ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความคุ้มทุนจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า กรณีศึกษา : อาคารโรงพยาบาลสัตว์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

Estimated Greenhouse Gas Emissions and Cost-Effects from Flat Roof Mounted Solar Cell Installation Case Study : Animal Hospital Building Chiang Rai Rajabhat University

ชัชชัย วรพัฒน์*

Chatchai Vorapat

สุรัตน์ เศษโพธิ์*

Surat Sedpho

นเรศ ใหญ่วงศ์**

Naret Yaiwong

Received : September 6, 2022

Revised : April 5, 2023

Accepted : June 16, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อจำลองการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ วิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน และวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้าของอาคารโรงพยาบาลสัตว์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย จากผลการศึกษาพบว่าสามารถติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังที่เป็นดาดฟ้า ขนาด 60 kWp ตลอดระยะเวลา 25 ปี สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เท่ากับ 2,324,972 kWh และผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ Life Cycle Assessment (LCA) พบว่าประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมในการก่อสร้าง (Construction) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.19 $kgCO_2eq/kWh$ และจากกิจกรรมซ่อมบำรุงรักษา (Operation & Maintenance) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.01 $kgCO_2eq/kWh$ และมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมรวมทั้งสิ้น เท่ากับ 0.20 $kgCO_2eq/kWh$ และจากการจำลองติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า (Flat Roof Mounted) ขนาด 60 kWp ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนตลอดระยะเวลาของโครงการ เท่ากับ 2,403,750 บาท พบว่ามีผลตอบแทนจากการลดการใช้ไฟฟ้าจากสายส่ง เท่ากับ

*อาจารย์ประจำสาขาพลังงานทดแทน คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา
Lecturer in Alternative Energy Faculty of Energy and Environment Phayao University

**อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
Lecturer in Department of Energy Engineering, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

8,459,949 บาท ตลอดระยะเวลา 25 ปี และมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เท่ากับ 265,215.71 บาท มีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) 5.43 ปี จากผลการประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าโครงการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีความคุ้มค่าในการลงทุน

คำสำคัญ : ก๊าซเรือนกระจก / ระยะเวลาคืนทุน / โปรแกรมออกแบบวิเคราะห์โซล่าเซลล์/เซลล์แสงอาทิตย์

ABSTRACT

This research study was conducted to simulate the installation of solar cells, cost-effectiveness analysis, and greenhouse gas (GHG) emissions from solar rooftop installations of animal hospital buildings, Chiang Rai Rajabhat University (CRRU). The results of the study showed that a 60 kWp solar rooftop system can be installed over a 25-year period, capable of generating electricity equal to 2,324,972 kWh. The results of the evaluation of greenhouse gas emissions based on the product life cycle assessment (LCA) principle found that construction activities have the highest amount of greenhouse gas emissions equal to 0.19 kgCO2eq/kWh. The operation and maintenance activities have greenhouse gas emissions equal to 0.01 kgCO2eq/kWh and total greenhouse gas emissions from all activities equal to 0.20 kgCO2eq/kWh. The simulation of installing a 60 kWp solar rooftop system (Flat Roof Mounted) resulted in an investment cost over the project period of 2,403,750 baht. The return on reduction of electricity consumption from transmission lines is 8,459,949 baht over 25 years. There is a net present value (NPV) equal to 265,215.71 baht and a payback period (PB) about 5.43 years. The positive NPV valuation results show that the solar rooftop system is worth the investment.

Keywords : Greenhouse Gases / Payback Period / PVsyst / Solar Cell

บทนำ

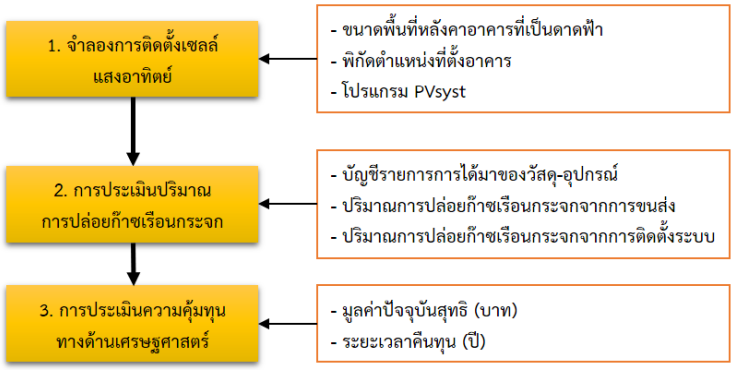
ปัจจุบันการดำเนินกิจกรรมในชีวิตของประชากรโลกมีความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทในการอำนวยความสะดวกสำหรับทุกกิจกรรมในชีวิตประจำวัน และการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ การพัฒนาสาธารณูปโภคพื้นฐาน ของประชากรโลกมีแนวโน้มที่ต้องพึ่งพาการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น และประเทศไทยก็เป็นประเทศที่กำลังพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมเมืองอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลทำให้ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พบว่าในปี พ.ศ. 2563 มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสุทธิ 191,934.55 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง และในปี พ.ศ. 2564 มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสุทธิ 194,868.69 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง เพิ่มขึ้น 2,934.14 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 1.53 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2565) และจากข้อมูลวันที่ 30 มิถุนายน 2565 รายงานกำลังการผลิต

พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยที่ส่งเข้าระบบของการไฟฟ้ามี 2 แหล่ง คือ กำลังผลิตจากแหล่งอื่น คิดเป็นร้อยละ 65.86 และกำลังผลิตของ กฟผ. คิดเป็นร้อยละ 34.14 และสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ กฟผ. จากแหล่งเชื้อเพลิง จากพลังความร้อน ร้อยละ 7.76 พลังความร้อนร่วม ร้อยละ 17.67 พลังงานหมุนเวียน ร้อยละ 6.54 ดีเซล ร้อยละ 0.06 และพลังงานอื่นๆ ร้อยละ 2.11 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2565) จากสัดส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้มาจากเชื้อเพลิงที่เป็นกลุ่มฟอสซิล ซึ่งทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกเป็นสภาวะโลกร้อน กระทรวงพลังงานได้มีการจัดทำแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2561-2580 ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ 15,464 เมกะวัตต์ โดยการเพิ่มสัดส่วนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (กระทรวงพลังงาน, 2563) มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายเป็นหน่วยงานหนึ่งที่ได้รับงบประมาณในโครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐ จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปีงบประมาณ 2560 สำหรับติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังอาคาร (Solar Rooftop) จำนวน 10 อาคาร ขนาดกำลังติดตั้ง 500 kWp ตามนโยบายของรัฐ เพื่อให้เกิดการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้แก่หน่วยงานภาครัฐและลดการใช้พลังงานในหน่วยงานภาครัฐ (มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, 2563) การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงาน สิ่งแสดล้อม และเศรษฐศาสตร์ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเรียนที่เป็นดาดฟ้า โดยการใช้โปรแกรม Google map ประเมินขนาดพื้นที่ และวิเคราะห์ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม RETscreen (ธนาพล และอัครินทร์, 2560) และการประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการใช้โปรแกรม Google Earth ในการคำนวณพื้นที่หลังคาอาคารที่เหมาะสมในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทำการประเมินศักยภาพเชิงเทคนิค (ณัฐพงศ์ และโสภิตสุดา, 2558) ส่วน การเลือกอาคารที่เหมาะสมจากลักษณะทางกายภาพปัจจุบันของอาคาร เช่น ร่มเงาจากสภาพแวดล้อม ทิศทางของหลังคาอาคาร เพื่อศึกษาแนวทางการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของหลังคาอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (พรสวัสดิ์, 2559) การใช้โปรแกรม PVsyst ทำการประเมินประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (ฉัตร และคนอื่นๆ 2560) และการใช้โปรแกรม PVsyst วิเคราะห์การจำลองสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กมากที่ติดตั้งใช้งานบนพื้นที่สูง อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน (ธนากร และอัครินทร์, 2560) ส่วนการศึกษาจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟาเซลล์แสงอาทิตยบนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ด้วยโปรแกรม PVsyst (ธัญญพัทธ์ และคนอื่นๆ 2565) การประเมินประสิทธิภาพด้านพลังงาน เศรษฐกิจของติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบนชั้นดาดฟ้าในอินเดีย พบว่ามีประสิทธิภาพ 75.70-84.81% และมีระยะเวลาคืนทุน 5.31-6.14 ปี (Satish & Usha, 2019)

ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงอาคารภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายยังมีศักยภาพหรือความเหมาะสมในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกอาคารโรงพยาบาลสัตว์

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายที่มีหลังคาที่เป็นดาดฟ้า เพื่อศึกษาศักยภาพพื้นที่ กำลังการติดตั้ง ความคุ้มค่าในการลงทุน รวมถึงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารของมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายหรือผู้ที่สนใจต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

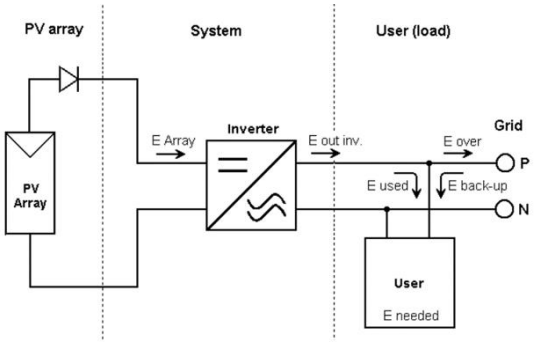


ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

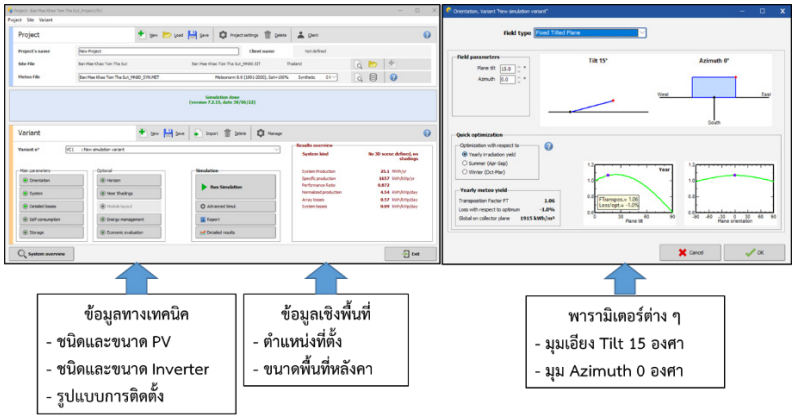
1. จำลองการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

1.1 สำรวจลักษณะทางกายภาพของอาคาร เกี่ยวกับมีสิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้บังเงาพื้นที่หลังคาหรือไม่ และวัดขนาดพื้นดาดฟ้าของอาคาร โดยการวัดระยะห่างจากขอบผนัง 1 เมตร

1.2 ทำการจำลองติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรม PVsyst Version 7.1 ในการวิเคราะห์การจำลองการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า แบบเชื่อมต่อกับการส่ง (On-Grid) ดังภาพที่ 2 และกำหนดตำแหน่งการติดตั้งที่ Latitude 19.98o N, Longitude 99.85o E, ระดับความสูง 406 m กำหนดให้มุม Azimuth 0° และมุมเอียงของแผง (Tilt) 15 องศา (มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, 2563) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ไดอะแกรมจำลองการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตยแบบเชื่อมต่อกับสายสง (On Grid System)



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำเข้าสู่โปรแกรม PVsyst

2. การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas: GHG)

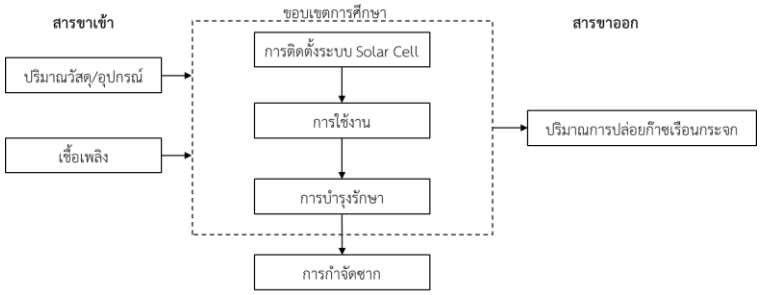
การประเมินก๊าซเรือนกระจก ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งเป็นการคำนวณจากการใช้ทรัพยากรทั้งหมดตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของทรัพยากร คำนวณหาได้จากสมการ (1) และกำหนดขอบเขตการประเมินก๊าซเรือนกระจก ดังภาพที่ 4

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

โดยที่ GHG_i คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (kg CO_{2eq})

A_i คือ จำนวนทรัพยากรที่ i (Unit)

EF_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของทรัพยากร i (kg CO_{2eq}/Unit)



ภาพที่ 4 ขอบเขตการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า

กำหนดสมมติฐาน และขอบเขตการพิจารณารูปแบบการขนส่งโดยใช้รถบรรทุก 10 ล้อ ขนาด 16 ตัน และคิดระยะทางจากจุดจำหน่ายวัสดุ-อุปกรณ์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ มายังมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

3. การประเมินความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุมทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นการประเมินต้นทุนต่อผลตอบแทนจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากสายส่ง โดยได้กำหนดข้อสมมติฐาน ดังตารางที่ 1 เพื่อใช้ในการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ และระยะเวลาคืนทุน ดังต่อไปนี้

- มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เป็นการคำนวณหาความแตกต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทน (PVB) และมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่าย ดังนั้น กรณีที่ผลการวิเคราะห์ NPV มีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าโครงการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนดาดฟ้ามีความคุ้มค่าในการลงทุน แต่ถ้า NPV มีค่าน้อยกว่า 0 หรือมีค่าติดลบ แสดงว่าโครงการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนดาดฟ้าไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) (พรสวัสดิ์, 2559)

$$NPV = PVB - PVC = \sum_{n=0}^{N} \frac{B_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \qquad (2)$$

โดยที่ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)

B_n คือ ผลตอบแทนในปีที่ n หาได้จากค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ x ราคาต่อหน่วยไฟฟ้า (บาท)

C_n คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ n เป็นค่าเปลี่ยนอุปกรณ์ และค่าบำรุงรักษา (บาท)

i คือ อัตราดอกเบี้ยคิดลด (%)

n คือ ระยะเวลาของโครงการ ปีที่ 0, 1, 2, ..., n (ปี)

N คือ อายุของโครงการ (ปี)

TIC คือ เงินลงทุนทั้งหมดตอนเริ่มต้นโคงการ (Total Investment Cost) (บาท)

- ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) หมายถึง ระยะเวลาที่กระแสเงินสดที่ได้รับเท่ากับเงินที่ลงทุน โดยระยะเวลาคืนทุนเป็นเครื่องมือที่ใช้บอกสภาพความเสี่ยงของโครง ซึ่งโครงการที่มีระยะคืนทุนที่สั้นจะมีสภาพคล่องสูงและมีค่าความเสียงต่ำ ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณหาค่า PB จากสมการที่ (3) (ณัฐพงศ์และโสภิตสุดา, 2558)

$$PB = Y_n + \frac{CF_c}{CF_y} \qquad (3)$$

โดยที่ PB คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี)

Y_n คือ จำนวนปีก่อนคืนทุน (ปี)

CF_C คือ กระแสเงินสดที่เหลือ (บาท)

CF_y คือ กระแสเงินสดทั้งปี จากค่าไฟฟ้า (Energy Cost Saving) ของปีที่มีการคืนทุน (บาท/ปี)

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาออกแบบและจำลองติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า (Flat Roof Mounted Solar Cell) รวมถึงการประเมินการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนี้

1. ผลการจำลองติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

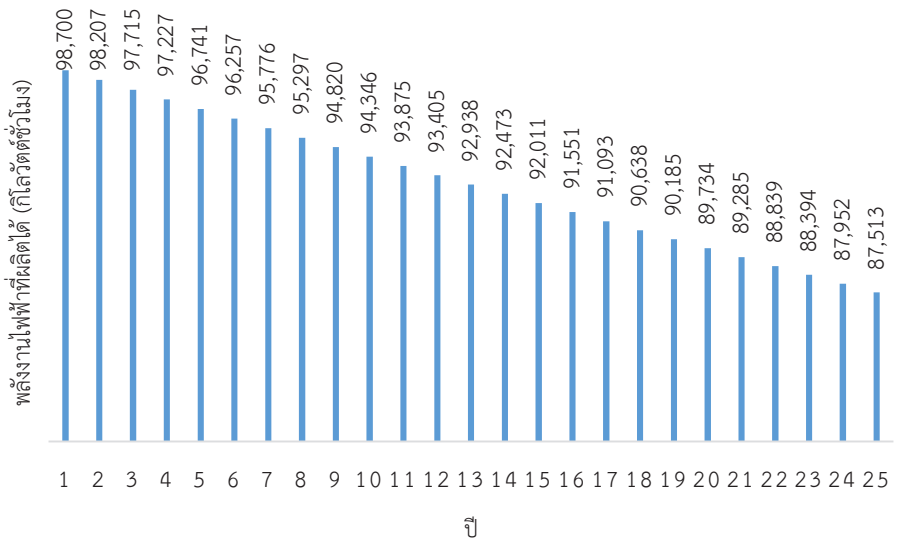
1.1 ผลจากการสำรวจลักษณะทางกายภาพและขนาดพื้นที่หลังคาที่เป็นดาดฟ้า พบว่าหลังคาอาคารไม่มีต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างบังเงาและมีพื้นที่ทั้งหมด 312 ตารางเมตร ดังภาพที่ 5

ภาพที่ 5 ลักษณะทางกายภาพและพื้นที่หลังคาที่เป็นดาดฟ้าของอาคารโรงพยาบาลสัตว์

1.2 ผลการจำลองติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ตามศักยภาพของพื้นที่ 312 ตารางเมตร โดยใช้โปรแกรม PV system Version 7.1 ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีกำลังการผลิตต่อแผงมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Monocrystalline กำลังผลิต 400 W รุ่น TSM-DEG15H-20-(II)-400 ที่มีใน Database ของโปรแกรม PV system Version 7.1 และเลือกใช้ Inverter รุ่น SUN2000-30KTL-A ขนาด 30 kWac ที่ผ่านมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 2565 (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2565) มาใช้ในการออกแบบติดตั้ง ผลการวิเคราะห์พบว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เท่ากับ 98.70 MWh/ปี หรือ 98,700 kWh/ปี ดังตารางที่ 1 เมื่อทำการพิจารณาการลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ 0.5% ต่อปี ทำให้ในปีที่สองระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เท่ากับ 98,207 kWh/ปี จนถึงในปีที่ 25 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เท่ากับ 87,513 kWh/ปี ทำให้ตลอดระยะเวลา 25 ปี ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด 2,324,972 kWh ดังภาพที่ 6

ตารางที่ 1 ผลการจำลองติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารโรงพยาบาลสัตว์ ด้วยโปรแกรม PV system

PV Array Characteristics			
PV module / Total PV Power		**Inverter**	
Model	TSM-DEG15H-20-(II)-400	Model	SUN2000-30KTL-A
Unit Nom. Power	400 Wp	Unit Nom. Power	30.0 kWac
Number of PV Modules	150 Units	Number of Inverter	2 Units
Nominal (STS)	60.0 kWp	Total Power	60.0 kWac
Modules	10 Strings x 15 In Series	Total Weight	112 kg
Module Area	308 m^2		
Total Weight	3,420 kg		
Results Summary			
Produced Energy	98.70 MWh/year	Perf. Ratio PR	86.60 %



ภาพที่ 6 ผลการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดระยะเวลา 25 ปี

2. ผลการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

เป็นการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่างๆ ของขั้นตอนการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า (Flat Roof Mounted) ของอาคารโรงพยาบาลสัตว์ แบบเชื่อมต่อกับสายส่ง (On Grid) ขนาดกำลังติดตั้ง 60 kWp ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ Life Cycle Assessment (LCA) แบบ Gate to Gate โดยการวิเคราะห์ปริมาณการได้มาของวัสดุ-อุปกรณ์ของสารขาเข้าและสารขาออกจากขั้นตอนการติดตั้ง การซ่อมบำรุง และการขนส่ง โดยกำหนดหน่วยทำงาน 1 kWh ดังตารางที่ 2 ส่วนขั้นตอนการใช้งานการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จึงไม่มีการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากนั้นตอนการใช้งาน และระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานเกินว่าระยะเวลาของโครงการ 25 ปี ดังนั้นจึงไม่ทำการวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดซาก

ตารางที่ 2 บัญชีรายการสารขาเข้าและสารขาออกของการติดตั้งโครงสร้างระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการผลิตไฟฟ้าสุทธิ 1 kWh

ที่	รายการ	ค่า LCI		แหล่งอ้างอิง
		ปริมาณ	หน่วย	
1	Solar Cell	1.47E-03	kg	Property TSM-DEG15H-20-(II)-400
2	Inverter	4.82E-05	kg	Property SUN2000-30KTL-A
3	Aluminium Alloy	3.30E-04	kg	Vasilis, F. (2011). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems (2011)
4	Stainless Steel	3.50E-05	kg	Vasilis, F. (2011). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems (2011)
5	Copper	1.31E-05	kg	Vasilis, F. (2011). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems (2011)
6	TPE Thermoplastic	7.86E-06	kg	Vasilis, F. (2011). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems (2011)
7	Concrete Slab	1.91E-02	kg	คู่มือการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

- ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากปริมาณวัสดุ-อุปกรณ์ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการวิเคราะห์หาค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากปริมาณอุปกรณ์ติดตั้งโครงสร้าง (Construction) และการซ่อมบำรุงรักษา (Operation and Maintenance) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์คูณกับค่า Emission Factor ของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3 ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากปริมาณวัสดุ-อุปกรณ์ของการติดตั้งโครงสร้าง (Construction) ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh

ที่	รายการ	ค่า LCI		ค่า EF ($kgCO_2eq$/หน่วย)	ผลคูณ ($kgCO_2eq$)	แหล่งที่มาของข้อมูล EF
		ปริมาณ	หน่วย			
1	Solar Cell	1.47E-03	kg	94.5	1.39E-01	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
2	Inverter	4.82E-05	kg	4.03	1.94E-04	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
3	Aluminium Alloy	3.30E-04	kg	5.14	1.70E-03	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
4	Stainless Steel	3.50E-05	kg	2.73	9.56E-05	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
5	Copper	1.31E-05	kg	2.13	2.79E-05	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
6	TPE Thermoplastic	7.86E-06	kg	7.56	5.95E-05	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007
7	Concrete Slab	1.91E-02	kg	2.34	3.68E-02	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
รวม					**1.86E-01**	

ตารางที่ 4 ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการซ่อมบำรุง (Operation and Maintenance) ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh

ที่	รายการ	ค่า LCI		ค่า EF ($kgCO_2eq$/หน่วย)	ผลคูณ ($kgCO_2eq$)	แหล่งที่มาของข้อมูล EF
		ปริมาณ	หน่วย			
1	Solar Cell	1.47E-04	kg	94.5	1.39E-02	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
2	Inverter	4.82E-06	kg	4.03	1.94E-05	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
3	Aluminium Alloy	3.30E-05	kg	5.14	1.70E-04	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ที่	รายการ	ค่า LCI		ค่า EF ($kgCO_2eq$/หน่วย)	ผลคูณ ($kgCO_2eq$)	แหล่งที่มาของข้อมูล EF
		ปริมาณ	หน่วย			
4	Stainless Steel	3.50E-06	kg	2.73	9.56E-06	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
5	Copper	1.31E-06	kg	2.13	2.79E-06	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
6	TPE Thermoplastic	7.86E-07	kg	7.56	5.95E-06	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007
รวม					**1.41E-02**	

- ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งวัสดุ-อุปกรณ์ติดตั้งโครงสร้าง (Construction) และการซ่อมบำรุงรักษา (Operation and Maintenance) โดยการนำปริมาณวัสดุ-อุปกรณ์คูณกับระยะทางและคูณกับค่า Emission Factor (EF) ของรถบรรทุก 10 ล้อ ขนาด 16 ตัน ดังตารางที่ 5-6 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้อุปกรณ์ Solar Cell และ Inverter ขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้าจากกรุงเทพมหานครหรือเขตปริมณฑล มายังมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เป็นระยะทาง 916 กิโลเมตร และส่วนที่เป็นวัสดุในการติดตั้งสามารถหาซื้อได้ตามร้านค้าภายในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ในระยะทาง 20 กิโลเมตร

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งวัสดุอุปกรณ์ของการติดตั้งโครงสร้าง (Construction) ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh

ที่	รายการ	ค่า LCI		ระยะทาง (km)	ค่า EF ($kgCO_2eq$/ตัน-กม.)	ผลคูณ ($kgCO_2eq$)	แหล่งที่มาของข้อมูล EF
		ปริมาณ	หน่วย				
1	Solar Cell	1.47E-06	ตัน	916	0.0451	6.08E-05	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
2	Inverter	4.82E-08	ตัน	916	0.0451	1.99E-06	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
3	Aluminium Alloy	3.30E-07	ตัน	20	0.0451	2.98E-07	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
4	Stainless Steel	3.50E-08	ตัน	20	0.0451	3.16E-08	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ที่	รายการ	ค่า LCI		ระยะทาง (km)	ค่า EF ($kgCO_2eq$/ตัน-กม.)	ผลคูณ ($kgCO_2eq$)	แหล่งที่มาของข้อมูล EF
		ปริมาณ	หน่วย				
5	Copper	1.31E-08	ตัน	20	0.0451	1.18E-08	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
6	TPE Thermoplastic	7.86E-09	ตัน	20	0.0451	7.10E-09	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007
รวม						**6.31E-05**	

ตารางที่ 6 ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งวัสดุอุปกรณ์ของการซ่อมบำรุง (Operation and Maintenance) ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh

ที่	รายการ	ค่า LCI		ระยะทาง (km)	ค่า EF ($kgCO_2eq$/ตัน-กม.)	ผลคูณ ($kgCO_2eq$)	แหล่งที่มาของข้อมูล EF
		ปริมาณ	หน่วย				
1	Solar Cell	1.47E-07	ตัน	916	0.0451	6.08E-06	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
2	Inverter	4.82E-09	ตัน	916	0.0451	1.99E-07	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
3	Aluminium Alloy	3.30E-08	ตัน	20	0.0451	2.98E-08	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
4	Stainless Steel	3.50E-09	ตัน	20	0.0451	3.16E-09	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
5	Copper	1.31E-09	ตัน	20	0.0451	1.18E-09	Ecoinvent 2.0, IPCC 2013
6	TPE Thermoplastic	7.86E-10	ตัน	20	0.0451	7.10E-10	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007
รวม						**6.31E-06**	

สรุปผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า (Flat Roof Mounted) ต่อขนาดกำลังการผลิต 1 kWh และการบำรุงรักษา โดยทำการวิเคราะห์จากปริมาณการใช้วัสดุ-อุปกรณ์และการขนส่งที่ใช้ในการก่อสร้าง (Construction) และการซ่อมบำรุงรักษา (Operation & Maintenance) ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สรุปผลการประเมิน GHG จากปริมาณของวัสดุอุปกรณ์ และจากการขนส่งต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh

กิจกรรม	การปล่อย GHG จากปริมาณวัสดุ-อุปกรณ์ $kgCO_2eq$	การปล่อย GHG จากการขนส่ง $kgCO_2eq$	ผลรวม $kgCO_2eq$
Construction	0.19	6.31E-05	0.19
Operation & Maintenance	0.01	6.31E-06	0.01
รวม			**0.20**

จากตารางที่ 7 สรุปผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมในการก่อสร้าง (Construction) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.19 $kgCO_2eq/kWh$ และจากกิจกรรมซ่อมบำรุงรักษา (Operation & Maintenance) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.01 $kgCO_2eq/kWh$ และมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมรวมทั้งหมด เท่ากับ 0.20 $kgCO_2eq/kWh$ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.22 $kgCO_2eq/kWh$ จากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ขนาด 0.5 MW (การุณย์, 2562) และมีปริมาณต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.5986 $KgCO_2e/kWh$ ของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (องค์การบริการก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน, 2564) ซึ่งหมายความว่าการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้าของอาคารโรงพยาบาลสัตว์ ขนาด 60 kWp มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย เมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าต่อ 1 kWh

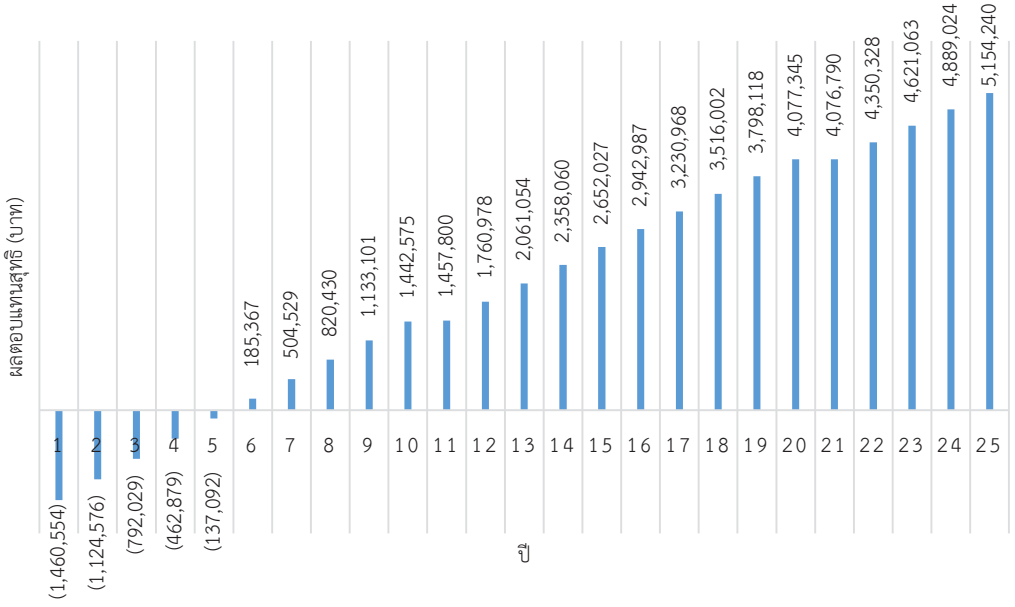
3. ผลการประเมินความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

เป็นการประเมินความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ในรูปของมูลค่าปัจจุบันสุทธิและระยะเวลาคืนทุนของโครงการตลอดระยะเวลา 25 ปี จากสมการที่ (3) และ (4) โดยใช้ข้อมูลจากการจำลองติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า ขนาดกำลังติดตั้ง 60 kWp จากการศึกษาค่าใช้จ่ายการติดตั้ง Solar Rooftop ของ ธนาพล ตันติสัตยกุล พ.ศ. 2562 พบว่ามีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 30-50 บาทต่อวัตต์ (ธนาพล, 2562) ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์ในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่ลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 30 บาทต่อวัตต์ มีค่าการเปลี่ยน Inverter ตามระยะเวลารับประกันทุก ๆ 10 ปี และค่าบำรุงรักษา 1% ของต้นทุนต่อปี ทำให้ตลอดระยะเวลา 25 ปี ทำให้มีต้นทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 2,403,750 บาท ส่วนการคิดอัตราค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทดแทนการใช้ไฟจากสายส่งจึงทำการคิดตามช่วงเวลาของการใช้ไฟแบบ TOU โดยวิเคราะห์อัตราค่าไฟฟ้าในช่วง On-Peak และ Off-Peak จากวันเวลาทำการและวันหยุดเสาร์-อาทิตย์ หรือวันหยุดนักขัตฤกษ์ของปี พ.ศ. 2561 เป็นปีฐาน และกำหนดให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดมหาวิทยาลัยเป็นผู้ลงทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงใช้อัตราดอกเบี้ยเงินฝากประเภทลูกค้ารายใหญ่ชั้นดีเฉลี่ย 0.5% (MLR) ข้อมูลจากธนาคารแห่งประเทศไทย ณ ประจำวันที่ 4 มิถุนายน

2564 และได้กำหนดข้อสมมติฐานในรายละเอียดการศึกษาความคุ้มทุนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ดังตารางที่ 8 จากผลการประเมินความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าเมื่อสิ้นสุดโครงการ 25 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 265,215.71 บาท และ มีระยะเวลาคืนทุน 5.43 ปี ดังภาพที่ 7

ตารางที่ 8 สมมติฐานในการวิเคราะห์ความคุ้มทุนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (ชัชชัย และคนอื่นๆ 2564)

ข้อมูล	สมมติฐาน
ต้นทุนทั้งระบบ	30 บาทต่อวัตต์รวมค่าติดตั้ง
ค่าบำรุงรักษา	1% ของต้นทุนต่อปี
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	
- อายุการใช้งาน	25 ปี
- การลดทอนประสิทธิภาพ	0.5% ต่อปี (เริ่มจากปีที่ 2)
อินเวอร์เตอร์	
- อายุการใช้งาน	10 ปี ตามระยะเวลาประกันอุปกรณ์
- ต้นทุน (กรณีเปลี่ยน Inverter ใหม่ในปีที่ 11 และ 21)	5.125 บาทต่อวัตต์รวมค่าติดตั้ง (จากใบเสนอราคา เดือน พ.ย. 2560)
อัตราค่าไฟฟ้าในระบบ TOU ประเภท 4.2.2 ขนาด 22-33 กิโลวัตต์	
- On-Peak + Ft	4.1839 บาทต่อหน่วย
- Off-Peak + Ft	2.6037 บาทต่อหน่วย
สัดส่วนจำนวนวัน - On-Peak : Off-Peak	65.5% : 34.5% (คำนวณสัดส่วนจากจำนวนวันในปี 2561)
อัตราส่วนลด หรืออัตราดอกเบี้ยต่อปี	0.5% (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2565)



ภาพที่ 7 ผลการประเมินจุดความคุ้มทุนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (flat roof mounted)

อภิปรายผล

จากการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความคุ้มทุนจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบ On-Gird บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้าของอาคารโรงพยาบาลสัตว์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย โดยการจำลองการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ตามศักยภาพพื้นที่หลังคาที่เป็นดาดฟ้า 312 ตารางเมตร ด้วยโปรแกรม PVsyst 7.1 พบว่าสามารถติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ขนาด 60 kWp ใช้พื้นที่ในการติดตั้ง 302 ตารางเมตร และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 98,700 kWh/ปี ในปีแรก เมื่อทำการพิจารณาการลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ 0.5% ต่อปี ทำให้ในปีที่สองระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เท่ากับ 98,207 kWh/ปี จนถึงในปีที่ 25 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ เท่ากับ 87,513 kWh/ปี และตลอดระยะเวลา 25 ปี ระบบเซลล์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด 2,324,972 kWh ส่วนผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ Life Cycle Assessment (LCA) โดยการวิเคราะห์ตามปริมาณการได้มาของวัสดุ-อุปกรณ์ของสารขาเข้าและสารขาออกจากขั้นตอนการติดตั้ง การซ่อมบำรุง และการขนส่ง ในรูปของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 kWh พบว่าจากผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุ-อุปกรณ์ในการก่อสร้าง (Construction) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.19 $kgCO_2eq/kWh$ และจากกิจกรรมซ่อมบำรุงรักษา (Operation & Maintenance) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.01 $kgCO_2eq/kWh$ และมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมรวมทั้งสิ้น เท่ากับ 0.20 $kgCO_2eq/kWh$ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ขนาด 0.5 MW มหาวิทยาลัยพะเยา ที่มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.22 kgCO2eq/kWh (การุณย์, 2562) และระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่

เป็นดาดฟ้าของอาคารโรงพยาบาลสัตว์ ขนาด 60 kWp มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของการผลิตไฟฟ้าต่อ 1 kWh ของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย เท่ากับ 0.5986 KgCO2e/kWh (องค์การบริการก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน, 2564) เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของโครงการทั้งหมด เท่ากับ 476,091.57 $kgCO_2eq$ จากการจำลองติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เป็นดาดฟ้า (Flat Roof Mounted) ขนาด 60 kWp ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนจากค่าวัสดุ-อุปกรณ์ ค่าติดตั้ง ค่าเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ และค่าบำรุงรักษาตลอดระยะเวลา 25 ปี รวมเป็นเงิน 2,403,750 บาท และมีผลตอบแทนจากการคิดอัตราค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทดแทนการใช้ไฟจากสายส่ง แบบ TOU โดยวิเคราะห์อัตราค่าไฟฟ้าในช่วง On-Peak และ Off-Peak จากวันเวลาทำการและวันหยุดเสาร์-อาทิตย์ หรือวันหยุดนักขัตฤกษ์ของปี พ.ศ. 2561 เป็นปีฐาน พบว่าตลอดระยะเวลา 25 ปี มีผลตอบแทนจากการลดการใช้ไฟฟ้าจากสายส่ง 8,459,949 บาท และมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ค่าเท่ากับ 265,215.71 บาท มีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) 5.43 ปี ในทำนองเดียวกันของการศึกษาการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (พรสวัสดิ์, 2559) ที่ได้สมมติฐานอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 8.20 % ต่อปี มีค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 57 บาทต่อวัตต์ มีระยะเวลาคืนทุน 11.76 ปี และมีค่า NPV ติดลบ จึงทำให้โครงการไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดสมมติฐานให้มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายลงทุนเองจากงบประมาณรายได้ของมหาวิทยาลัย จึงคิดค่าการเสียโอกาสจากการได้รับดอกเบี้ยเงินฝากที่อัตราดอกเบี้ย 0.5% ต่อปี และคิดอัตราคาค่าวัสดุ-อุปกรณ์ ค่าติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 30 บาทต่อวัตต์ ทำให้โครงการมีระยะเวลาคืนทุนเร็วขึ้น และผลการประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าโครงการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีความคุ้มค่าในการลงทุน ดังนั้นในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาสิ่งสำคัญอันดับแรกในการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ควรมีการพิจารณาต้นทุนในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท/วัตต์) และอัตราดอกเบี้ยจากแหล่งเงินทุนประกอบการพิจารณาการดำเนินโครงการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และผลจากการศึกษาของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางพิจารณาอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายเพิ่มเติม เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าจากสายส่ง หรือเป็นแนวทางสำหรับผู้ที่สนใจติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนอาจารย์และเจ้าหน้าที่โรงพยาบาลสัตว์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้การสนับสนุนและให้การช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2565). **รายงานประจำปี 2564.** [Online]. Available : https://www.egat.co.th/home/annual-report/ [2565, มิถุนายน 15].

กระทรวงพลังงาน. (2563). **แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580.** [Online]. Available : http://www.eppo.go.th/images/Infromation_service/public_relations/PDP2018/PDP2018Rev1.pdf [2565, มิถุนายน 15].

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2565). **ราชชื่อผลิตภัณฑ์อินเวอร์เตอร์ที่ผ่านหลักเกณฑ์การขึ้นทะเบียนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.** [Online]. Available : https://www.pea.co.th/Portals/0/PEAContent/eee/aee_div/reg_equip/PEA-InverterList-4-2565.pdf [2565, พฤษภาคม 2].

การุณย์ ชยัวณิชย์. (2562). **การประเมินการลดก๊าซเรือนกระจกด้วยการจัดการไฟฟ้าบนเครือข่ายสมาร์ตกริด.** วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพะเยา.

ฉัตร ผลนาค, จอมภพ แววศักดิ์, สมพล ชีวมงคลกานต์ และปราณี หนูทองแก้ว. (2560). การประเมินประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายขนาดกำลัง 3 กิโลวัตต. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ**, 20(ฉบับพิเศษ), 261-268.

ชัชชัย วรพัฒน์, สุรัตน์ เศษโพธิ์ และปรเมษฐ์ สิทธิสันติ์. (2564). ประเมินศักยภาพและความคุ้มทุนของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา กรณีศึกษา: อาคารสำนักงานคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : เทพสตรี**, 16(2). 117-126.

ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์ และโสภิตสุดา ทองโสภิต. (2558). การประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **วารสารวิจัยพลังงาน, 12**(2), 59-74.

ธนาคารแห่งประเทศไทย. (2565). อัตราดอกเบี้ย. [Online]. Available : https://app.bot.or.th/BTWS_STAT/statistics/BOTWEBSTAT.aspx?reportID=223&language=TH [2565, มิถุนายน 10].

ธนากร ปัญญาสิทธิ์ และอัครินทร์ อินทนิเวศน์. (2560). การจำลองสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กมากที่ติดตั้งใช้งานบนพื้นที่สูง อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน. ใน **การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 16). ระหว่างวันที่ 23-24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560**(หน้า 277-287). เชียงใหม่ : ศูนย์ฝึกอบรมธนาคารไทยพาณิชย์ เชียงใหม่.

ธนาพล ตันติสัตยกุล. (2562). การวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษศาสตร์ ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ระหว่างการเป็นเจ้าของกับการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าจากเอกชน กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 28**(8), 501-515.

ธัญญพัทธ์ ทิพย์ศุภวงศ์, วัชระ วงค์ปัญโญ, บุญวัฒน์ วิจารณ์พล, เกศนีย์ อิ่นอ้าย และวราคม วงศ์ชัย. (2565). การจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา แบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง. **วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น), 17**(1), 81-97.

พรสวัสดิ์ พิริยะศรัทธา. (2559). การใช้เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อการประหยัดพลังงาน. **วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น,** 15(1), 183-200.

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย. (2563). **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย งบประมาณปี 2560**. เชียงราย : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

องค์การบริการก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน. (2564). **Emission Factor**. [Online]. Available : http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_af09c20f4f.pdf [2565, มิถุนายน 15].

Satish Kumar Yadav and Usha Bajpai. (2019). Energy, economic and environmental performance of a solar rooftop photovoltaic system in India. [Online]. Available : https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786451.2019.1641499?journalCode=gsol20 [2565, มิถุนายน 15].

Vasilis Fthenakis, Hyung Chul Kim, Rolf Frischknecht, Marco Raugei, Parikhit Sinha & Matthias Stucki, (2011). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. [Online]. Available : http://www.clca.columbia.edu/Task12_LCI_LCA_10_21_Final_Report.pdf [2565, พฤษภาคม 20].