

## ประเมินศักยภาพและจุดคุ้มทุนของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

กรณีศึกษา: อาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย

Potential and Cost-Effectiveness Evaluation of Solar Rooftop System

Case Study: Chaloe-Phra-Kiat Education Building, Chiang Rai College

ศตวรรษ เมืองชิน, ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา

Satawat Muangchuen, Dumrongsak Wongta

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Rai College

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดกำลังติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมตามขนาดพื้นที่หลังคาของอาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย และวิเคราะห์ต้นทุนการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาแบบออนกริด เพื่อลดปริมาณนำเข้าไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ผลการศึกษาพบว่าเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 330 วัตต์ จำนวน 360 แผง กำลังการผลิต 118.8 กิโลวัตต์ ต้นทุนในการดำเนินงานติดตั้ง 2,800,000 บาท อัตราซื้อขายไฟฟ้า 2.20 บาทต่อหน่วย ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เฉลี่ยต่อปี 172,754 กิโลวัตต์ต่อปี รายได้สุทธิต่อปี 378,159 บาทต่อปี ระยะคืนทุน 7.6 ปี

**คำสำคัญ:** เซลล์แสงอาทิตย์ ออกแบบระบบโซลาร์เซลล์ วิเคราะห์ต้นทุน ระยะเวลาคืนทุน

### Abstract

The objective of this research is to study the optimal capacity for the installation of solar panels of the Chaloe-Phra-Kiat Education Building and to analyze the cost of installed grid connected rooftop solar cell to reduce the amount of electricity imported from the Provincial Electricity Authority (PEA). From the results, it was found that a solar panel capacity of 330 watts, 360 solar panels, each were installed power around 118.8 kW at a cost 2,800,000 baht. Based on a selling rate of 2.20 baht per unit, the average amount of electricity produced is 172,754 kW/year, which generated a net income of 378,159 baht/years. The payback period was estimated 7.6 years.

**Keywords:** Photovoltaic, Solar Cell System Design, Cost Analysis, Payback Period

---

\* Corresponding author : Satawat.Muangchuen@gmail.com

## 1. บทนำ

การผลิตพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยอาศัยแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงจากกลุ่มฟอสซิล ในปี 2565 มีการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติร้อยละ 54 ถ่านหินลิกไนต์ร้อยละ 17 นำเข้ร้อยละ 16 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 11 ไฟฟ้าพลังน้ำร้อยละ 2 และน้ำมันร้อยละ 0.3 (ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช และคณะ, 2565) การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน จึงได้มีการกำหนดเป้าหมายในแผนการพัฒนากำลังผลิตทดแทนและพลังงานทางเลือก (2558 - 2579) ให้มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 6,000 เมกะวัตต์ ภายในปี พ.ศ. 2579 (แผนพัฒนากำลังผลิตทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579, 2558) วิทยาลัยเชิงรายเป็นสถาบันการศึกษาระดับอุดมศึกษา มีอาคารที่ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 22 กิโลโวลต์ และคิดอัตราค่าไฟฟ้าที่แตกต่างกันตามช่วงเวลาของการใช้ไฟฟ้าแบบ Time of Use Rate (TOU) เป็นอาคารเรียนและอาคารสำนักงานที่ใช้ในการสนับสนุนการเรียน ส่งผลให้มีการดำเนินกิจกรรมอยู่ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เป็นการคิดค่าไฟฟ้าแบบ On Peak ทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 400,000 บาทต่อปี

กันต์ ปานประยูร (2560) ได้ศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาขนาด 8 กิโลวัตต์ ของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และความเป็นไปได้ในการขยายระบบในอนาคต พบว่าพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.46 kWh/day ระบบผลิตพลังงานได้เฉลี่ย 978.64 kWh/month ค่าพลังงานจำเพาะที่ระบบผลิตได้เท่ากับ 1,467.95 kWh/kW<sub>peak</sub> มีพื้นที่หลังคาสำหรับการขยายระบบเป็น 0.5 เมกะวัตต์ อายุโครงการ 25 ปี จะผลิตไฟฟ้าได้ 16,837,549 กิโลวัตต์-ชั่วโมง กำหนดเงื่อนไขให้เอกชนลงทุนให้ทั้งหมด 20.53 ล้านบาท สัดส่วนเงินกู้/ต่อเงินลงทุน 70:30 ดอกเบี้ยคงที่ร้อยละ 6.025 ต่อปี ชำระคืนภายใน 10 ปี อัตราส่วนลดร้อยละ 6 โดยค่าไฟเฉลี่ย เท่ากับ 4 บาทต่อหน่วย หากชำระค่าไฟฟ้าให้กับผู้ผลิตไฟฟ้าในอัตรา 3.5 3.0 และ 2.5 บาทต่อหน่วย โครงการจะมีความคุ้มค่าที่ระยะเวลาประมาณ 12 17 และ 24 ปี ตามลำดับ หากใช้งานระบบจนครบ 25 ปี ผลประหยัดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 35.49 31.2 5 และ 36.78 ล้านบาท ตามลำดับ และจะสามารถลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนได้ 9,531.73 ตัน

ชัชชัย วรพัฒน์ และคณะ (2564) ได้ศึกษาการหาขนาดกำลังติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมตามความต้องการการใช้ไฟฟ้าพื้นฐานของอาคารสำนักงานคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และหาจุดคุ้มทุนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับสายส่ง จากการออกแบบและจำลองการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าขนาดกำลังติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 9.60 กิโลวัตต์ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 7.22 กิโลวัตต์ โดยในปีแรกระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 12,222 หน่วย และตลอดระยะเวลา 25 ปี ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 287,890 หน่วย สามารถลดค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้าลงได้ 1,047,556 บาท มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 695,702 บาท และมีระยะเวลาคืนทุน 6.70 ปี

ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์ และ โสภิตสุดา ทองโสมกิต (2558) ได้ศึกษาแนวโน้มของการลดลงของต้นทุนระบบไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีการเริ่มนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ของการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคส่วนอาคารธุรกิจ และโรงงาน โดยสถาบันการศึกษาเป็น

กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสูง และมีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น แต่ยังไม่มีการนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้อย่างแพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ศักยภาพเชิงเทคนิค และเชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้คัดเลือกอาคาร 10 อาคาร จากทั้งหมด 183 อาคารในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากเกณฑ์การคัดกรองทั้งทางด้านกายภาพด้านภูมิศาสตร์ ความเหมาะสมของพื้นที่ติดตั้ง และการเข้าถึงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ พบว่าผลรวมของศักยภาพเชิงเทคนิค จำนวน 10 อาคาร อยู่ที่ 2,949.19 kWh/day และผลการศึกษาศักยภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ที่อัตราส่วนลดร้อยละ 7.08 พบว่ามีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 26,744,616.98 บาท ระยะเวลาการคืนทุน 7.41 ปี และผลตอบแทนภายในร้อยละ 15 และเมื่อเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้า และความต้องการการใช้ไฟฟ้าของทุกอาคารที่ศึกษา พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึงร้อยละ 10.97 ในปีแรก และมีแนวโน้มการใช้พลังงานลดลงเรื่อย ๆ ในต่อไป ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการลงทุนในระบบผลิตไฟฟ้าบนหลังคาของ 10 อาคารที่คัดเลือกในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความคุ้มค่าการลงทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ และผลตอบแทนภายในมีค่าเชิงบวก และระยะการคืนทุนสั้น ทำให้การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเป็นทางเลือกในการช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่น่าสนใจสำหรับมหาวิทยาลัยแห่งนี้

ศาสตรา ศิริแก้ว และคณะ (2562) ได้ศึกษาการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ภายใต้เงื่อนไขทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคาอาคาร - สำนักวิทยบริการ (อาคารเอ) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เขตพื้นที่ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และประมวลผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel โดยประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่โดยใช้แบบพิมพ์เขียวอาคารซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AutoCAD ประเมินศักยภาพรังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์จากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อประเมินค่ารังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคา และประเมินกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยจาก 4 สถานีตรวจวัดสภาพ และข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SW 285-300 MONO (5-busbar) และประเมินพลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการติดตั้ง โดยการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าพิจารณาภายใต้มาตรฐานที่กำหนดโดย IEA (IEA-PVPS T2-03:2002) และแสดงผลการประเมินโดยใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ผลการวิจัยพบว่า อาคารเอ มีพื้นที่หลังคาความ 2,744.00 ตารางเมตร สามารถจำแนกทิศทางของหลังคาโดยใช้มุมอะซิมุทพื้นดินได้ 6 ทิศทาง ได้แก่ 165 (NE1) 75 (SE2) 30 (SE1) -15 (SW1) -105 (NW1) และ -150 (NW2) สามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ได้รวม 972 แผง มีกำลังไฟฟ้าติดตั้ง 291.60 กิโลวัตต์ ผลการประเมินรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคา มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในทิศ SW1 SE1 NW1 SE2 NW2 และ NE1 มีค่า 5.84 5.61 5.30 5.19 4.72 และ 4.45 kWh/m<sup>2</sup>/day ตามลำดับส่งผลต่อพลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการติดตั้ง (Y) มีค่า 154.86 148.54 139.08 136.88 122.35 และ 114.97 kWh/kW<sub>install</sub> ตามลำดับ โดยศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงสุดในทิศ SE1 NW1 NW2 SW1 NE1 และ SE2 มีค่า 100.53 86.62 75.76 74.15 7 1.61 และ 65.54 MWh/year ตามลำดับคิดเป็นพลังงานไฟฟ้ารวม 474.20 MWh/year ดังนั้นการประเมิน

ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกตำแหน่ง  $Y_u$  ที่มีค่าสูงสุด

จากสถานการณ์ข้างต้นวิทยาลัยเชียงรายจึงมีนโยบายในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในวิทยาลัย คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาขนาดกำลังการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมตามขนาดพื้นที่หลังคาของอาคาร เพื่อลดปริมาณนำเข้าไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และหาจุดคุ้มทุนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) อาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงรายเป็นอาคารต้นแบบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารภายในวิทยาลัยเชียงรายต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาขนาดกำลังการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เหมาะสมตามการใช้ไฟฟ้าพื้นฐานของอาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย
2. เพื่อหาจุดคุ้มทุนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่เหมาะสมกับปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย

## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาความคุ้มค่าของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา โดยใช้ตัวชี้วัดของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) และระยะเวลาของการคืนทุน (Payback Period: PB) โดยกำหนดให้วิทยาลัยเป็นผู้ลงทุน และเป็นการจ้างเหมาในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ตามระเบียบการจ้างส่วนราชการ
2. แบ่งการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายระหว่างการดำเนินโครงการ ออกเป็น 2 กรณี คือ
  - กรณีที่ 1 มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์ตามระยะเวลารับประกัน 10 ปี สำหรับวิเคราะห์หาความคุ้มค่า โดยคิดตามอัตราค่าใช้จ่ายต่อกำลังติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บาทต่อวัตต์
  - กรณีที่ 2 ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งในการบำรุงรักษาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ดำเนินการโดยกลุ่มงานซ่อมบำรุงที่มีเจ้าหน้าที่ที่เชี่ยวชาญของวิทยาลัยคอยดูแลอย่างใกล้ชิด ดังนั้นจึงกำหนดสมมติฐานให้ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

## แนวคิดการออกแบบ

การออกแบบระบบ และศึกษาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา ศึกษาว่า จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย จังหวัดเชียงราย และสามารถเชื่อมต่อเป็นแบบระบบออนกริด เพื่อลดปริมาณนำเข้าไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา

### พื้นฐานของอาคารที่ศึกษาติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์

การออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา มีลักษณะอาคารแสดงดังภาพที่ 2 โดยตั้งอยู่ที่ 199 หมู่ 6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย เป็นอาคารสูง 7 ชั้น พื้นที่หลังคา 1,726 ตารางเมตร กว้าง 27 เมตร ยาว 63 เมตร ความสูงของอาคาร 35 เมตร ละติจูด และลองจิจูดของอาคาร คือ 19.863 และ 99.784 ตามลำดับ อาคารหันหน้าไปทางทิศเหนือ ตั้งแต่เวลา 07.00 - 12.00 น. แสงอาทิตย์จะส่องมายังหลังคาทางซีกใต้ ซึ่งจะได้รับแสงเป็นอย่างดี พลังงานแสงอาทิตย์จะมีความเข้มข้นสูงสุดในช่วงเที่ยงวัน ขณะที่ความต้องการใช้ไฟสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วงบ่าย ซึ่งเป็น 2-3 ชั่วโมงสุดท้ายที่ยังมีแสงแดด บริเวณโดยรอบไม่มีต้นไม้ใหญ่หรือเงาต่าง ๆ มาบดบังแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2 อาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย ที่ศึกษาติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์

### การประเมินกำลังการติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

1. ศึกษาลักษณะของอาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย ประเมินโครงสร้างหลังคา ทิศทางของแสงอาทิตย์ และค่าความเข้มแสง
2. ศึกษาพื้นที่จริงของหลังคาอาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย พบว่าอาคารไม่มีสิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้บังแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### การออกแบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ศึกษาพื้นที่หลังคา และทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Sketch Up Extensions Skelion ติดตั้งบนหลังคาที่เป็นแบบมุมเอียง 15 องศา พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อปี จากสมการที่ (1)

$$E_s = P_p \times \eta_{sys} \times hr \times 365 \quad (1)$$

|     |              |                                                           |
|-----|--------------|-----------------------------------------------------------|
| โดย | $E_s$        | คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/ปี) |
|     | $P_p$        | คือ กำลังติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (กิโลวัตต์)               |
|     | $\eta_{sys}$ | คือ ประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ร้อยละ)            |
|     | $hr$         | คือ ชั่วโมงการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ชั่วโมง/วัน)   |

### การประเมินความคุ้มค่าจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

การวิเคราะห์หาความคุ้มค่าจากผลตอบแทนเพื่อช่วยในการตัดสินใจที่จะลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา โดยจะพิจารณาจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และระยะเวลาคืนทุน ซึ่งได้กำหนดข้อมูลการศึกษาความคุ้มค่าจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ดังตารางที่ 1 มาใช้ในการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ เป็นการคำนวณหาความแตกต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนและมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายของโครงการจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารต้นแบบเพื่อให้เห็นว่าโครงการนั้นให้ผลตอบแทนคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ ถ้า NPV มีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าเป็นการลงทุนที่คุ้มค่า แต่ถ้า NPV มีค่าน้อยกว่า 0 หรือมีค่าติดลบแสดงว่าเป็นการลงทุนที่ไม่คุ้มค่า จากสมการที่ (2) (ธนาพล ตันติสัตยกุล และคณะ, 2560)

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

|        |       |                                                                         |
|--------|-------|-------------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $NPV$ | คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)                                           |
|        | $B_n$ | คือ ผลตอบแทนในปีที่ n เป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ x ราคาต่อหน่วยไฟฟ้า |
|        | $C_n$ | คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ n เป็นค่าเปลี่ยนอุปกรณ์ หรือค่าบำรุงรักษา (บาท)   |
|        | $i$   | คือ อัตราดอกเบี้ยคิดลด (ร้อยละ)                                         |

- $n$  คือ ระยะเวลาของโครงการปีที่ 0, 1, 2, ...,  $n$  (ปี)  
 $N$  คือ อายุของโครงการ (ปี)  
 $TIC$  คือ เงินลงทุนทั้งหมดตอนเริ่มต้นโครงการ (Total Investment Cost) (บาท)

ระยะเวลาคืนทุน หมายถึงระยะเวลาที่กระแสเงินสดที่ได้รับเท่ากับเงินที่ลงทุนไปเป็น เครื่องมือที่ใช้บอกสภาพความเสี่ยงของโครงการได้ โครงการที่มีระยะคืนทุนที่สั้นจะมีสภาพคล่องสูงและมีค่าความเสี่ยงต่ำ โดยสามารถคำนวณหาค่า PB จากสมการที่ (3)

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

- โดยที่  $PB$  คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี)  
 $Y_n$  คือ จำนวนปีก่อนคืนทุน (ปี)  
 $CF_c$  คือ กระแสเงินสดที่เหลือ (บาท)  
 $CF_y$  คือ กระแสเงินสดทั้งปี จากค่าพลังงานไฟฟ้าของปีที่มีการคืนทุน (บาท/ปี)

#### ตารางที่ 1 ข้อมูลการศึกษาความคุ้มค่าจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

| รายการ                                  | ข้อมูล                                |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| ต้นทุนทั้งระบบ                          | 2,800,000 บาท                         |
| ค่าบำรุงรักษา                           | ร้อยละ 0.5 ของต้นทุนต่อปี             |
| ประสิทธิภาพของระบบ                      | ร้อยละ 80                             |
| Peak sun hour (ชั่วโมงการทำงาน)         | .498 ชั่วโมง/วัน                      |
| แผงเซลล์แสงอาทิตย์                      |                                       |
| อายุการใช้งาน -                         | ปี 25                                 |
| การลดทอนประสิทธิภาพ -                   | ร้อยละ 0.5ต่อปี เริ่มจากปีที่[9-8] (2 |
| อินเวอร์เตอร์                           |                                       |
| อายุการใช้งาน -                         | 10ปี ตามระยะเวลาประกันอุปกรณ์         |
| -ต้นทุน) กรณีเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ ใหม่( | 5.125บาทต่อวัตต์ รวมค่าติดตั้ง        |

#### การประเมินประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

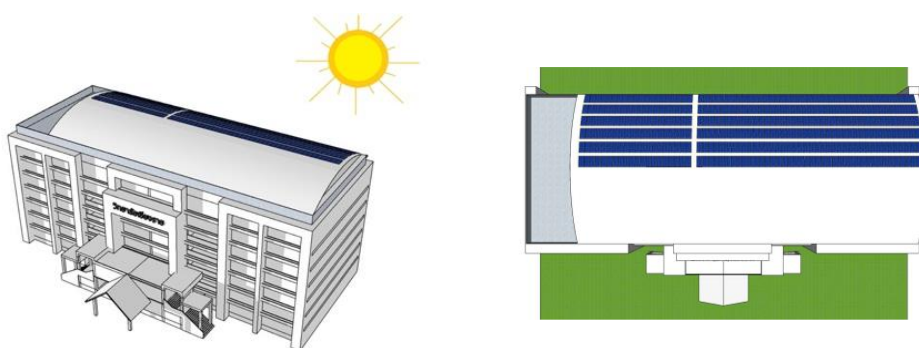
ในการศึกษานี้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Polycrystalline Silicon ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 330 วัตต์ต่อแผ่น เนื่องจากมีความเหมาะสมในการติดตั้งบนหลังคาอาคาร มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้ง และราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (Thin film) ภายใต้กำลังวัตต์ที่

เท่ากัน และจำนวนวัตต์ที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีผลต่อศักยภาพกล่าวคือ หากจำนวนวัตต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ศักยภาพเพิ่มขึ้น ยิ่งวัตต์สูงศักยภาพที่ได้จะสูงตาม ซึ่งค่าประสิทธิภาพ STC มีค่าร้อยละ 15.9 – 16.1 อุณหภูมิควบคุมที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อใช้งานจริงไม่สามารถควบคุมที่อุณหภูมิดังกล่าวได้ตลอดทั้งวัน

#### 4. ผลการวิจัย

##### ผลการออกแบบและจำลองการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

ทางด้านทิศใต้เป็นด้านที่รับแสงอาทิตย์ได้ตลอดวันจึงได้ออกแบบให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบริเวณนี้ และจำลองในโปรแกรม Sketch Up โดยจำลองจากแบบและขนาดของอาคารจริง เพื่อสามารถหาขนาดของพื้นที่บนหลังคาลักษณะภาพที่ 3



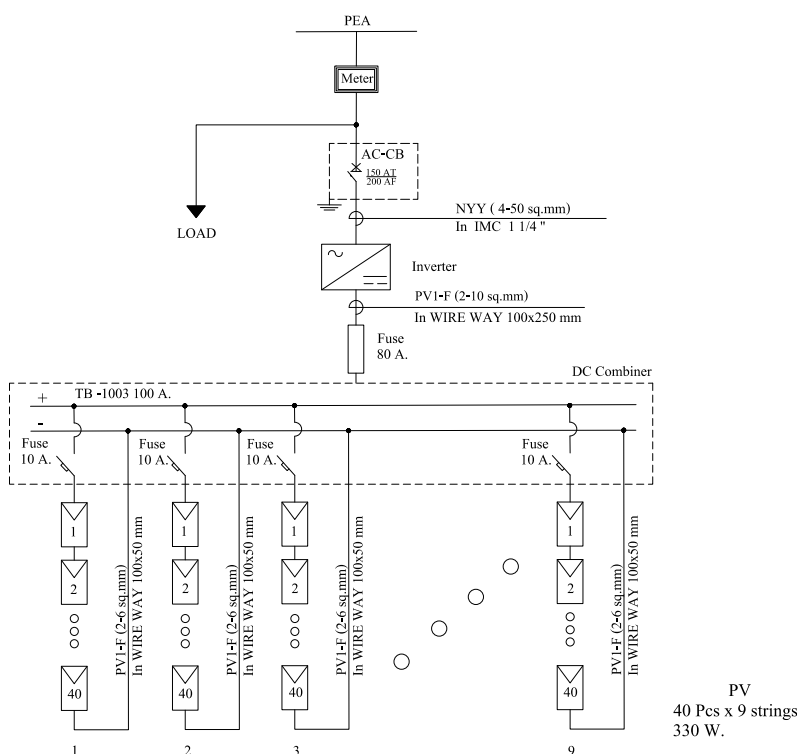
ภาพที่ 3 รูปแบบสถานที่ และตำแหน่งการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การลงทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรพิจารณาค่าใช้จ่ายเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีที่สุดของเงินที่ใช้ไป ค่าใช้จ่ายแตกต่างกันไปตามประสิทธิภาพของแผง ในการออกแบบจึงใช้เซลล์ซิลิคอนผลึกรวมโพลีคริสตัลไลน์ มีราคาถูกและให้ประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับพื้นที่ในการติดตั้ง ในการติดตั้งใช้พื้นที่ 7.5 – 10 ตารางเมตรต่อกิโลวัตต์ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการผลิตและอุณหภูมิ ประสิทธิภาพของแผงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในการติดตั้งบนหลังคาจะร้อนอย่างมาก มีอุณหภูมิภายในเซลล์ถึง 50-70 °C ในที่มีอุณหภูมิสูงควรเลือกแผงที่มีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาจากปัจจัยข้างต้นจึงใช้แผงพิกัดกำลัง 330 วัตต์ แรงดัน 37.3 โวลต์

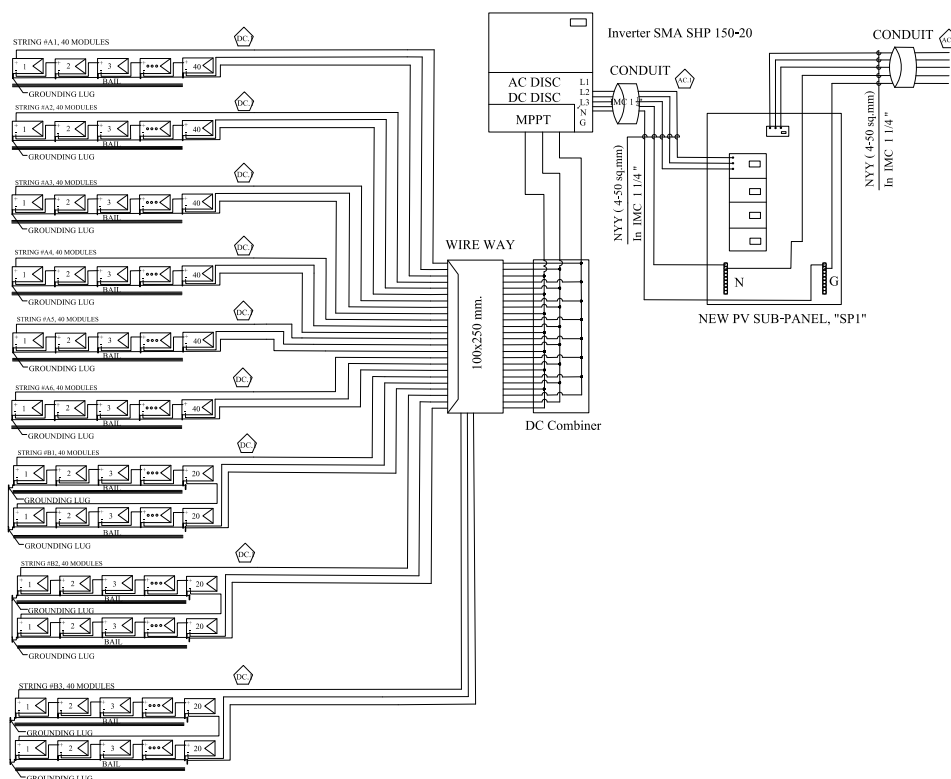
จำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Sketch Up Extensions Skelion หลังคามีมุมเอียง 15 องศา จึงกำหนดให้ติดตั้งแผงวางตามแนวหลังคา เลือกอินเวอร์เตอร์ชนิด MPPT จากการจำลองพบว่าใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 330 วัตต์ จำนวน 360 แผง แบ่งเป็น 9 สตริง สตริงละ 40 แผง กำลังวัตต์ทั้งหมด 118.8 กิโลวัตต์ ดังตารางที่ 2 แรงดันและกระแสของระบบเท่ากับ 1,500 โวลต์ 79.7 แอมป์ ตามลำดับ จึงเลือกอินเวอร์เตอร์พิกัดแรงดัน 1,500 โวลต์ กระแส 180 แอมป์ กำลังไฟฟ้า 225 กิโลวัตต์ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน พิกัด 150 AT/200 AF ดังภาพที่ 4 Single Line Diagram ของระบบที่ได้ออกแบบ

ตารางที่ 2 ข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการคำนวณโดยโปรแกรม Sketch Up Extensions Skelion

| Group          | Model        | N°P.       | P. power<br>(Wp) | Power<br>(kWp) | Azimuth  | Tilt      |
|----------------|--------------|------------|------------------|----------------|----------|-----------|
| 1              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 2.90      |
| 2              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 9.00      |
| 3              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 13.90     |
| 4              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 18.80     |
| 5              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 23.50     |
| 6              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 30        |
| 7              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 2.90      |
| 8              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 9.00      |
| 9              | Solar:TPSP6U | 40         | 330.00           | 13.20          | 0.00     | 13.90     |
| <b>Results</b> |              | <b>360</b> | <b>330</b>       | <b>118.8</b>   | <b>0</b> | <b>15</b> |

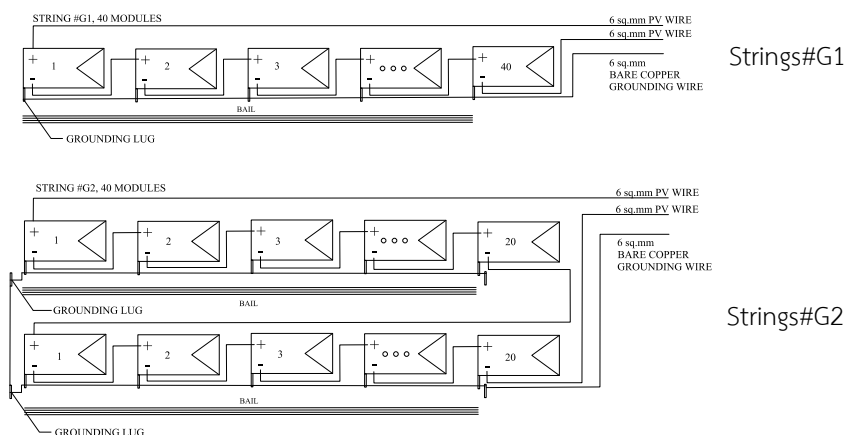


ภาพที่ 4 Single Line Diagram Solar Roof Top



ภาพที่ 5 Power One-Line Diagram Strings to Inverter - Sub-Panel

จากภาพที่ 5 Power One-Line Diagram แสดงการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม จำนวน 40 แผง ใช้สายไฟ PV1-F ขนาด 6 mm<sup>2</sup> ติดตั้งในรางเดินสายแบบไวร์เวย์ไปยัง DC Combiner หลังจากนั้น เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ และเชื่อมต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ไปยังแผงย่อยผ่านอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินขนาด 150 AT/250 AF เพื่อใช้งานในระบบไฟฟ้า

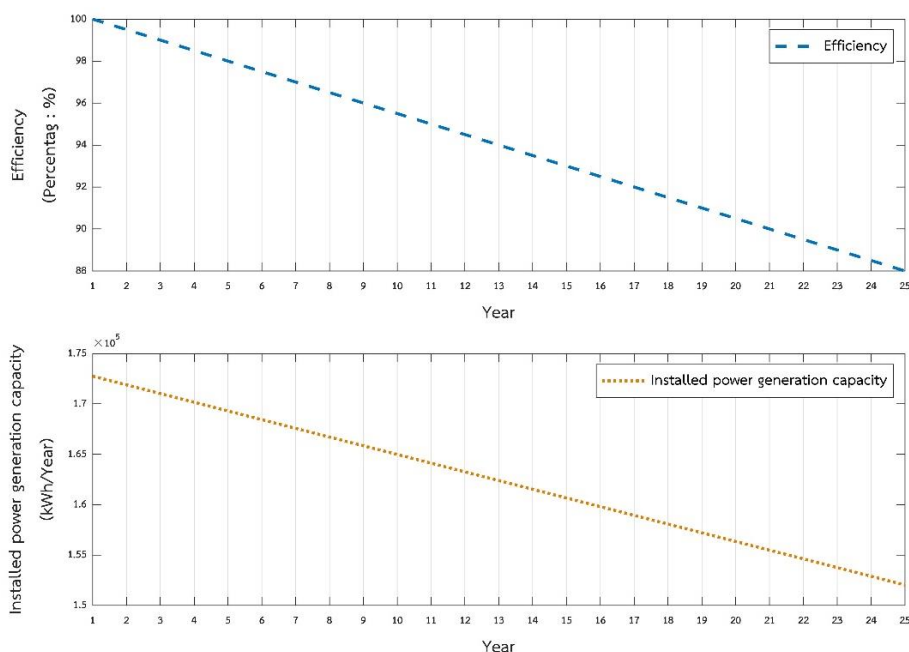


ภาพที่ 6 Power One line Diagram PV to Strings

ภาพที่ 6 แสดง Diagram PV to Strings แบ่งสตริงเป็น 2 รูปแบบ คือ Strings#G1 และ Strings#G2 โดย Strings#G1 มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 40 Modules ต่อเป็นแถวเดียวอนุกรมกัน ในระบบจะติดตั้งรูปแบบนี้จำนวน 6 ชุด และ Strings#G2 มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 40 Modules ต่อแถวละ 20 แผง จำนวน 2 แถว อนุกรมกันเป็น 1 ชุดติดตั้งรูปแบบนี้ 3 ชุด ซึ่งแต่ละรูปแบบมีผลรวมของ  $V_{oc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{sc}$ ,  $I_{mpp}$  ที่เหมือนกันคือ  $V_{oc}=45.9$  โวลต์  $V_{mp}=37.3$  โวลต์  $I_{sc}=9.21$  แอมป์ และ  $I_{mpp}=8.85$  แอมป์

### ผลการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากการจำลองการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Sketch Up Extensions Skelion สามารถวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้กำลังติดตั้งรวม 118.8 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพที่ติดตั้งร้อยละ 80 มีค่า PSH เฉลี่ย 4.98 ชั่วโมง (สุรียนต์ ชมดี, 2558) เซลล์แสงอาทิตย์มีการลดทอนประสิทธิภาพลงร้อยละ 0.5 (เริ่มจากปีที่ 2) ทำให้ในปีแรก ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 172,754 หน่วยต่อปี และในปีถัดไปค่าประสิทธิภาพจะลดลง ทำให้ในปีที่ 2 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 171,890 หน่วยต่อปี และในปีที่ 25 สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 151,160 หน่วยต่อปี ตลอดระยะเวลา 25 ปี สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 4,210,884 หน่วย ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลการวิเคราะห์การลดทอนของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ร้อยละ 0.5 และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีตลอดระยะเวลา 25 ปี

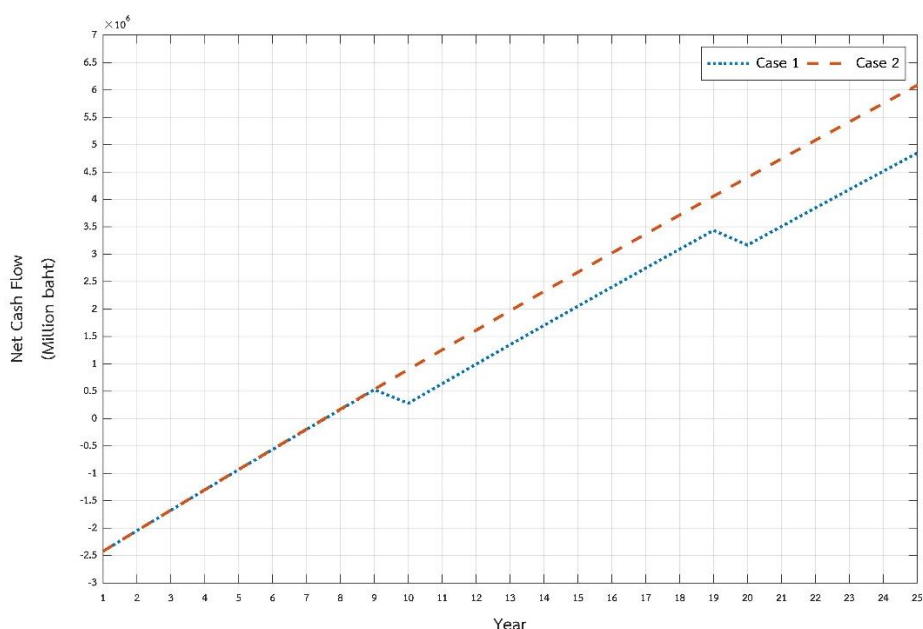
### ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

การวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้โดยนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากภาพที่ 7 มาคำนวณหาผลตอบแทนค่าไฟฟ้ากรณีลงทุนติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ผลตอบแทนการลงทุนติดตั้งมีอัตราการรับซื้อที่ 2.20 บาทต่อหน่วย มีกำลังการผลิตประมาณ 118.8 กิโลวัตต์ โดยคิดค่าติดตั้งระบบเท่ากับ 23.56 บาทต่อวัตต์ ทำให้มีต้นทุนเริ่มต้นอยู่ที่ 2,800,000 บาท และประสิทธิภาพของระบบร้อยละ 80 ทำให้ในปีแรกมีกระแสเงินสดรับ 378,159 บาท และในปีถัดไปค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลง ทำให้ในปีที่ 2 มีกระแสเงินสดรับ 376,259 บาท และในปีที่ 25 มีกระแสเงินสดรับ 376,259 บาท ตลอดระยะเวลา 25 ปี ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถขายไฟได้ 8,883,885 บาท

จากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาสามารถคิดรายรับจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และวิทยาลัยเซียงรายเป็นผู้ลงทุนในการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยศึกษาถึงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ สมการที่ (2) และระยะเวลาคืนทุน สมการที่ (3) โดยประเมินกรณีศึกษาที่มีความเป็นไปได้ 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาร้อยละ 0.5 ต่อกำลังติดตั้ง และค่าเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ 5.125 บาทต่อวัตต์ รวมค่าติดตั้ง โดยทำการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ตามระยะเวลารับประกันทุก 10 ปี

กรณีที่ 2 ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 8 ผลการประเมินจุดความคุ้มค่าจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

กรณีที่ 1 มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และเปลี่ยนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ (Case 1)

กรณีที่ 2 ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และเปลี่ยนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ (Case 2)

ผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่ 1 มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาร้อยละ 0.5 ต่อกำลังติดตั้ง และค่าเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ 5.125 บาทต่อวัตต์ รวมค่าติดตั้งโดยทำการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ตามระยะเวลาประกันทุก 10 ปี พบว่าเมื่อสิ้นสุดโครงการ 25 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 1,623,726 บาท และมีระยะเวลาคืนทุน 7.7 ปี และกรณีที่ 2 ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ พบว่าเมื่อสิ้นสุดโครงการ 25 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 2,274,679 บาท และมีระยะเวลาคืนทุน 7.6 ปี ดังภาพที่ 8

### ผลการประเมินความคุ้มค่า

การศึกษาด้านทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา เพื่อทำการขายกระแสไฟฟ้า ในราคา 2.20 บาทต่อหน่วย ติดตั้งบนหลังคาที่เป็นแบบมุมเอียง 15 องศา ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ A-Solar รุ่น TPSP6U กำลังไฟฟ้า 330 วัตต์ กระแส 8.85 แอมป์ แรงดัน 37.7 โวลต์ จำนวน 360 แผง ใช้อินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ SMA รุ่น SHP 150-20 แรงดัน 1,500 โวลต์ กระแส 180 แอมป์ กำลังไฟฟ้า 225 กิโลวัตต์ จำนวน 1 เครื่อง มีค่า PSH เฉลี่ยเท่ากับ 4.98 ชั่วโมง พบว่ากำลังติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 118.8 กิโลวัตต์ ในปีแรกระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 172,754 หน่วยต่อปี ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดทอน 0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ทำให้ในปีที่ 25 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 151,160 หน่วยต่อปี และตลอดระยะเวลาอายุของโครงการที่ 25 ปี ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 4,210,884 หน่วย ทำให้กระแสเงินสดรับตลอด 25 ปี มีมูลค่า 8,883,885 บาท

### 5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ได้ทำการแบ่งการประเมินออกเป็น 2 กรณี ในกรณีที่ 1 มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 1,623,726 บาท และมีระยะเวลาคืนทุน 7.7 ปี ส่วนกรณีที่ 2 ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 2,274,679 บาท และมีระยะเวลาคืนทุน 7.6 ปี เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อปี พบว่าทั้งสองกรณีมีระยะเวลาคืนทุนแตกต่างกันไม่มาก เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ พบว่าทั้งสองกรณีที่ 2 มีความคุ้มค่ามากกว่ากรณีที่ 1 อันเนื่องจากกรณีที่ 1 มีการเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ ถึง 2 ครั้ง ส่งผลให้ในกรณีที่ 2 มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่ากรณีแรก ประมาณ 650,954 บาท

### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนจากวิทยาลัยเชียงราย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช, วิเชียร ตันติวิศาล, บุผา คุณาโท, กรกช ภูไพบูลย์, เพทาย ภักดีโชติ, ธัญญรัตน์ ปัทมพงศา, ชีราภรณ์ จตุรวิธวงศ์, ณัฐพัชร บุตรเต, ธเนศร์ ศรีมงคล, ศุทธิณี จริ่งจิตร, ตันติมา จงแสงสกุล, ศรีนธร หอมสุวรรณ, พิมพ์วัลย์ สุวรรณศิริ, กัลยาณี ประเสริฐศิริสร, นฤมล อินทร์เกษ. รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2565. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน.
- แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579. (2558). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 7-15.
- กันต์ ปานประยูร. (2560). ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา ขนาด 8 กิโลวัตต์และความเป็นไปได้ของการขยายระบบ, *วารสารการพัฒนางานประจำสู่งานวิจัย*, 4(1), 76-86. <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/jpr2r/article/view/95533>
- ซัชชัย วรพัฒน์ และคณะ. (2564). ประเมินศักยภาพและความคุ้มค่าของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา กรณีศึกษา: อาคารสำนักงานคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, *เทคโนโลยี่ I-TECH*, 16(2), 117-126. <https://itechjournal.tru.ac.th/index.php/tru-i-tech/article/view/145>
- ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์ และโสภิตสุดา ทองโสภิต. (2558). การประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 12(2), 59-74. [http://www.eri.chula.ac.th/eri-main/wp-content/uploads/2016/01/2015\\_An-Assessment-of-the-Technical-and-Economic-Potential-of-Rooftop-Solar-System-on-Chulalongkorn-University-Buildings.pdf](http://www.eri.chula.ac.th/eri-main/wp-content/uploads/2016/01/2015_An-Assessment-of-the-Technical-and-Economic-Potential-of-Rooftop-Solar-System-on-Chulalongkorn-University-Buildings.pdf)
- ศาดตรา ศิริแก้ว, วุฒิสาสตร์ โชคแก้ว, อนุสรณ์ แสงประจักษ์ และชโลธร สีหาทิพย์. (2562). การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์: กรณีศึกษา อาคารสำนักวิทยบริการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 11(21), 179-192. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/swujournal/article/view/200461>
- ธนาพล ตันติสัตยกุล, พีรพล รัศมีธรรมโชติ และเมทาวร อยู่สกุล. (2560). การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงานสิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 25(6), 1083-1099. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/86502>
- สุริยนต์ ขมดี. (2558). การประเมินการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาบ้านอยู่อาศัยในภาคเหนือของประเทศไทย [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.