นไปได้ การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีศึกษา พื้นที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีผลการวิเคราะห์ ดังนี้

4.1 สำรวจและวิเคราะห์พื้นที่ โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์หาขนาดและทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม พร้อมทั้งดำเนินการประเมินพื้นที่ด้วย Google map และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) จากการศึกษาพื้นที่ว่างเปล่าของบ้านจำปุย พบว่า มีพื้นที่มากกว่า 0.42 km^2 หรือ 420,000 m^2 จากการจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 ดังภาพที่ 4



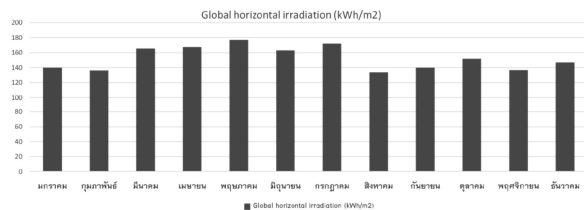
ภาพที่ 4 พื้นที่ว่างเปล่าของบ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

4.2 ผลการวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี โดยใช้ซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 ของหมู่บ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พบว่ามีศักยภาพค่อนข้างสูงเหมาะสมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของบ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

เดือน	Ambient Temperature (°C)	Global horizontal irradiation (kWh/m ²)
มกราคม	21.0	140.0
กุมภาพันธ์	23.7	136.1
มีนาคม	26.7	165.3
เมษายน	28.8	167.5
พฤษภาคม	27.6	177.0
มิถุนายน	27.2	162.9
กรกฎาคม	27.3	172.3
สิงหาคม	27.0	134.0
กันยายน	26.1	140.3
ตุลาคม	25.8	152.0
พฤศจิกายน	22.7	136.9
ธันวาคม	21.0	146.9
รวมทั้งปี	25.4	1,831.3

จากตารางที่ 1 ศักยภาพรังสีรวมของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกบนพื้นราบ (Global horizontal irradiation) ของบ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีค่าสูงสุด ในเดือนพฤษภาคม เท่ากับ 177.0 kWh/m^2 และมีค่าต่ำสุดในเดือนสิงหาคม เท่ากับ 134.0 kWh/m^2 และมีค่ารวมทั้งปีเท่ากับ $1,831.3 \text{ kWh/m}^2$ และมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (kWh/m^2) ดังภาพที่ 5



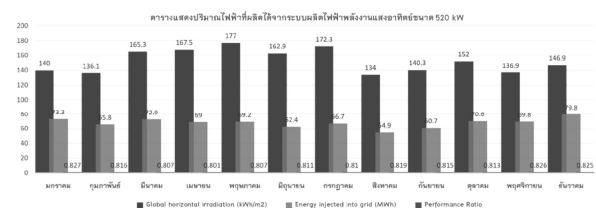
ภาพที่ 5 กราฟแสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์บ้านจำปุย ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

4.3 ผลการวิเคราะห์การจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst 7.1 พบว่า พื้นที่ว่างเปล่า ดังกล่าว สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 520 kWp (Normal STC) โดยเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีขายในประเทศไทยเป็นหลักและมีราคาต่ำสุด ประกอบด้วยอุปกรณ์ติดตั้งและคุณลักษณะ PV module (JKM 325PP-72 Plus) ขนาด 325 kWp จำนวน 1,600 แผง ราคา 5,000 บาทต่อแผง และ Inverter SolarEdge ขนาด 33.3 kWac จำนวน 14 หน่วย ราคา 87,975 บาทต่อหน่วย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

Configuration	PV module	Inverter
PV/Inverter model	Jinkosolar JKM 325PP-72 (Plus)	SolarEdge SE27.6K-EU-APAC/AUS
Unit Nom. Power	325 W_p	33.3 kW_{ac}
Number of PV/Inverter modules	1,600 units	14 units
Nominal (STC)	116 kW_p	110 kW_{ac}
Total module area	$3,105 \text{ m}^2$	-
Pnom ratio	-	1.05

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้พื้นที่ขนาด $420,000 \text{ m}^2$ (พื้นที่ว่างเปล่า) ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 520 kWp โดยสามารถผลิตปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งสิ้น $3,105 \text{ m}^2$ ดังภาพที่ 6 และตารางที่ 3



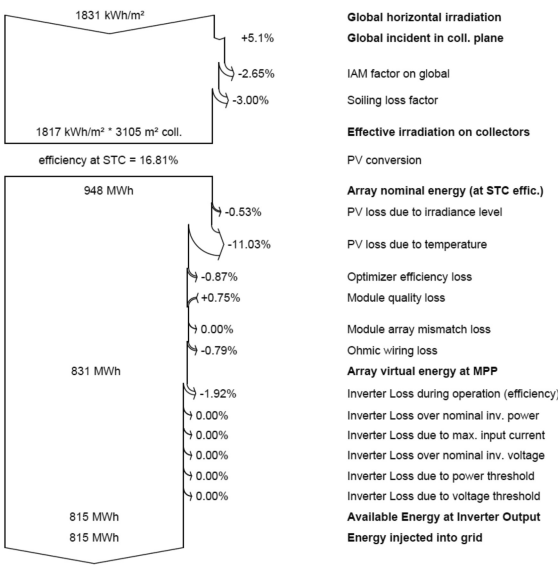
ภาพที่ 6 ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 520 kWp

ตารางที่ 3 ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้า
เซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 520 kWp

เดือน	Global horizon- tal irradiation (kWh/m ²)	Energy injected into grid (MWh)	Performance Ratio
มกราคม	140.0	73.3	0.827
กุมภาพันธ์	136.1	65.8	0.816
มีนาคม	165.3	72.9	0.807
เมษายน	167.5	69.0	0.801
พฤษภาคม	177.0	69.2	0.807
มิถุนายน	162.9	62.4	0.811
กรกฎาคม	172.3	66.7	0.810
สิงหาคม	134.0	54.9	0.819
กันยายน	140.3	60.7	0.815
ตุลาคม	152.0	70.6	0.813
พฤศจิกายน	136.9	69.8	0.826
ธันวาคม	146.9	79.8	0.825
รวมทั้งปี	1,831.3	815.2	0.815

จากข้อมูลการจำลองระบบในตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Energy injected into grid) ทั้งปีมีค่าเท่ากับ 815.2 MWh ในเดือนธันวาคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 79.8 MWh และเดือนสิงหาคมผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ต่ำสุดเท่ากับ 54.9 MWh เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า (PR) พบว่ามีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.815 โดยในเดือนมกราคมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.827 และเดือนเมษายนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.801

4.4 ผลการวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด จำแนกเป็นการสูญเสียจากการสูญเสียเนื่องจากอุณหภูมิเซลล์ 11.03% และมีการสูญเสียขณะใช้งาน Inverter 1.92% โดยประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (STC) เท่ากับ 16.81% ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การสูญเสียพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์
แสงอาทิตย์

4.5 ผลการวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก การผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 520 kWp สามารถทดแทนการผลิตไฟฟ้าจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ 815.2 MWh/ปี หรือ 19,202.8 MWh ตลอดอายุโครงการ 25 ปี (อัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 0.5% ต่อปี) ส่งผลทำให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 488.0 tCO₂-eq/ปี หรือคิดเป็น 11,494.8 tCO₂-eq ตลอดอายุโครงการ 25 ปี (Emission factor ของไฟฟ้าเท่ากับ 0.5986 kgCO₂-eq/kWh)

4.6 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือต้นทุนการติดตั้ง (Installation costs) และต้นทุนการดำเนินการ (Operating costs) โดยต้นทุนราคาของส่วนประกอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ค่าเฉลี่ยจากการสำรวจข้อมูลราคาขายจริงของบริษัทต่าง ๆ ในประเทศไทย ณ เดือนมิถุนายน 2566 อายุโครงการนี้กำหนดให้เท่ากับ 25 ปี อัตราการคิดลด 7% อัตราเงินเฟ้อ 3% และอัตราการเสื่อมของแผง

เซลล์แสงอาทิตย์ 0.5%/ปี ตลอดทั้งอายุโครงการ 25 ปี
ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

รายการ	ค่าอธิบาย
อายุโครงการ	25 ปี
อัตราการศึกษา	7%
อัตราเงินเฟ้อ	3%
อัตราการเสื่อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	0.5%
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	7,998,400 บาท
อินเวอร์เตอร์และหน่วยปรับสภาพพลังงาน	1,231,650 บาท
อุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่าย การติดตั้ง และการบริหารจัดการ	7,831,683 บาท
การบำรุงรักษา	138,033 บาท/ปี
LCOE	1.102 บาท/kWh
NPV	26,836,588 บาท
ROI	311.97%
IRR	27.66%
PP	3.63 ปี

จากข้อมูลดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าศักยภาพ
พลังงานแสงอาทิตย์ของอำเภอแม่เมาะ อยู่ในเกณฑ์สูง
สามารถพัฒนาและสนับสนุนส่งเสริมเทคโนโลยีการใช้
พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็น
พลังงานทดแทนได้

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เชิง
พื้นที่เพื่อการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
กรณีศึกษา พื้นที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง วิธีการ
ศึกษาเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลและสำรวจเชิงพื้นที่เพื่อ
ออกแบบระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ
ได้มีการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความ
คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจาก

เซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า
ได้เฉลี่ย 815.2 MWh/ปี โดยทิศทางการวางโมดูลเซลล์
แสงอาทิตย์มีความสำคัญต่อปริมาณการผลิตไฟฟ้าเป็น
อย่างมาก ซึ่งพบว่าการวางโมดูลทำมุม Azimuth -50°
มีค่า Transposition factor FT เท่ากับ 1.03 และ Loss
with respect to optimum 2.7% ในส่วนของการวาง
โมดูลทำมุม Azimuth -142° จะมีประสิทธิภาพการรับ
แสงที่ต่ำกว่า โดยมีค่า Transposition factor FT เท่ากับ
0.90 และ Loss with respect to optimum 14.9% ใน
การสร้างระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หากสามารถ
วางโมดูลทำมุม Azimuth เข้าใกล้ 0° จะทำให้ระบบ
สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น

มุมเอียงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีผลต่อปริมาณ
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นอย่างมาก การศึกษาในครั้งนี้
พบว่า ณ พิกัดบ้านจำปุย ตำบลแม่เมาะ มุมเอียงโมดูล
เซลล์แสงอาทิตย์ 20° สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า 815.2
MWh/ปี มีค่า ROI ของระบบเท่ากับ 311.97% แต่
หากปรับมุมเอียงเท่ากับ 10° จะสามารถผลิตพลังงาน
ไฟฟ้าได้มากที่สุด 154.10 MWh/ปี มีค่า ROI ของระบบ
เท่ากับ 167.9% เนื่องจากโมดูลบางส่วนที่ทิศทางหันไป
ทางทิศตะวันออก ดังนั้นเพื่อให้การรับแสงอาทิตย์ที่ดีต้อง
มีมุมเอียงที่ต่ำ

อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (T_a) มีผลทำให้อุณหภูมิ
ของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงโดยเมื่ออุณหภูมิสภาพ
แวดล้อมมีค่าสูงจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของเซลล์แสง
อาทิตย์สูงตามไปด้วย ส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบผลิต
ไฟฟ้า (PR) มีค่าลดลง [12]

จากผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็น
ว่าเป็นโครงการที่น่าลงทุนเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้า
เท่ากับ 1.102 บาท/kWh [13] ซึ่งต่ำกว่าค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่
บ้านจำปุย ตำบลแม่เมาะต้องจ่ายในปัจจุบันเท่ากับ 4.74
บาท/kWh ในโครงการนี้ยังมีค่าผลตอบแทนจากการลงทุน
(ROI) สูงถึง 311.97% มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ
26,836,588 บาท ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

เท่ากับ 27.66% และระยะเวลาคืนทุน (PP) 3.63 ปี เมื่อเทียบกับอายุโครงการสามารถใช้งานได้ถึง 25 ปี แต่ถ้าวางในขนาดราคาค่าไฟฟ้ามีการปรับตัวสูงขึ้น 10% จะทำให้โครงการมีค่าผลตอบแทนจากการลงทุนเพิ่มขึ้นเป็น 353.16% และจะมีระยะเวลาคืนทุนเร็วขึ้นเป็น 3.19 ปี สอดคล้องกับผลการวิจัยของ ราชันย์ ชูชาติ [14] และ เขมิกา จิตจำนงค์ [15] ที่ได้ทำการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยพบว่ามีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เทศบาลตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้ให้ข้อมูลรวมถึงข้อคิดเห็นต่าง ๆ และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาตรวจสอบให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงต้นฉบับบทความดังกล่าวนี้

7. บรรณานุกรม

- (1) สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, (สืบค้นจาก <https://shorturl.at/IDNS3>).
- (2) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, รายงานสถานการณ์พลังงานปี 2566 และแนวโน้มปี 2567. กระทรวงพลังงาน, (2566).
- (3) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, รายงานสถานการณ์พลังงาน (รายไตรมาส) ครึ่งปีแรกของปี 2566. กระทรวงพลังงาน, (2566).
- (4) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, โครงการลดใช้พลังงานในภาครัฐ. (สืบค้นจาก <https://e-report.energy.go.th/cpr66/elec.php?dept=47514>), (2566).
- (5) กนิษฐกานต์ บันแก้ว, การศึกษาภูมิปัญญาท้องถิ่นกลุ่มชาติพันธุ์บ้านจำป๋วย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร, 10(1), หน้า 144-155, (2560).
- (6) เนตรนากานต์ สุนันตา และ เศรษฐ์ สัมภักตะกุล, การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากขยะเทศบาล ด้วยระบบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์. วารสารเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 1(1), หน้า 144-155, (2560).
- (7) ธนาพล ดันดีสัตยกุล, พิรพล รัชมีธรรมโชติ, และ เมฆาพร อู่สกุล, การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงานสิ่งแวดล้อม และ เศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 25(6), หน้า 1083-1099, (2560).
- (8) อนุรักษ์ ทองสุโขวงศ์, บทความการตัดสินใจเพื่อการลงทุน. (สืบค้นจาก https://home.kku.ac.th/anuton/3526301/Doc_04.pdf, (2554).
- (9) อมรศิริ ดิสสร, แนวโน้มการวัดผลตอบแทนการลงทุน (ROI) การฝึกอบรมแบบจำลองสมองแห่งการเรียนรู้. วารสารวิชาการศรีปทุม ชลบุรี, 15(2), หน้า 98-107, (2561).
- (10) จักรธิดา อิ่มแสง และ ชิตตะวัน ชนะกุล, การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินในการลงทุนโครงการ Co-Working Space ในกรุงเทพมหานคร: พื้นที่รัชดาภิเษกบริเวณแนวรถไฟฟ้า MRT. Journal of Buddhist Education and Research : JBER, 6(2), หน้า 136-149, (2563).
- (11) สิริพันธ์ บุตรเต, วิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนเพื่อขยายโรงงานผลิตเครื่องมือตัด. วิทยานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, (2555).
- (12) พิระวุฒิ ชินวรังสี และคณะ, การประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายเทคโนโลยีที่ติดตั้งบนหลังคาในประเทศไทย. วิศวกรรมลาดกระบัง, 32(2), หน้า 19-24, (2558).
- (13) N. Caglayan, The Technical and Economic Assessment of a Solar Rooftop Grid-Connected Photovoltaic System for a Dairy Farm. Energies, 16(20), p. 7043, (2023)
- (14) ราชันย์ ชูชาติ, การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีศึกษาโรงงานผลิตไม้ยางพาราแปรรูปในจังหวัดตรัง. วิทยานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, (2562).
- (15) เขมิกา จิตจำนงค์, "การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาสำหรับอาคารสำนักงานเชิงพาณิชย์ กรณีศึกษาโครงการซัมเมอร์ ลากาล. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, (2560).