

SAC-01-007

การจัดการพลังงานในอาคารสำนักงาน เพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

Energy Management in Office Buildings to Achieve Carbon Neutrality In Bang Rak Phatthana Municipality

เอกนัต กองรัมย์^{1*} และอาทิตย์ โสตรโยม²

Eakkanut Kongrum^{1*} and Athit Sode-Yome²

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยสยาม^{1,2}

38 ถ. เพชรเกษม แขวงบางหว้า เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160

e-mail: noomgearmour@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ (1) เพื่อจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับอาคารสำนักงาน และโดมอเนกประสงค์ และวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (2) เพื่อวิเคราะห์ต้นทุน และผลตอบแทนทางการเงินของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา จังหวัดนนทบุรี โดยใช้โปรแกรมพีวีซิสต์ รุ่น 7.3.1 ในการจำลองระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า และระบบแบบแยกเดี่ยว การศึกษาแบ่งเป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารสำนักงาน ใช้แผงโซลาร์เซลล์ 234 แผง กำลังรวม 143 กิโลวัตต์พีค ระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ ใช้แผงโซลาร์เซลล์ 450 แผง กำลังรวม 275 กิโลวัตต์พีค และระบบแบบแยกเดี่ยวสำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ ใช้แผงโซลาร์เซลล์ 540 แผง กำลังรวม 329 กิโลวัตต์พีค ผลการวิจัยพบว่า ระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารสำนักงานผลิตพลังงานได้ 206,209 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี อัตราส่วนประสิทธิภาพร้อยละ 84.19 อาคารโดมอเนกประสงค์แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผลิตพลังงานได้ 383,381 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี อัตราส่วนประสิทธิภาพร้อยละ 81.39 และระบบแบบแยกเดี่ยวผลิตพลังงานได้ 457,593 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี อัตราส่วนประสิทธิภาพร้อยละ 80.95 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แสดงว่า ระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์มีความคุ้มค่าสูงสุด โดยมีอัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 10.99 และระยะเวลาคืนทุน 7 ปี 3 เดือน ด้านสิ่งแวดล้อม ระบบแบบแยกเดี่ยวมีศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกสูงสุด 273.91 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี ผลการศึกษาส่งเสริมให้เห็นว่าระบบแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในแง่ของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และทุกระบบมีส่วนสำคัญในการบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์ ความเป็นกลางทางคาร์บอน การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

Abstract

This research aimed to (1) simulate solar photovoltaic electricity generation systems for office buildings and multipurpose dome buildings and analyze carbon dioxide emissions reduction, and (2) evaluate the costs and financial returns of installing solar PV systems in Bang Rak Phatthana Municipality, Nonthaburi Province. The study utilized PVsyst software version 7.3.1 to simulate both grid-connected and off-grid solar photovoltaic systems. The study examined three distinct systems: a grid-connected system for the office building utilizing 234 solar panels with a total capacity of 143 kWp, a grid-connected system for the multipurpose dome building employing 450 solar panels with a combined capacity of 275 kWp, and an off-grid system for the multipurpose dome building using 540 solar panels with a total capacity of 329 kWp. The research findings demonstrated that the grid-connected system for the office building achieved an annual energy production of 206,209 kWh with a performance ratio of 84.19%. The grid-connected system for the multipurpose dome building generated 383,381 kWh annually with a performance ratio of 81.39%. The off-grid system produced 457,593 kWh per year with a performance ratio of 80.95%. Economic analysis revealed that the grid-connected system for the multipurpose dome building exhibited the highest

economic viability with an internal rate of return of 10.99% and a payback period of 7 years and 3 months. From an environmental perspective, the off-grid system demonstrated the greatest potential for greenhouse gas emission reduction, achieving 273.91 tCO₂e/year. The study concludes that the grid-connected system for the multipurpose dome building represents the optimal solution in terms of economic feasibility, while all systems contribute significantly to achieving carbon neutrality objectives. These findings provide valuable insights for sustainable energy development strategies in municipal government buildings and demonstrate the substantial potential of solar photovoltaic technology in supporting carbon neutrality goals.

Keywords: Solar photovoltaic energy, Carbon neutrality, Economic feasibility analysis, Greenhouse gas emission reduction, Bang Rak Phatthana Municipality

บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ต้องการมากขึ้นทั่วโลก เนื่องจากความสามารถในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเป็นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติ นอกจากนั้นพลังงานแสงอาทิตย์ยังช่วยในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมมูลค่าการพัฒนาที่ยั่งยืนอีกด้วย ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นไม่เพียงแต่ในการนำไปใช้ในงานที่มีขอบเขตขนาดใหญ่ เช่น ภาคอุตสาหกรรม ภาคธุรกิจ ภาคครัวเรือน และเอกชน แต่ยังสามารถนำไปใช้กับงานที่มีขอบเขตขนาดเล็ก เช่น ภาคครัวเรือน ได้อีกด้วย (ณัฐหทัย จุมรี และคณะ, 2567) โดยแนวทางการพัฒนาองค์กรให้ยั่งยืนในปัจจุบันวางอยู่บนพื้นฐานการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals : SDGs) มีทั้งหมด 17 เป้าหมาย (ชีสา กันยาวิริยะ และสิรินทร์ กันยาวิริยะ, 2567) ความสำคัญของพลังงานไฟฟ้ามีผล และเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาพื้นฐานต่าง ๆ ของประเทศ ทั้งทางด้านสังคม และเศรษฐกิจเป็นพลังงานที่ช่วยสนับสนุนให้มีการพัฒนาการเศรษฐกิจในทุกภาคส่วน

วิรัตน์ พิชิตกฤษกร และกิริติ ชยะกุลศิริ (2561) ได้ศึกษาการออกแบบ และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารกองบัญชาการกรมยุทธโยธาทหารบก โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยประมวลผลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาอาคารจากพิกัดของสถานที่ติดตั้งจริงและข้อมูลของสภาพภูมิอากาศเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามนโยบายของกองทัพบก ซึ่งต้องการลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในหน่วยทหารลง 10% รวมทั้งศึกษาระยะเวลาคืนทุน และอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยผลจากการจำลองการติดตั้งพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคาร ด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือประมาณ 5% โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการวิเคราะห์เท่ากับ 34,809 หน่วยต่อเดือน ซึ่งถ้าคิดเป็นมูลค่าของเงินที่ประหยัดได้ในแต่ละปีจะลดลงได้ประมาณ 1,670,832 บาทต่อปี ทำให้ระบบดังกล่าวจะมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 7 ปี สามารถลดพลังงานไฟฟ้าจากเดิมได้ถึง 18% ทั้งยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศได้ 225.56 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี

สุรภิก ทอสุก และอรรถพล เก้าพิทักษ์กุล (2561) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งบนหลังคาของอาคารตัวอย่าง คำนวณโดยโปรแกรม PVsyst เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบ มีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งจะพิจารณาสองปัจจัยหลักคือ ต้นทุนในการติดตั้ง และปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ สำหรับการคำนวณระยะเวลาคืนทุน และอัตราผลตอบแทน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ระบบที่มีการติดตั้งจริงนั้นสามารถผลิตไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณ และปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สามารถปรับปรุงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม

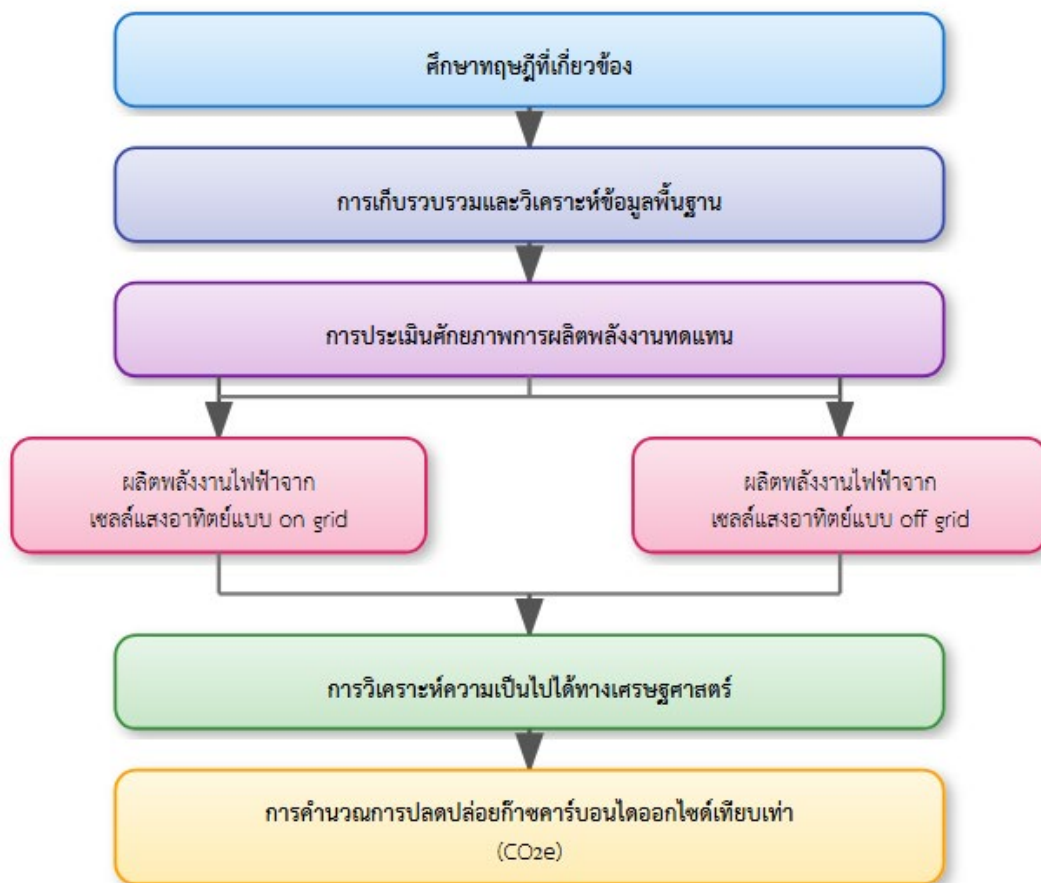
จากเหตุผลข้างต้น และจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การบูรณาการระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบพลังงานแบบดั้งเดิมที่รับไฟฟ้าจากสายส่งของการไฟฟ้า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂e) จากอาคารได้เป็นอย่างดี แต่เนื่องจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีการลงทุนสูง (อิทธิเดช ภู่นันทพงษ์, 2562) ดังนั้นการใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยประกอบการตัดสินใจเป็นวิธีการที่ยอมรับทั้งในภาควิชาการและอุตสาหกรรม (บัญชา งามชื่น, 2562) ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการจำลองการใช้พลังงาน และการจัดการพลังงานเพื่อใช้เป็นแนวทางนำไปสู่การจัดการความเป็นกลางทางคาร์บอนในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับอาคารสำนักงาน และโดเมนกประสงค์ และวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂e) เพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา จังหวัดนนทบุรี
2. เพื่อวิเคราะห์ต้นทุน และผลตอบแทนทางการเงินของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของอาคารสำนักงาน และโดเมนกประสงค์ ในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา จังหวัดนนทบุรี

วิธีดำเนินการวิจัย

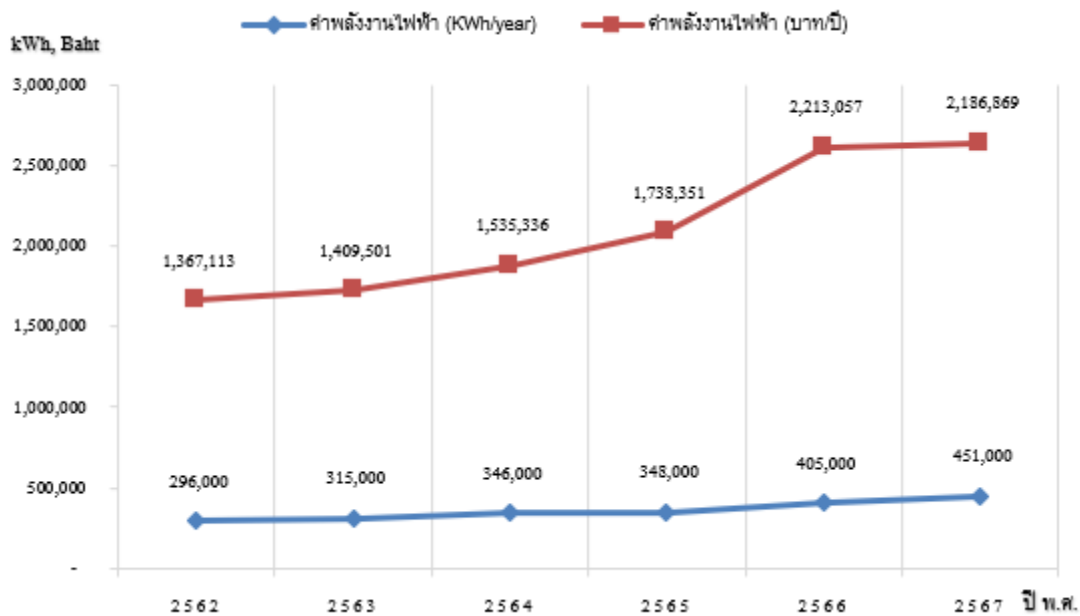
การวิจัยนี้มีกรอบแนวคิดที่นำเสนอแสดงถึงโครงสร้าง และกระบวนการของการศึกษาเรื่อง การจัดการพลังงานในอาคารสำนักงาน เพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา โดยมีการจัดลำดับกระบวนการวิจัยอย่างเป็นระบบ และเชื่อมโยงกันเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัย กรอบแนวคิดการวิจัยนี้นำเสนอแนวทางที่เป็นระบบ และครอบคลุมในการศึกษาการจัดการพลังงานในอาคารภาครัฐเพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน โดยมีการบูรณาการองค์ความรู้ทั้งในด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่มีคุณค่า และนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนตามเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะในเป้าหมายที่เกี่ยวข้องกับพลังงานสะอาด เมืองยั่งยืน และการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กรอบแนวคิดในการวิจัย ตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การรวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการวิจัย ประกอบด้วย : สำรวจ และเก็บข้อมูลกายภาพของอาคารในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา เช่น พื้นที่ใช้สอย ลักษณะหลังคา ทิศทางการวางตัวของอาคาร รวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลังของอาคาร (ภาพที่ 2) วิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานตามช่วงเวลาและตามฤดูกาล ประเมินศักยภาพของพื้นที่หลังคาสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยภาพที่ 2 จะแสดงกราฟเส้นเปรียบเทียบระหว่างปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/year) และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า (บาท/ปี) ของเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา ระหว่างปี พ.ศ. 2562 ถึง 2567 โดยแกนอนแสดงปี พ.ศ. และแกนตั้งแสดงหน่วย

kWh และบาท จากการวิเคราะห์แนวโน้ม พบว่า ทั้งปริมาณการใช้ไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายมีทิศทางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดช่วง 6 ปี แต่มีอัตราการเพิ่มที่แตกต่างกัน โดยเส้นกราฟสีน้ำเงิน (ปริมาณการใช้ไฟฟ้า) มีความชันน้อยกว่าเส้นกราฟสีแดง (ค่าใช้จ่าย) อย่างเห็นได้ชัด สะท้อนให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วกว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้า ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 296,000 kWh ในปี 2562 เป็น 451,000 kWh ในปี 2567 คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 52.4 ในขณะที่ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจาก 1,367,113 บาท เป็น 2,186,869 บาท คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 60.0 ความแตกต่างระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นนี้ (ประมาณร้อยละ 7.6) อาจเป็นผลมาจากการปรับขึ้นของอัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วยในช่วงเวลาดังกล่าว จุดเปลี่ยนสำคัญปรากฏชัดเจนในช่วงปี 2565-2566 โดยทั้งปริมาณการใช้ไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายมีการเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 348,000 kWh เป็น 405,000 kWh (เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.4) และค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจาก 1,738,351 บาท เป็น 2,213,057 บาท (เพิ่มขึ้นร้อยละ 27.3) ในช่วงเวลาเพียงหนึ่งปี ความแตกต่างระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ (ประมาณร้อยละ 10.9) สูงกว่าค่าเฉลี่ยตลอด 6 ปี ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงการปรับขึ้นของอัตราค่าไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเวลาดังกล่าว



ภาพที่ 2 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา ปี พ.ศ. 2562 ถึง พ.ศ. 2567

การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทน ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์และประเมินศักยภาพในการผลิตพลังงานทดแทน โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ : 1) การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงาน และอาคารโดมอเนกประสงค์ จำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า ใช้โปรแกรม PVsyst 7.3.1 ในการจำลอง และคำนวณกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสม ประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ต่อปี 2) วิเคราะห์ความสามารถในการทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Off-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ จำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่ไม่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ประเมินความสามารถในการผลิต และจัดเก็บพลังงานเพื่อการใช้งานอย่างต่อเนื่อง วิเคราะห์ความสามารถในการพึ่งพาตนเองด้านพลังงาน และความมั่นคงทางพลังงาน ประเมินความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับอาคารประเภทต่าง ๆ ในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ความคุ้มค่า และความเป็นไปได้ในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย : ประเมินต้นทุนในการลงทุนติดตั้งระบบ (Initial Cost) ประเมินค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบตลอดอายุโครงการ คำนวณผลประโยชน์จากการลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย วิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) คำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ประเมินอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of

Return: IRR) การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Potential) (พัชรินทร์ อินทมาศ และคณะ, 2565) โดยทั่วไปเทคนิคที่นิยมใช้มี 3 วิธีดังนี้ โดยที่ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) แสดงดังสมการที่ 1

$$Payback = \frac{\text{Total Investment}}{\text{Annual Cash Flow}} \quad (1)$$

เมื่อ Payback คือ ระยะเวลาคืนทุน, Total Investment คือ เงินลงทุนทั้งหมดก่อนเริ่มโครงการ, Unit per year คือ หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี และ FIT คือ มาตรการส่งเสริมการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนประเภทหนึ่ง ระยะเวลาคืนทุนจะมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็ต่อเมื่อมีระยะเวลาน้อยกว่าอายุ ของโครงการ (25 ปี)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันรวมของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนเริ่มแรก ณ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการหรือต้นทุนเงินลงทุนของโครงการ สามารถคำนวณ NPV ได้ดังสมการที่ 2

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (2)$$

โดยที่ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ(บาท), Est คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละปี(บาท), n คือ อายุโครงการ (ปี), i คือ อัตราคิดลด (Discount rate), t คือ Time of cash flow

เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้ของโครงการ มีค่ามากกว่า 0 ก็ตัดสินใจลงทุนหรือยอมรับโครงการนั้น หากมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าน้อยกว่า 0 หรือ มีค่าเป็นลบก็ไม่ลงทุนในโครงการดังกล่าวเนื่องจากไม่คุ้มค่าที่จะลงทุน

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คือ อัตราคิดลด (discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการเท่ากับเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ อัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับศูนย์ เป็นอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยต่อปีที่ผู้ลงทุนจะได้รับจากการลงทุนตลอดอายุโครงการ คำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - C_0 \quad (3)$$

เมื่อ IRR คือ อัตราผลตอบแทนภายใน, Est คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละปี (บาท), IO คือเงินลงทุนตอนเริ่มโครงการ (บาท)

สำหรับเกณฑ์ตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจะพิจารณา ดังนี้

- หาก IRR > ต้นทุนเงินทุน (cost of capital) ของโครงการก็ตัดสินใจลงทุน
- หาก IRR < ต้นทุนเงินทุน (cost of capital) ของโครงการก็ตัดสินใจไม่ลงทุน

การคำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการวิจัยเป็นการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย : จำนวนปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันประเมินการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์วิเคราะห์สัดส่วนการลดการปลดปล่อยเทียบกับเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมโดยรวมของโครงการ เสนอแนวทางในการบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนในระยะยาว การคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมและนำไปวิเคราะห์หาแนวทางหรือมาตรการเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ค่า Emission Factor เท่ากับ 0.5986 kgCO₂e/kWh.year ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2566 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$\text{Avoided CO}_2\text{e Emissions} = \text{ER} \times 0.5986 \text{ (kgCO}_2\text{e/kWh.year)} \quad (4)$$

โดยที่ ER คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh)

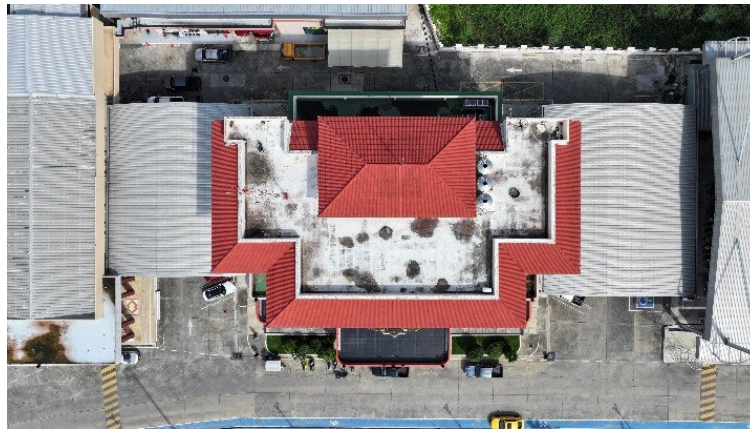
ผลการวิจัย

1. **อาคารกรณีศึกษา** เมื่อดำเนินการจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบ On-grid ของอาคารสำนักงาน และอาคารโดมอเนกประสงค์ ส่วนรูปแบบ Off-grid จะใช้อาคารโดมอเนกประสงค์เพียงอาคารเดียว โดยใช้โปรแกรม PVsyst เวอร์ชัน 7.3.1 เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทน และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2. **การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ On-grid** สำหรับบนหลังคาอาคารสำนักงาน และโดมอเนกประสงค์เทศบาลเมืองบางรักพัฒนา ดังภาพที่ 3 (ก), (ข) และภาพที่ 4 (ก), (ข) ในส่วนของอาคารสำนักงานได้รับการออกแบบโดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิด Monocrystalline Silicon จากบริษัท Jinkosolar รุ่น JKM-610N-78HL4-BDV ที่มีกำลังการผลิตต่อแผง 610 Wp จำนวน 234 แผง โดยจัดเรียงในรูปแบบ 39 สาย และแต่ละสายประกอบด้วย 6 แผงต่อกัน ทำให้ได้กำลังการผลิตรวมของระบบ 143 kWp ครอบคลุมพื้นที่หลังคาทั้งหมด 654 ตารางเมตร สำหรับอินเวอร์เตอร์ใช้รุ่น SUN2000-50KTL-M3-400V จากบริษัท Huawei Technologies ส่งผลให้อัตราส่วน DC : AC เท่ากับ 1.43 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เป็นแบบคงที่ โดยปรับมุมเอียง 14 องศา และหันหน้าไปทางทิศใต้ (มุมอะซิมุท 0 องศา) เพื่อให้ได้รับแสงแดดในปริมาณสูงสุดตลอดวัน ในการติดตั้งไม่มีสิ่งกีดขวางที่จะทำให้เกิดเงาบังแผงโซลาร์เซลล์ สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกัน คือ Jinkosolar รุ่น JKM-610N-78HL4-BDV จำนวน 450 แผง จัดเรียงเป็น 45 สายและแต่ละสายมี 10 แผงต่อกัน ทำให้ได้กำลังการผลิตรวม 275 kWp ครอบคลุมพื้นที่หลังคา 1,258 ตารางเมตร อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นรุ่น SUN2000-100KTL-M1-400Vac ส่งผลให้อัตราส่วน DC:AC เท่ากับ 1.615 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เป็นแบบคงที่ โดยปรับมุมเอียง 14 องศา และหันหน้าไปทางทิศใต้ (มุมอะซิมุท 0 องศา) เพื่อให้ได้รับแสงแดดในปริมาณสูงสุดตลอดวัน เช่นเดียวกับอาคารสำนักงาน



ภาพที่ 3 ภาพอาคารสำนักงานสำนักงานเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา



ภาพที่ 4 แบบแปลนหลังคาของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

ตารางที่ 1

ผลการจำลองผลิตพลังงานไฟฟ้ารายเดือนอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	135.9	66.81	27.15	153.2	149.8	19,020	18,540	0.848
February	134.0	70.21	28.58	144.9	141.8	17,781	17,418	0.842
March	159.1	86.97	29.83	164.0	160.4	20,161	19,650	0.839
April	166.0	80.15	30.36	163.9	160.4	19,904	19,394	0.829
May	156.7	86.55	30.28	148.7	144.6	18,237	17,778	0.838
June	141.1	79.53	29.26	131.8	127.9	16,255	15,849	0.843
July	139.3	81.76	29.34	131.9	128.3	16,285	15,876	0.843
August	135.1	82.16	29.18	131.3	127.9	16,244	15,833	0.845
September	123.7	75.99	28.26	124.6	121.4	15,309	14,927	0.839
October	126.6	77.17	28.58	132.8	129.8	16,438	16,023	0.845
November	125.0	66.44	28.00	137.2	134.4	17,006	16,577	0.846
December	133.0	61.45	27.35	151.6	148.5	18,822	18,345	0.848
Year	1,675.4	915.19	28.85	1,716.0	1,675.2	211,552	206,209	0.842

ตารางที่ 2

ผลการจำลองผลิตพลังงานไฟฟ้ารายเดือนอาคารโดมอเนกประสงค์เทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	135.9	66.81	27.15	153.2	149.8	35,243	34,424	0.818
February	134.0	70.21	28.58	144.9	141.8	32,953	32,186	0.809
March	159.1	86.97	29.83	164.0	160.4	37,118	36,255	0.805

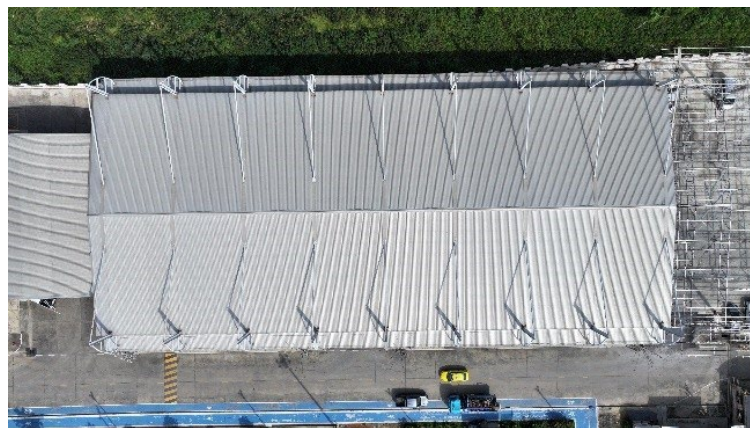
April	166.0	80.13	30.36	163.9	160.4	36,283	35,429	0.787
May	156.7	86.55	30.28	148.7	144.6	33,944	33,163	0.813
June	141.1	79.52	29.26	131.8	127.9	30,465	29,773	0.823
July	139.3	81.76	29.34	131.9	128.3	30,583	29,885	0.825
August	135.1	82.16	29.18	131.3	127.9	30,496	29,792	0.826
September	123.7	75.99	28.26	124.6	121.4	28,577	27,930	0.816
October	126.6	77.17	28.58	132.8	129.8	30,689	29,982	0.822
November	125.0	66.43	28.00	137.2	134.4	31,385	30,660	0.814
December	133.0	61.46	27.35	151.6	148.5	34,712	33,903	0.815
Year	1,675.4	915.17	28.85	1,716.0	1,675.2	392,448	383,381	0.814

ผลการจำลองแสดงในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ระบบ On-grid สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 206,209 kWh/Year คิดเป็นการผลิตจำเพาะ 1,445 kWh/kWp/Year และมีอัตราส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio) 84.19% ซึ่งถือเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยม เมื่อพิจารณารายเดือนพบว่า ระบบมีการผลิตพลังงานสูงสุดในเดือนมีนาคม (19,650 kWh) และต่ำสุดในเดือนกันยายน (14,927 kWh) โดยมีความแปรปรวนตามฤดูกาลเป็นไปตามธรรมชาติของสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย ในช่วงฤดูร้อน (มีนาคม-พฤษภาคม) ระบบมีการผลิตพลังงานเฉลี่ย 18,941 kWh/Month แต่มี Performance Ratio ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิสูง ขณะที่ช่วงฤดูฝน (มิถุนายน-ตุลาคม) มีการผลิตพลังงานลดลงเป็น 15,850 kWh/Month เนื่องจากการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ลดลง และในช่วงฤดูหนาว (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) มีการผลิตพลังงานเฉลี่ย 17,595 kWh/Month พร้อมกับ Performance Ratio สูงสุด 84.5% รูปแบบการผลิตไฟฟ้ารายชั่วโมงของระบบ On-grid แสดงให้เห็นว่าระบบเริ่มผลิตไฟฟ้าตั้งแต่เวลา 06:00 น. และสิ้นสุดการผลิตเวลา 18:00 น. โดยมีช่วงเวลาค้นผลิตสูงสุดระหว่าง 11:00-13:00 น. ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 77.0 kW ในช่วง 12:00 น. ลักษณะการผลิตนี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของมุมแสงอาทิตย์ตลอดวัน ทำให้เกิดเส้นโค้งการผลิตพลังงานที่มีลักษณะคล้ายระฆัง การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานในระบบ On-grid พบว่า การสูญเสียหลักมาจากอุณหภูมิ 8.56% การไม่ตรงกันของแผง 2.10% การสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์ 2.79% การสูญเสียจากสายไฟ DC 0.98% และการสูญเสียจากระบบการแผ่รังสี 0.72% เมื่อรวมการสูญเสียทั้งหมดแล้ว ระบบสามารถแปลงพลังงานนามธรรมของแผง 239,288 kWh ให้เป็นพลังงานที่จุด MPP 212,170 kWh และส่งออกเป็นพลังงานไฟฟ้าเข้าระบบได้ 206,209 kWh ส่วนผลการจำลองในตารางที่ 2 แสดงผลการจำลองระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมเนกประสงค์แสดงให้เห็นว่า สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 383,381 kWh/Year คิดเป็นการผลิตจำเพาะ 1,397 kWh/kWp/Year และมีอัตราส่วนประสิทธิภาพ 81.39% ซึ่งสูงกว่าระบบ Off-grid บนพื้นที่เดียวกัน แต่ต่ำกว่าระบบ On-grid ของอาคารสำนักงาน การผลิตพลังงานรายเดือนมีการแปรปรวนคล้ายคลึงกับระบบอื่น ๆ โดยมีการผลิตสูงสุดในเดือนมีนาคม (36,255 kWh) และต่ำสุดในเดือนกันยายน (27,930 kWh) การผลิตไฟฟ้ารายชั่วโมงแสดงให้เห็นว่า ระบบมีการผลิตสูงสุดถึง 138 kW ในช่วง 12:00 น. ซึ่งอยู่ระหว่างระบบ On-grid ของอาคารสำนักงาน (77 kW) และระบบ Off-grid (165 kW) การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานในระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมพบว่าการสูญเสียจากอุณหภูมิ 8.56% การไม่ตรงกันของแผง 2.10% การสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์ 6.11% การสูญเสียจากสายไฟ DC 0.98% และการสูญเสียจากระบบการแผ่รังสี 0.72% การสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์อยู่ระหว่างระบบ On-grid ของอาคารสำนักงานและระบบ Off-grid เนื่องจากอัตราส่วน DC : AC ที่อยู่ในระดับกลาง ส่งผลให้พลังงานนามธรรมของแผง 460,164 kWh ถูกแปลงเป็นพลังงานที่จุด MPP 408,010 kWh และส่งออกเป็นพลังงานไฟฟ้าเข้าระบบได้ 383,381 kWh

3. การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Off-grid (อาคารโดมเนกประสงค์) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Off-grid ที่ออกแบบสำหรับอาคารโดมเนกประสงค์ของเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา มีขนาดใหญ่กว่าระบบ On-grid อย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกัน คือ Jinkosolar รุ่น JKM-610N-78HL4-BDV แต่ติดตั้งจำนวน 540 แผง จัดเรียงเป็น 45 สาย และแต่ละสายมี 12 แผงต่อกัน ทำให้ได้กำลังการผลิตรวม 329 kWp ครอบคลุมพื้นที่หลังคา 1,509 ตารางเมตร อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นรุ่น SUN2000-100KTL-M1-400Vac จากบริษัท Huawei Technologies มีกำลังรวม 200 kWac ส่งผลให้อัตราส่วน DC : AC สูงถึง 1.647 ซึ่งสูงกว่าระบบ On-grid การติดตั้งใช้รูปแบบเดียวกับระบบ On-grid คือแผงคงที่ที่มุมเอียง 14 องศา และหันหน้าไปทางทิศใต้ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางที่ทำให้เกิดเงาบัง ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) และภาพที่ 4 (ข)



ภาพที่ 5 ภาพอาคารโดมอเนกประสงค์



ภาพที่ 6 แบบแปลนหลังคาอาคารโดมอเนกประสงค์

ตารางที่ 3

ผลการจำลองผลิตพลังงานไฟฟ้ารายเดือนอาคารโดมอเนกประสงค์เทศบาลเมืองบางรักพัฒนา (Off-grid)

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	135.9	66.81	27.15	153.2	149.8	42,056	41,080	0.814
February	134.0	70.25	28.58	144.9	141.8	39,300	38,384	0.804
March	159.1	86.97	29.83	164.0	160.4	44,435	43,302	0.801
April	166.0	80.13	30.36	163.9	160.4	43,406	42,382	0.785
May	156.7	86.55	30.28	148.7	144.6	40,520	39,586	0.808
June	141.1	79.52	29.26	131.8	127.9	36,328	35,503	0.818
July	139.3	81.76	29.34	131.9	128.3	36,423	35,593	0.819
August	135.1	82.16	29.18	131.3	127.9	36,269	35,433	0.819
September	123.7	75.99	28.26	124.6	121.4	34,192	34,415	0.814
October	126.6	77.17	28.58	132.8	129.8	36,611	35,768	0.818
November	125.0	66.43	28.00	137.2	134.4	37,528	36,659	0.811
December	133.0	61.46	27.35	151.6	148.5	41,454	40,488	0.811
Year	1,675.4	915.17	28.85	1,716.0	1,675.2	468,422	457,593	0.810

ผลการจำลองระบบ Off-grid ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 457,593 kWh/Year ซึ่งมากกว่าระบบ On-grid ถึง 2.22 เท่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการผลิตจำเพาะจะได้ 1,389 kWh/kWp/Year ซึ่งต่ำกว่าระบบ On-grid ที่ 1,445 kWh/kWp/Year ประมาณ 56 kWh/kWp/Year อัตราส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio) ของระบบ Off-grid อยู่ที่ 80.95% ซึ่งต่ำกว่าระบบ On-grid ประมาณ 3.24% ความแตกต่างนี้เกิดจากการสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ที่สูงกว่า เนื่องจากอัตราส่วน DC:AC ที่สูง เมื่อพิจารณารายเดือนพบว่า ระบบ Off-grid มีการผลิตพลังงานสูงสุดในเดือนมีนาคม (43,302 kWh) และต่ำสุดในเดือนกันยายน (33,415 kWh) แสดงรูปแบบความแปรปรวนตามฤดูกาลที่คล้ายคลึงกับระบบ On-grid การวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้ารายชั่วโมงของระบบ Off-grid แสดงให้เห็นว่าระบบเริ่ม และสิ้นสุดการผลิตในช่วงเวลาเดียวกับระบบ On-grid (06:00-18:00 น.) แต่มีการผลิตสูงสุดถึง 165 kW ในช่วง 12:00 น. ซึ่งสูงกว่าระบบ On-grid มากกว่า 2 เท่า สอดคล้องกับขนาดของระบบที่ใหญ่กว่า การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานในระบบ Off-grid พบว่ามีการสูญเสียหลักจากอุณหภูมิ 8.56% เช่นเดียวกับระบบ On-grid การไม่ตรงกันของแผง 2.10% การสูญเสียจากสายไฟ DC 0.98% และการสูญเสียจากระดับการแผ่รังสี 0.72% แต่การสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์สูงถึง 6.63% ซึ่งสูงกว่าระบบ On-grid อย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุหลักมาจากการทำงานเกินกำลังของอินเวอร์เตอร์ 4.43% ส่งผลให้พลังงานนามธรรมของแผง 552,196 kWh ถูกแปลงเป็นพลังงานที่จุด MPP 489,612 kWh และส่งออกเป็นพลังงานไฟฟ้าเข้าระบบได้ 457,593 kWh

4. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบทั้งสาม

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบทั้งสามแสดงให้เห็นความแตกต่างที่น่าสนใจ ระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงานมีประสิทธิภาพสูงสุดในแง่ของ Performance Ratio (84.19%) ตามด้วยระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ (81.39%) และระบบ Off-grid (80.95%) ความแตกต่างนี้เกิดจากอัตราส่วน DC : AC ที่แตกต่างกัน โดยระบบที่มีอัตราส่วนต่ำกว่าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพต่อหน่วยพื้นที่ พบว่าระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงานมีประสิทธิภาพสูงสุด 315.3 kWh/m²/Year ตามด้วยระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ 304.7 kWh/m²/Year และระบบ Off-grid 303.3 kWh/m²/Year การสูญเสียในอินเวอร์เตอร์แสดงความแตกต่างที่ชัดเจน โดยระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงานมีการสูญเสียต่ำสุด 2.79% ระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ 6.11% และระบบ Off-grid สูงสุด 6.63% สาเหตุหลักมาจากการทำงานเกินกำลังของอินเวอร์เตอร์เมื่ออัตราส่วน DC : AC สูงเกินไป อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการผลิตพลังงานรวม ระบบ Off-grid ให้ผลผลิตสูงสุด 457,593 kWh/Year ตามด้วยระบบ On-grid สำหรับอาคารโดม 383,381 kWh/Year และระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงาน 206,209 kWh/Year

5. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และผลประโยชน์ที่จะได้รับจากการออกแบบติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยใช้การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period : PB) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) และอัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return : IRR) ซึ่งการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของระบบจะขึ้นกับราคาของอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้กับการติดตั้ง และการเลือกใช้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูง ทำให้ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีกำลังการผลิตไฟฟ้าในแต่ละวันอยู่ในเกณฑ์สูง ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นจะส่งผลต่อระยะเวลาคืนทุนของระบบการติดตั้งพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 5 บาท ใช้อัตราคิดลดที่ 5% และความเป็นไปได้ของโครงการที่ดีที่สุดในระยะเวลา 25 ปี

ตารางที่ 4

วิเคราะห์การลงทุนการจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

มาตรการ	พลังงาน ที่ผลิตได้ (kWh/Year)	พลังงานที่ต้อง จัดหาเพิ่มเติม (kWh/Year)	พลังงานที่เก็บ ในแบตเตอรี่ (kWh)	ค่าใช้จ่าย ในการติดตั้ง (บาท)	กระแสเงินสด ที่ได้รับต่อปี (บาท)
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ อาคารสำนักงาน On-grid	206,209	244,791	-	6,943,955	1,031,045
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ อาคารโดมอเนกประสงค์ On-grid	383,381	67,619	-	11,338,095	1,916,905
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ อาคารโดมอเนกประสงค์ Off-grid	457,593	-	1,250	22,060,000	2,287,965

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สืบราคาจากงานราชการ ราคาหน่วยละ 40,000 บาท ต่อ 1 KWp และราคาแบตเตอรี่ 1 Wh เท่ากับราคา 10 Baht โดยเก็บไว้ใช้สำรองระยะเวลา 1 วัน

จากตารางที่ 4 สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างระบบ On-grid และ Off-grid ในหลายมิติ ระบบ On-grid ที่ติดตั้งในอาคารสำนักงานมีความสามารถในการผลิตพลังงาน 206,209 kWh/Year ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่อาคารใช้จริงจากการไฟฟ้า 451,000 kWh/Year พบว่า ระบบสามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายได้ประมาณ 45.72% แต่ยังคงพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายอีก 244,791 kWh/Year ส่วนระบบ On-grid ที่ติดตั้งในอาคารโดมอเนกประสงค์มีความสามารถในการผลิตพลังงาน 383,381 kWh/Year ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่อาคารใช้จริง พบว่า ระบบสามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายได้ประมาณ 85.01% ยังต้องพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายอีก 67,619 kWh/Year ระบบ ซึ่งถือเป็นอัตราที่น่าประทับใจและแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่แท้จริงของเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ในบริบทของประเทศไทย ในทางตรงกันข้าม ระบบ Off-grid ที่ติดตั้งในอาคารโดมอเนกประสงค์แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตพลังงานที่สูงมาก คือ 457,593 kWh/Year การลงทุนเริ่มต้นสำหรับระบบ On-grid ที่ติดตั้งในอาคารสำนักงาน อยู่ที่ 6,943,955 บาท (คิดรวมการใช้ไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายด้วย) และที่ติดตั้งในอาคารโดมอเนกประสงค์ อยู่ที่ 11,338,095 บาท (คิดรวมการใช้ไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายด้วย) เมื่อเทียบกับ 22,060,000 บาท (คิดรวมค่าแบตเตอรี่ด้วย) สำหรับระบบ Off-grid แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่สำคัญ ผลประโยชน์ที่ได้รับ ระบบ On-grid มีค่าเท่ากับ 1,031,045 บาทต่อปี และ 1,916,905 บาทต่อปี ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ 2,287,965 บาท สำหรับระบบ Off-grid ความแตกต่างนี้เกิดจากความซับซ้อนของระบบ Off-grid ที่ต้องการแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ 1,250 Kwh ซึ่งต้องมีการบำรุงรักษา เปลี่ยนถ่าย และจัดการอย่างเหมาะสม

ตารางที่ 5

ผลตอบแทนการลงทุนการจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

มาตรการ	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) (บาท)	อัตราผลตอบแทน ภายใน (IRR) (%)	ระยะเวลาคืนทุน (PB) (ปี)
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ อาคารสำนักงาน On-grid	7,587,536.08	8.88	8.6
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ อาคารโดมอเนกประสงค์ On-grid	15,678,657.81	10.99	7.3
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ อาคารโดมอเนกประสงค์ Off-grid	10,186,451.88	4.30	13.6

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5 สำหรับระบบ On-grid ในอาคารสำนักงาน การลงทุน 3 ประการ คือ ระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ และอัตราผลตอบแทนภายใน คำนวณหาระยะเวลาคืนทุนโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel พบว่าระยะเวลาคืนทุน 8 ปี 6 เดือน จากผลการวิเคราะห์ด้านการเงินข้างต้นนำวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยใช้อัตราส่วนลด 5% พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ตลอดอายุมีค่าเท่ากับ 7,587,536.08 บาท ซึ่งมีค่าเป็นบวกแสดงว่า ยอมรับโครงการ ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้านการเงินข้างต้น นำมาวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนลดค่า (IRR) พบว่า ค่า IRR ตลอดโครงการมีค่าเท่ากับ 8.88% สำหรับอาคารโดมเนกประสงค์ พบว่าระยะเวลาคืนทุน 7 ปี 3 เดือน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ตลอดอายุมีค่าเท่ากับ 15,678,657.81 บาท ซึ่งมีค่าเป็นบวกแสดงว่ายอมรับโครงการ ส่วนอัตราผลตอบแทนลดค่า (IRR) พบว่าค่า IRR ตลอดโครงการมีค่าเท่ากับ 10.99% และสำหรับระบบ Off-grid มีการลงทุนเริ่มต้นที่ 22,060,000 บาท (คิดรวมค่าแบตเตอรี่ด้วย) พบว่า ระยะเวลาคืนทุน 13 ปี 6 เดือน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ตลอดอายุมีค่าเท่ากับ 10,186,451.88 บาท ซึ่งมีค่าเป็นบวกแสดงว่ายอมรับโครงการ การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนลดค่า (IRR) พบว่า ค่า IRR ตลอดโครงการมีค่าเท่ากับ 4.30%

6. การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e)

การคำนวณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) เพื่อประเมินผลการประหยัดพลังงานจากแบบจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂e) โดยใช้ข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission Factor) สำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) เริ่มบังคับใช้ 1 มกราคม 2566 มีค่าเท่ากับ 0.5986 kgCO₂e/kWh (ทินกร เชื้อวงศ์, ศุภรัชชัย วรรัตน์, และประยุทธ์ ฤทธิเดช, 2567) จากตารางที่ 6 ผลการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) ที่ได้จะแสดงค่าที่ได้เป็นรายการมาตรการที่สามารถดำเนินการได้จริง โดยพิจารณาจากการลงทุนตลอดโครงการ 25 ปี

ตารางที่ 6

การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดอายุโครงการ 25 ปี

มาตรการ	การประหยัดพลังงาน (kWh/Year)	การลด CO ₂ รายปี		การลด CO ₂ ตลอดอายุโครงการ 25 ปี	
		CO ₂ Emission (kgCO ₂ e/year)	CO ₂ Emission (tCO ₂ e/year)	CO ₂ Emission (kgCO ₂ e)	CO ₂ Emission (tCO ₂ e)
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อาคารสำนักงาน On-grid	206,209	123,436.70	123.43	3,085,917.50	3,085.91
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อาคารโดมเนกประสงค์ On-grid	383,381	229,491.86	229.49	5,737,296.66	5,737.29
จำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อาคารโดมเนกประสงค์ Off-grid	457,593	273,915.17	273.91	6,847,879.25	6,847.87

ตารางที่ 6 นำเสนอข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการดำเนินมาตรการผลิตพลังงานทดแทน โดยแสดงข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดอายุโครงการ 25 ปี ซึ่งมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง 3 ระบบ สำหรับระบบ On-grid เป็นการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารสำนักงาน และอาคารโดมเนกประสงค์ในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนาโดยตรง ผลการศึกษาพบว่าอาคารสำนักงานระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 206,209 kWh/Year สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 123,436.70 kgCO₂e/year หรือคิดเป็น 123.43 tCO₂e/year เมื่อคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจกตลอดอายุโครงการ 25 ปี จะสามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้รวม 3,085,917.50 kgCO₂e/year หรือ 3,085.91 tCO₂e อาคารโดมเนกประสงค์ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 383,381 kWh/Year สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 229,491.86 kgCO₂e/year หรือคิดเป็น 229.49 tCO₂e/year เมื่อคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจกตลอดอายุโครงการ 25 ปี จะสามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้รวม

5,737,296.66 kgCO₂e/year หรือ 5,737.29 tCO₂e และสำหรับระบบ Off-grid เป็นการขยายพื้นที่ติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า ออกไปนอกตัวอาคารหลัก โดยใช้หลังคาโดมอเนกประสงค์ ผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 457,593 kWh/Year ซึ่งมากกว่าระบบ On-grid สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 273,915.17 kgCO₂e/year หรือคิดเป็น 273.91 tCO₂e/year เมื่อคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจกตลอดอายุโครงการ 25 ปี จะสามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้รวม 6,847,879.25 kgCO₂e/year หรือ 6,847.87 tCO₂e ระบบนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สูงกว่าในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากสามารถใช้พื้นที่ได้มากกว่า และไม่ถูกจำกัดด้วยขนาดหลังคาของอาคารหลักเพียงอย่างเดียว ทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการจัดการพลังงานในอาคารสำนักงาน เพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา ได้ดำเนินการจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 3 รูปแบบ ได้แก่ ระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงาน ระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ และระบบ Off-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ โดยใช้โปรแกรม PVsyst เวอร์ชัน 7.3.1 ระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงานใช้แผงโซลาร์เซลล์ Jinkosolar รุ่น JKM-610N-78HL4-BDV กำลัง 610 Wp จำนวน 234 แผง ให้กำลังการผลิตรวม 143 kWp สามารถผลิตพลังงานได้ 206,209 kWh/Year การผลิตจำเพาะ 1,445 kWh/kWp/Year และ Performance Ratio 84.19% สามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายได้ 45.72% ระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกัน จำนวน 450 แผง ให้กำลังการผลิตรวม 275 kWp สามารถผลิตพลังงานได้ 383,381 kWh/Year การผลิตจำเพาะ 1,397 kWh/kWp/Year และ Performance Ratio 81.39% สามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายได้ 85.01% ส่วนระบบ Off-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ใช้แผงโซลาร์เซลล์ 540 แผง ให้กำลังการผลิตรวม 329 kWp สามารถผลิตพลังงานได้ 457,593 kWh/Year การผลิตจำเพาะ 1,389 kWh/kWp/Year และ Performance Ratio 80.95%

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างแต่ละระบบ ระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงานมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 6,943,955 บาท ระยะเวลาคืนทุน 8 ปี 6 เดือน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 7,587,536.08 บาท และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 8.88% ระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 11,338,095 บาท ระยะเวลาคืนทุน 7 ปี 3 เดือน NPV 15,678,657.81 บาท และ IRR 10.99% ขณะที่ระบบ Off-grid มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 22,060,000 บาท ระยะเวลาคืนทุน 13 ปี 6 เดือน NPV 10,186,451.88 บาท และ IRR 4.30%

ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงานสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 123.43 tCO₂e/Year และตลอดอายุโครงการ 25 ปี ลดได้ 3,085.91 tCO₂e/Year ระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ลดการปล่อยก๊าซได้ 229.49 tCO₂e/Year และตลอดอายุโครงการลดได้ 5,737.29 tCO₂e/Year ส่วนระบบ Off-grid ลดการปล่อยก๊าซได้สูงสุดที่ 273.91 tCO₂e/Year และตลอดอายุโครงการลดได้ 6,847.87 tCO₂e/Year ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบ On-grid มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่า แต่ระบบ Off-grid มีศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกสูงกว่า ทั้งสามระบบมีส่วนสำคัญในการสนับสนุนเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนของเทศบาลเมืองบางรักพัฒนา

การอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงานมีประสิทธิภาพสูงสุดในแง่ของ Performance Ratio (84.19%) และการผลิตจำเพาะ (1,445 kWh/kWp/Year) ตามด้วยระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์ (81.39% และ 1,397 kWh/kWp/Year) และระบบ Off-grid (80.95% และ 1,389 kWh/kWp/Year) ความแตกต่างนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (วิรัตน์ พิษิตกัญญู และกิริติ ชยะกุลศิริ, 2561) ที่พบว่า การออกแบบระบบที่เหมาะสมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน โดยในการศึกษานี้ระบบที่มีอัตราส่วน DC : AC ที่เหมาะสม (1.43 สำหรับอาคารสำนักงาน) มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่มีอัตราส่วนสูงเกินไป (1.647 สำหรับระบบ Off-grid)

2. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์มีความคุ้มค่าสูงสุด โดยมี IRR 10.99% และระยะเวลาคืนทุนเพียง 7 ปี 3 เดือน ตามด้วยระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงาน (IRR 8.88%, ระยะเวลาคืนทุน 8 ปี 6 เดือน) และระบบ Off-grid (IRR 4.30%, ระยะเวลาคืนทุน 13 ปี 6 เดือน) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (สุรกิจ ทองสุก และอรรถพล เก้าพิทักษ์กุล, 2561) ที่ระบุว่า การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะพิจารณาสองปัจจัยหลัก คือ ต้นทุนในการติดตั้ง และปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

อย่างไรก็ตาม ทั้งสามระบบมี NPV เป็นบวก แสดงว่า ทุกโครงการมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ โดยระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมอเนกประสงค์มี NPV สูงสุด (15,678,657.81 บาท) เนื่องจากผลตอบแทนรวมที่สูง และระยะเวลาคืนทุนที่สั้น

3. การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สำคัญของเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ในการสนับสนุนเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน โดยระบบ Off-grid มีศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกสูงสุด (273.91 tCO₂e/Year) รองลงมาคือระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมเนกประสงค์ (229.49 tCO₂e/Year) และระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงาน (123.43 tCO₂e/Year) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 7 (พลังงานสะอาด) และเป้าหมายที่ 13 (การรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ) ตามที่ (ชิสา กันยาริยะ และสิรินทร์ กันยาริยะ, 2567) ได้กล่าวไว้

4. จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า ระบบ On-grid สำหรับอาคารโดมเนกประสงค์ เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในเรื่องของมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ มีการลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายได้สูง และมีศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกในระดับสูง แต่ระบบ On-grid สำหรับอาคารสำนักงาน เหมาะสำหรับการเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากมีความเสี่ยงต่ำ และประสิทธิภาพสูง สำหรับระบบ Off-grid เหมาะสำหรับองค์กรที่ต้องการความมั่นคงทางพลังงาน มีเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกสูง และมีทุนในการลงทุนเริ่มต้นสูง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรเริ่มดำเนินการติดตั้งในอาคารสำนักงานเป็นลำดับแรก เนื่องจากมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงแต่มีความเสี่ยงต่ำ โดยมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 8 ปี 6 เดือน และอัตราผลตอบแทนภายในที่ 8.88% ซึ่งถือเป็นการลงทุนที่น่าสนใจสำหรับหน่วยงานภาครัฐ
2. ควรพิจารณาการขยายระบบไปยังอาคารอื่น ๆ ในเทศบาลที่มีลักษณะการใช้งานคล้ายคลึงกัน เช่น อาคารที่มีการใช้ไฟฟ้าในช่วงกลางวันสูง อาคารที่มีพื้นที่หลังคาเหมาะสมสำหรับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ และอาคารที่มีโครงสร้างแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักของระบบ
3. ควรศึกษาเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง และต้นทุนต่ำกว่าเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะการติดตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และแบตเตอรี่เทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่อาจมีราคาถูกลง และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น
4. ควรศึกษาเปรียบเทียบเทคโนโลยีแผงโซลาร์เซลล์รุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นสิ่งที่ควรดำเนินการอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว การศึกษาควรครอบคลุมถึงความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย
5. ควรพัฒนาแบบจำลองการคาดการณ์ผลตอบแทนที่มีความแม่นยำสูงขึ้น โดยการรวมปัจจัยต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงราคาพลังงาน การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี และนโยบายภาครัฐ

เอกสารอ้างอิง

- ชิสา กันยาริยะ, และสิรินทร์ กันยาริยะ. (2567). การพัฒนาองค์กรอย่างยั่งยืนด้วยหลักพุทธธรรม. *วารสารสถาบันพอดิ*, 1(7), 7-26.
- ณัฐหทัย จุมรี, วรพจน์ มีถม, ณฤทธิศักดิ์ ตันติพิทยวรรณ, และชาติชาย อัครศักดิ์. (2567). *การศึกษาระยะเวลาคืนทุนของระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่จำกัดกรณีศึกษาอาคารเรียนระดับอาชีวศึกษา*. การประชุมวิชาการระดับชาติด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม ครั้งที่ 15. (น. 82-87).
- ทินกร เชื้อวงศ์, ศุภรัชชัย วรรัตน์, และประยุทธ์ ฤทธิเดช. (2567). การปรับปรุงพลังงานของกรอบอาคารในอาคารสำนักงานภาครัฐโดยใช้แบบจำลองพลังงาน: กรณีศึกษาสำนักงานเทศบาลเมืองบางแม้นาง. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซียฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 18(2), 92-106.
- บัญชา งามชื่น. (2562). *การวิเคราะห์ความพร้อมในการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดติดตั้งบนหลังคาขนาดใหญ่ 1 เมกะวัตต์* [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี]. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/3722>
- พัชรินทร์ อินทมาศ, มณีนันท์ ชัยสกุลนิยม, พเนตร สุขสิงห์, อธิระพงษ์ บุญรักษา และพรหมพัทธ์ บุญรักษา. (2565). การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาในระดับครัวเรือน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*, 4(3), 47-56.
- วิรัตน์ พิษิตกฤษ, และกิตติ ชยะกุลศิริ. (2561). การออกแบบ และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารกองบัญชาการกรมยุทธโยธาทหารบก. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 29(1), 25-36.
- สุรกิจ ทองสุก, และอรรถพล เก้าพิทักษ์กุล. (2561). การศึกษาประสิทธิภาพ และความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 10(19), 157-169.

อิทธิเดช ภู่นันทพงษ์. (2562). การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาตามนโยบายการรับซื้อไฟฟ้า สำหรับภาคประชาชนประเภทบ้านอยู่อาศัย [สารนิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].
<https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/70142>