

การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์: กรณีศึกษา อาคารสำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

EVALUATION OF ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM SOLAR ROOFTOP USING THE MATHEMATICAL MODEL: CASE STUDY OF ACADEMICS RESOURCE CENTER BUILDING, MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ศาสตราจารย์ศิริแก้ว* วุฒิสาสตร์ โชคเกื้อ อนุสรณ์ แสงประจักษ์ ชโลธร สีหาทิพย์
Sattra Sirikaew*, Wutthisat Chokkuea, Arnusorn Saengprajak, Chalotorn Seehatip

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University.

*Corresponding author, e-mail: sattra_20@hotmail.com

Received: May 24, 2018; Revised: July 6, 2018; Accepted: August 7, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาภายใต้เงื่อนไขทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคาอาคารสำนักวิทยบริการ (อาคาร A) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เขตพื้นที่ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และประมวลผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย (1) ประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่โดยใช้แบบพิมพ์เขียวอาคารซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AutoCAD (2) ประเมินศักยภาพรังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์จากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อประเมินค่ารังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคา (3) ประเมินกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยจาก 4 สถานีตรวจวัดสภาพอากาศ (สถานีอุตุณิยวิทยา จ.ขอนแก่น และ จ.ร้อยเอ็ด) และข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SW 285-300 MONO (5-busbar) และ (4) ประเมินพลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการติดตั้ง โดยการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าพิจารณาภายใต้มาตรฐานที่กำหนดโดย IEA (IEA-PVPS T2-03:2002) และแสดงผลการประเมินโดยใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ผลการวิจัยพบว่า อาคาร A มีพื้นที่หลังคารวม 2,744.00 ตารางเมตร สามารถจำแนกทิศทางของหลังคาโดยไข่มุมอะซิมุทพื้นดินได้ 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 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตารางเมตร-วัน ตามลำดับ ส่งผลต่อพลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการติดตั้ง (Y) มีค่า 154.86 148.54 139.08 136.88 122.35 และ 114.97 กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลวัตต์ติดตั้ง ตามลำดับ โดยศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงสุดในทิศ SE1 NW1 NW2 SW1 NE1 และ SE2

มีค่า 100.53 86.62 75.76 74.15 71.61 และ 65.54 เมกะวัตต์ชั่วโมง/ปี ตามลำดับ คิดเป็นพลังงานไฟฟ้ารวม 474.20 เมกะวัตต์ชั่วโมง/ปี ดังนั้นการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกตำแหน่ง Y_g ที่มีค่าสูงสุด

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา รังสีอาทิตย์ การประเมินศักยภาพ

Abstract

The purpose of this research is to evaluate the electricity generation potential from solar rooftop under a condition of solar radiation following a roof direction of the academic resource center building (A building), Mahasarakham University, Khamriang campus, Kantharawichai district, Mahasarakham province. The mathematical model on Microsoft Excel program was used in this analysis. The methods of the research are as follows: (1) the building plan analyzing by AutoCAD program was used in the evaluation of geographic potential; (2) the solar radiation data from the solar measurement station of faculty of engineering, Mahasarakham University was used in the evaluation of solar radiation potential following the roof direction; (3) the solar radiation data, the ambient temperature data from 4 meteorological station, Khon Kaen and Roi Et province, and the fundamental property of the solar cell, type of SW 285-300 MONO (5-busbar) were used in the evaluation of power and electricity; and (4) the evaluation of array yield. The standard of international energy agency (IEA-PVPS T2-03:2002) was used in an evaluation of electricity generation potential from the solar rooftop. The result of this potential has been shown with the geographic information system. The total area of the A building has been found that 2,744.00 m², and It has been classified in 6 directions. There are 165 (NE1), 75 (SE2), 30 (SE1), -15 (SW1), -105 (NW1) and -150 (NW2). The total solar roof installation is 972 panels, and the total power is 291.60 kW. The highest average solar radiation of SW1, SE1, NW1, SE2, NW2, and NE1 are 5.84, 5.61, 5.30, 5.19, 4.72 and 4.45 kWh/m²-d, respectively. Hence it affects the value of array yield (Y_g) is 154.86, 148.54, 139.08, 136.88, 122.35 and 114.97 kWh/kWp, respectively. The highest electric potential of SE1, NW1, NW2, SW1, NE1, and SE2 are 100.53, 86.62, 75.76, 74.15, 71.61 and 65.54 MWh/y, respectively. The total electricity is 474.20 MWh/y. Therefore, the evaluation of electricity generation potential from the solar rooftop is important to find out the highest array yield position.

Keywords: Solar Rooftop, Solar Radiation, Evaluation of Potential

บทนำ

หลายปีที่ผ่านมามีการใช้และพัฒนาพลังงานทดแทนในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากนโยบายการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนทั้งในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) พบว่า เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนในปี พ.ศ. 2579 กำหนดที่ร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย โดยเป้าหมายการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีค่า 19,684.40 เมกะวัตต์ (5,588.24 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ) หรือคิดเป็นร้อยละ 14.19 ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีสัดส่วนสูงสุดคือพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่า 6,000 เมกะวัตต์ หรือคิดเป็นร้อยละ 30 [1]

ปัจจุบันการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีทั้งภาคพื้นดิน (Solar Farm) ลอยน้ำ (Floating Solar Farm) ส่วนประกอบของอาคาร (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) และบนหลังคา (Solar Rooftop) [2] โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งระบบที่ติดตั้งบนหลังคาเป็นหนึ่งในระบบที่มีการติดตั้งอย่างแพร่หลาย เนื่องจากหลังคาเป็นพื้นที่ที่ได้รับรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งวันและส่วนใหญ่พื้นที่ดังกล่าวไม่มีการใช้ประโยชน์ ดังนั้นการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาหรือระบบเซลล์แสงอาทิตย์ใดๆ จึงต้องประเมินศักยภาพทางด้านภูมิศาสตร์ เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าในสภาวะใช้งานจริง

การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประเมินระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันหน้ารับรังสีอาทิตย์ทางทิศใต้และใช้มุมเอียงตามละติจูดของแต่ละพื้นที่ [3-5] นอกจากนี้

การศึกษาวิจัยในต่างประเทศยังมุ่งเน้นพิจารณามุมการติดตั้งที่เหมาะสมเพื่อรับรังสีอาทิตย์ได้สูงสุดภายใต้ทิศทางรับรังสีอาทิตย์ทางทิศใต้ [6-8]

จากการศึกษาวิจัยดังกล่าว พบว่าการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาส่วนใหญ่มุ่งเน้นประเมินจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันหน้ารับรังสีอาทิตย์ทางทิศใต้ แต่อาคารส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกออกแบบสำหรับการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นหากประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องพิจารณาทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งการพิจารณาดังกล่าวยังไม่มี การวิจัยมากนักในประเทศไทย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาภายใต้เงื่อนไข ทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแสดงผลการประเมินโดยใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ซึ่งถือเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการแสดงผลการประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่ [9-10] ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะสามารถใช้ประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และใช้เป็นข้อมูลสำหรับประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ รวมทั้งประเมินการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยฯ ได้เมื่อติดตั้งใช้งานจริง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาภายใต้เงื่อนไข ทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และประมวลผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel

วิธีดำเนินการวิจัย

การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาภายใต้เงื่อนไข

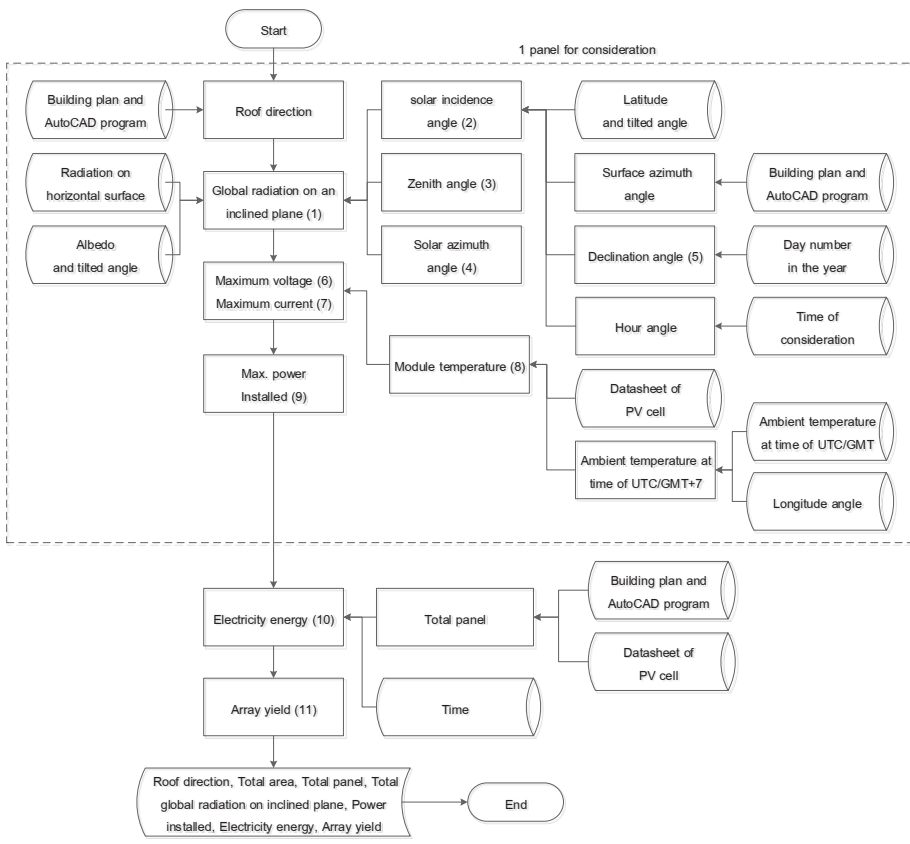
ทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และประมวลผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel คณะผู้วิจัยใช้อาคารสำนักวิทยบริการ (อาคาร A) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เขตพื้นที่ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม เป็นกรณีศึกษา มีลำดับขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัยแสดงดังภาพที่ 1 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่ เป็นการประเมินทิศทางและพื้นที่หลังคาทั้งหมดเพื่อประเมินพื้นที่ที่สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยพิจารณาภายใต้ระยะห่างระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับขอบหลังคาแต่ละด้านอย่างน้อย

ประมาณ 0.7 เมตร และระยะห่างระหว่างแผง 0.01 เมตร การประเมินดังกล่าวใช้ข้อมูลจากแบบพิมพ์เขียวอาคารร่วมกับแบบอาคารที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AutoCAD ซึ่งจะสามารถประเมินจำนวนแผงและกำลังไฟฟ้าติดตั้งได้

2. ประเมินศักยภาพรังสีอาทิตย์ เป็นการประเมินรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคาซึ่งแตกต่างกันในแต่ละทิศทางขึ้นอยู่กับมุมเดคลิเนชัน มุมละติจูด มุมเอียง มุมซัวโมง และมุมอะซิมุทพื้นดิน โดยรังสีอาทิตย์ดังกล่าวจะประเมินจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบระนาบในแนวระดับเป็นระนาบเอียง (แสดงดังภาพที่ 2) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (1) [11]

$$G_{\beta} = (G - G_d)(\cos \theta / \cos \theta_z) + (1/2)G\rho(1 - \cos \beta)[1 + \sin^2(\theta_z / 2)](\cos \Delta) + (1/2)G_d(1 + \cos \beta)[1 + F \sin^3(\beta / 2)](1 + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z) \quad (1)$$



ภาพที่ 1 ลำดับขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

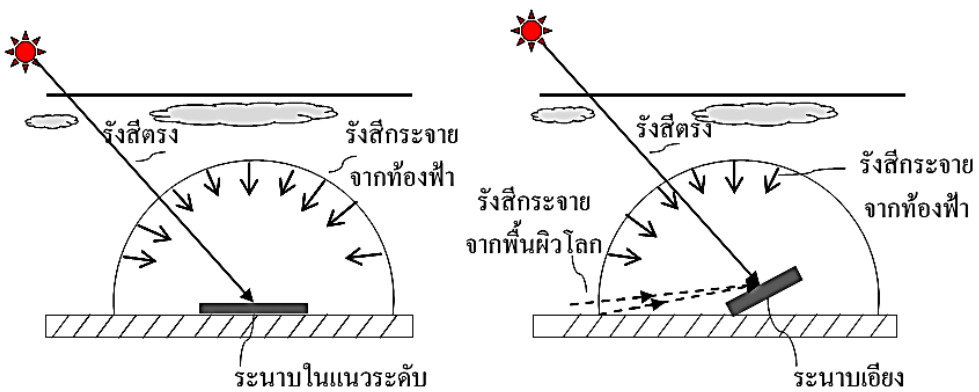
เมื่อ $G_{\beta\gamma}$, G และ G_d คือ รังสีรวมบนระนาบเอียง รังสีรวมบนระนาบในแนวระดับ และรังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับ (วัตต์/ตารางเมตร) ตามลำดับ θ , θ_z และ β คือ มุมตกกระทบของรังสีตรงมุมเซนติ และมุมเอียงของระนาบรับรังสีอาทิตย์ (องศา) ตามลำดับ ρ คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของพื้นโลก (สำหรับสภาพภูมิอากาศเขตร้อนชื้นมีค่าประมาณ 0.2) (-) [12] Δ คือ ผลต่างระหว่างมุมอะซิมุทของระนาบเอียง (γ) กับมุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์ (Ψ) (องศา) และ F คือ Klucher's Modulation Factor มีค่า $1 - (G_d / G)^2$ (-) โดย θ , θ_z และ Ψ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2) สมการ (3) และสมการ (4) ตามลำดับ [11]

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (2)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3)$$

$$\sin \psi = (\sin \omega \cos \delta) / \cos \alpha \quad (4)$$

เมื่อ δ , ϕ , ω และ α คือ มุมเดคลิเนชัน มุมละติจูด มุมชั่วโมง และมุมออลติจูด (มีค่า $90 - \theta_z$) (องศา) ตามลำดับ โดย δ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (5) [13]



ภาพที่ 2 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับและระนาบเอียง [14]

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \left(\frac{284 + d_n}{365} \right) \right] \quad (5)$$

เมื่อ d_n คือ จำนวนวันในรอบปีที่พิจารณา (เดือนกุมภาพันธ์พิจารณาว่ามี 28 วัน) (วัน)

การพิจารณา γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างทิศใต้กับทิศการหันหน้ารับรังสีอาทิตย์ซึ่งมีค่าระหว่าง 0-180 องศา (มีค่า 0 และ 180 เมื่อหันไปทางทิศใต้และทิศเหนือ ตามลำดับ และมีค่าเป็นบวกและลบเมื่อหันไปทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก

ตามลำดับ) [11] นอกจากนี้ ω จะแปรตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (15 องศา/ชั่วโมง) มีค่าเป็นบวกและลบก่อนและหลังเวลา 12:00 น. ตามลำดับ (เวลา 12:00 น.

(W มีค่า 0 องศา) [11] ทั้งนี้อาคาร A มีพิกัดที่ตั้ง (Latitude) 16 องศา 12 ลิปดาเหนือ [15] โดยมีมุมเอียงของหลังคา 30 องศา และแผงเซลล์แสงอาทิตย์วางขนานกับหลังคาทุกทิศทาง นอกจากนี้ δ ใช้ค่าเฉลี่ยซึ่งพิจารณา d_n ทุกวันที่ 15 ของเดือน จากสมการ (1) พบว่า $G_{\beta\gamma}$ ประกอบด้วยรังสีตรงบนระนาบเอียง รังสีกระจายหรือสะท้อนจากพื้นผิวโลกบนระนาบเอียง และรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนระนาบเอียง โดยรังสีตรงบนระนาบเอียงพิจารณาในช่วง $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ซึ่ง θ ในช่วงดังกล่าวจะแสดงค่า $0 < \cos \theta \leq 1$ ทั้งนี้ $\cos \theta \leq 0$ แสดงให้เห็นว่าดวงอาทิตย์อยู่หลังหรือตั้งฉากกับผิวรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวจะไม่พิจารณา

รังสีตรงบนระนาบเอียง นอกจากนี้รังสีกระจายหรือสะท้อนจากพื้นผิวโลกบนระนาบเอียง และรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนระนาบเอียงพิจารณาในกรณีพื้นผิวโลกไม่สม่ำเสมอซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นกับทิศทาง (Anisotropic Model) [14]

3. ประเมินกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าโดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการวิจัยคือชนิดผลึกเดี่ยว (Mono-Si) รุ่น SW 285-300 MONO (5-busbar) เนื่องจากมีค่าการตอบสนองเชิงแสงในช่วงความยาวคลื่นกว้าง จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูง [16] โดยคุณสมบัติพื้นฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะ Standard Test Conditions (STC) [17]

Property of module	Value	Property of module	Value
Maximum Power: P_{MPP} (W)	300.00	Temp. Coefficient of V_{oc} : $\alpha_{V_{oc}}$ (%/°C)	-0.30
Open Circuit Voltage: V_{oc} (V)	40.10	Temp. Coefficient of I_{sc} : $\alpha_{I_{sc}}$ (%/°C)	0.04
Maximum Voltage: V_{MPP} (V)	31.60	NOCT (°C)	46.00
Short Circuit Current: I_{sc} (A)	10.23	Length (m)	1.68
Maximum Current: I_{MPP} (A)	9.57	Width (m)	1.00

การประเมินกำลังไฟฟ้าใช้ข้อมูลจาก 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ข้อมูลรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือนย้อนหลัง 4 ปี (พ.ศ. 2550 - พ.ศ. 2553) ตั้งแต่เวลา 06:15 - 18:15 น. (ช่วงเวลาที่แดดเฉลี่ยตลอดทั้งปี) จากสถานีตรวจวัดรังสีอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม [18] และส่วนที่ 2 ข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายเดือนย้อนหลัง 1 ปี (พ.ศ. 2560) ตั้งแต่เวลา 06:15 - 18:15 น. จากข้อมูลเฉลี่ย 4 สถานีตรวจวัดสภาพอากาศ ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาขอนแก่น (กลุ่มงานอากาศเกษตรท่าพระ) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน จ.ขอนแก่น สถานีอุตุนิยมวิทยาร้อยเอ็ด (กลุ่มงานอากาศเกษตร)

และสถานีอุตุนิยมวิทยาร้อยเอ็ด จ.ร้อยเอ็ด [19] ซึ่งอุณหภูมิจากสถานีดังกล่าวจะแสดงค่าการตรวจวัดตามระบบเวลา UTC/GMT ณ เมืองกรีนิช (Greenwich) ประเทศอังกฤษ ดังนั้นเพื่อใช้ข้อมูลในการวิจัยต้องแปลงระบบเวลา UTC/GMT เป็นเวลา Time Zone โดยใช้ลองจิจูด (Longitude) ของประเทศไทย (ค่าเฉลี่ย 105 องศาเหนือ [15]) ดังนั้นจากข้อมูลทั้ง 2 ส่วน สามารถคำนวณแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะรังสีอาทิตย์อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์ใดๆ ดังสมการ (6) และสมการ (7) [20]

$$V_{MPP} = V_{MPP,ref} \frac{\ln(G_{\beta\gamma})}{\ln(G_{ref})} [1 + \alpha_{V_{oc}} (T_c - T_{c,ref})] \quad (6)$$

$$I_{MPP} = I_{MPP,ref} \frac{G_{\beta\gamma}}{G_{ref}} [1 + \alpha_{I_{sc}} (T_c - T_{c,ref})] \quad (7)$$

เมื่อ $\alpha_{V_{oc}}$ และ $\alpha_{I_{sc}}$ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันและกระแสไฟฟ้าไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์/องศาเซลเซียส) ตามลำดับ T_c คือ อุณหภูมิทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะใช้งานจริง (องศาเซลเซียส) $V_{MPP,ref}$ $I_{MPP,ref}$ G_{ref} และ $T_{c,ref}$ คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (แอมแปร์) รังสีอาทิตย์ (วัตต์/ตารางเมตร) และอุณหภูมิทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (องศาเซลเซียส) ณ STC ตามลำดับ ($G_{ref} = 1,000$ วัตต์/ตารางเมตร $T_{c,ref} = 25$ องศาเซลเซียส และ Air Mass (AM) = 1.5 [21]) โดย T_c สามารถคำนวณได้ดังสมการ (8) [22]

$$T_c = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) G_{\beta\gamma} \quad (8)$$

เมื่อ T_{amb} และ $NOCT$ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ Nominal Operating Cell Temperature (องศาเซลเซียส) ตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และทิศทางารับรังสีอาทิตย์ใดๆ ที่สอดคล้องกับสมการ (6) และสมการ (7) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (9) และสมการ (10) [21]

$$P_{MPP,installed} = I_{MPP} V_{MPP} \quad (9)$$

$$E = P_{MPP,installed} t / 1,000 \quad (10)$$

เมื่อ $P_{MPP,installed}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์) E คือ พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง) t คือ เวลา (ชั่วโมง)

4. ประเมินพลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการผลิต (Array Yield: Y_a) โดยอ้างอิงจาก International Energy Agency [23] สามารถคำนวณได้ดังสมการ (11)

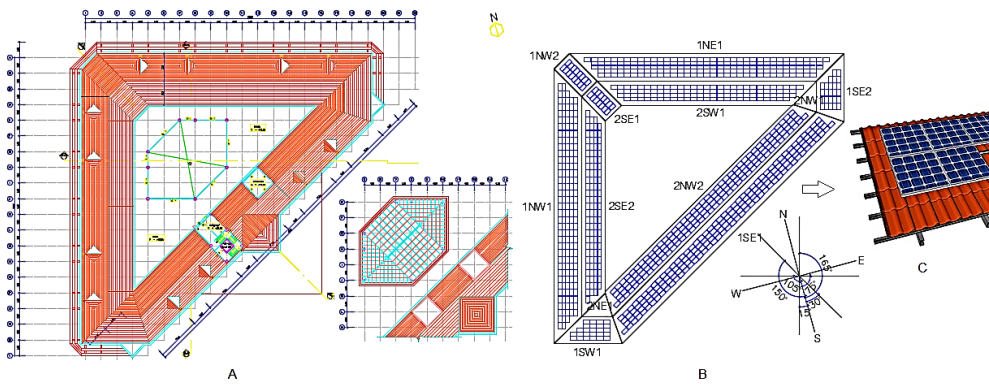
$$Y_a = E / P_{installat\o n} \quad (11)$$

การแสดงผลการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว จะแสดงผลโดยใช้ GIS ซึ่งระบุช่วงศักยภาพสูงสุด-ต่ำสุดของ Y_a ด้วยระดับแถบสี

ผลการวิจัย

1. ผลการประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่ โดยใช้แบบพิมพ์เขียวอาคารร่วมกับแบบอาคารที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AutoCAD (แสดงดังภาพที่ 3 (A)) พบว่าอาคาร A มีพื้นที่หลังคา รวม 2,744 ตารางเมตร สามารถจำแนกทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคาโดยใช้มุมอะซิมุทพื้นดิน (γ) ได้ 6 ทิศทาง ได้แก่ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือเอียงทำมุม 165 องศา กับทิศใต้ (165) แทนด้วย NE1 ทิศตะวันออกเฉียงใต้เอียงทำมุม 30 และ 75 องศา กับทิศใต้

(30 และ 75) แทนด้วย SE1 และ SE2 ตามลำดับ ทิศตะวันตกเฉียงใต้เอียงทำมุม 15 องศา กับทิศใต้ (-15) แทนด้วย SW1 และทิศตะวันตกเฉียงเหนือเอียงทำมุม 105 และ 150 องศา กับทิศใต้ (-105 และ -150) แทนด้วย NW1 และ NW2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 3 (B) และการออกแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 3 (C) นอกจากนี้ผลการประเมินจำนวนแผงและกำลังไฟฟ้าติดตั้งพบว่าสามารถติดตั้งได้ จำนวน 972 แผง มีกำลังไฟฟ้าติดตั้งรวม 291.6 กิโลวัตต์ แสดงดังตารางที่ 2



ภาพที่ 3 การประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่โดย (A) การวิเคราะห์แบบอาคารด้วยโปรแกรม AutoCAD (B) การจำแนกทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคา และ (C) การออกแบบการติดตั้ง

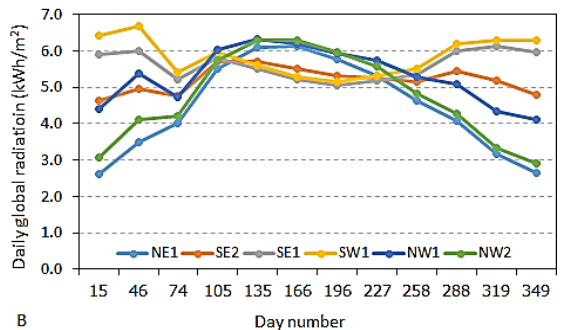
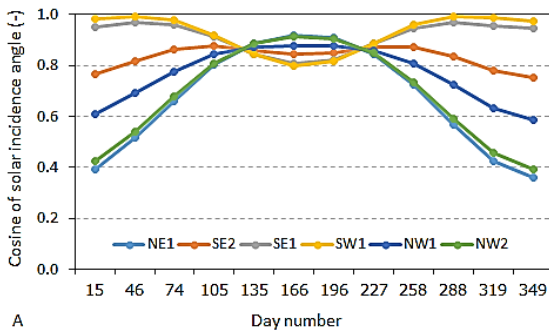
ตารางที่ 2 การประเมินศักยภาพพื้นที่หลังคาและกำลังผลิตติดตั้ง

List	Direction												Total
	1NE1	2NE1	1SE1	2SE1	1SW1	2SW1	1NW1	2NW1	1NW2	2NW2			
A_{total} (m^2)	441	24	89	307	507	49	89	307	441	24	56	410	2,744
γ (degree)	165	165	75	75	30	30	-15	-15	-105	-105	-150	-150	-
N (panel)	173	0	25	108	174	14	25	108	173	0	14	158	972
$P_{installation}$ (kW)	51.9	0	7.5	32.4	52.2	4.2	7.5	32.4	51.9	0	4.2	47.4	291.6

หมายเหตุ: 0 หมายถึง ไม่มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2. ผลการประเมินศักยภาพพลังงานรังสีอาทิตย์ โดยประเมินจากรังสีรวมบนระนาบในแนวระดับ (รังสีตรงและรังสีกระจายจากท้องฟ้า) เป็นรังสีรวมบนระนาบเอียง (รังสีตรง รังสีกระจายหรือสะท้อนจากพื้นผิวโลก และรังสีกระจายจากท้องฟ้า) ตามสมการ (1) โดยมุมตกกระทบของรังสีตรงในแต่ละทิศทางแสดงดังภาพที่ 4 (A) ซึ่งแสดง $\cos \theta$ เวลา 12:00 น. พบว่า $\cos \theta$ มีค่าสูงสุดและต่ำสุดเมื่อ θ มีค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่า $\cos \theta \propto 1/\theta$ นอกจากนี้ภาพที่ 4 (A) ยังแสดงให้เห็นว่าทิศทางรับรังสี

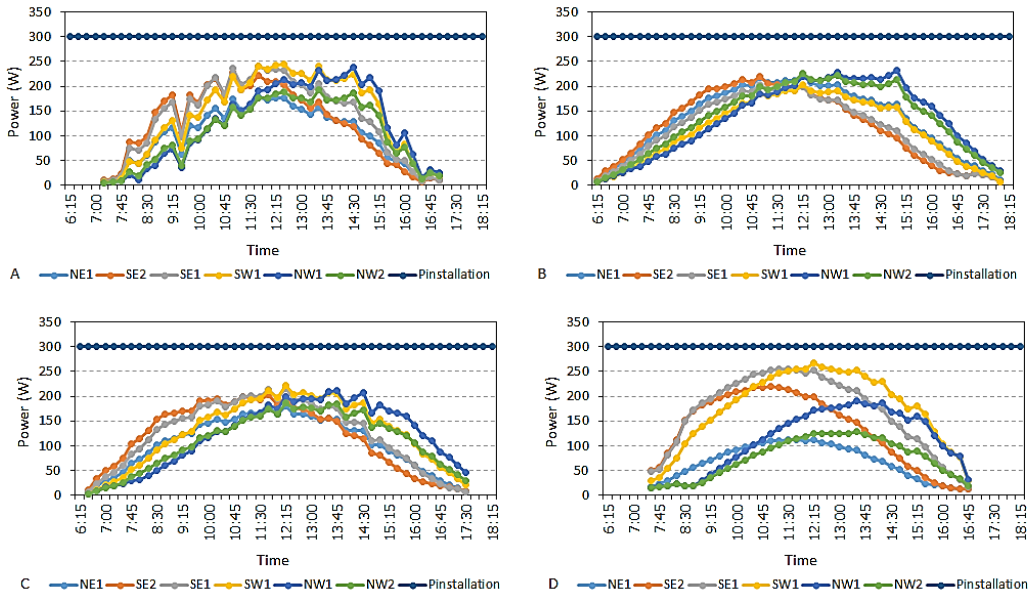
อาทิตย์ทางทิศเหนือ (γ สูง) จะให้ค่า $\cos \theta$ สูงในช่วงเดือนมิถุนายน ซึ่งทำให้ได้รับรังสีตรงสูงสุดในรอบปี และมีค่าลดลงก่อนและหลังเดือนมิถุนายน ซึ่งตรงข้ามกับทิศทางรับรังสีอาทิตย์ทางทิศใต้ (γ ต่ำ) จะให้ค่า $\cos \theta$ สูงสุดตลอดทั้งปี ยกเว้นช่วงเดือนดังกล่าว ซึ่งมุมตกกระทบของรังสีตรงในแต่ละทิศทางส่งผลกระทบต่อรังรวมที่ได้รับ โดยรังสีรวมบนระนาบเอียงมีค่าสูงสุดเฉลี่ยในทิศ SW1 SE1 NW1 SE2 NW2 และ NE1 มีค่า 5.84 5.61 5.30 5.19 4.72 และ 4.45 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตารางเมตร-วัน ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4 (B)



ภาพที่ 4 (A) $\cos \theta$ เวลา 12:00 น. และ (B) รังสีรวมบนระนาบเอียง

3. ผลการประเมินกำลังไฟฟ้า โดยประเมินจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 1 แผง (ขนาด 300 วัตต์/แผง) ซึ่งใช้ข้อมูลจาก 2 ส่วน ได้แก่ รังสีอาทิตย์บนระนาบเอียง (ตามสมการ (1)) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมถูกแปลงจากระบบเวลา UTC/GMT เป็นเวลา Time Zone ของประเทศไทย คือ UTC/GMT+7

(105 องศา / 15 องศา/ชั่วโมง) ดังนั้นผลจากข้อมูลทั้ง 2 ส่วน ซึ่งใช้ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ใดๆ สามารถอธิบายได้ว่า $P = P(G_{\beta\gamma}, T_c)$ และ $T_c = T_c(G_{\beta\gamma}, T_{amb})$ โดยผลการประเมินแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กำลังไฟฟ้าทุกวันที่ 15 ของเดือน (A) มีนาคม (B) มิถุนายน (C) กันยายน และ (D) ธันวาคม

จากภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างการประเมินกำลังไฟฟ้ายรายเดือนทุกวันที่ 15 ของเดือน ได้แก่ (A) มีนาคม (B) มิถุนายน (C) กันยายน และ (D) ธันวาคม ผลการประเมินพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในเวลาที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดตลอดทั้งปี ในทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ทางทิศใต้ (γ ต่ำ) ยกเว้นช่วงเดือนมิถุนายน โดยช่วงเดือนดังกล่าวจะผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดในทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ทางทิศเหนือ (γ สูง) เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบระนาบเอียงข้างต้น

ผลการประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดทั้งปีจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน N แผง ในสภาวะรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ใดๆ พบว่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้มีค่า 474.20 เมกะวัตต์

ชั่วโมง/ปี (แสดงดังตารางที่ 3) และในแต่ละทิศทางมีค่าแตกต่างกันโดยสามารถอธิบายได้ 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดทั้งปีในแต่ละทิศทางภายใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน N แผง พบว่ามีค่าสูงสุดในทิศทางรับรังสีอาทิตย์ทางทิศ 1SE1 (เซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 174 แผง) มีค่า 93.04 เมกะวัตต์ชั่วโมง

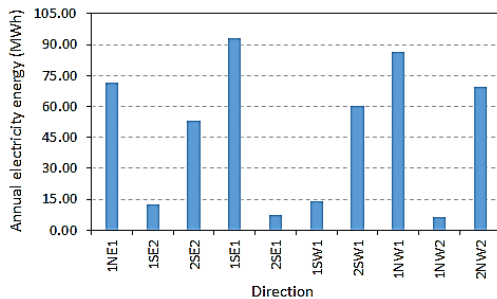
กรณีที่ 2 พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดทั้งปีในแต่ละทิศทางภายใต้จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากัน พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 14 แผง ในทิศ 2SE1 และ 1NW2 จำนวน 25 แผง ในทิศ 1SE2 และ 1SW1 และจำนวน 108 แผง ในทิศ 2SE2 และ 2SW1 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมสูงสุดในทิศ 2SE1 1SW1 และ 2SW1 มีค่า 7.49 13.94 และ 60.21 เมกะวัตต์ชั่วโมงตามลำดับ

ตารางที่ 3 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า (MWh)

Month	Direction										Total
	1NE1	1SE2	2SE2	1SE1	2SE1	1SW1	2SW1	1NW1	1NW2	2NW2	
Jan	3.44	0.94	4.07	8.51	0.68	1.34	5.78	6.16	0.33	3.76	35.01
Feb	4.24	0.91	3.93	7.74	0.62	1.25	5.39	6.85	0.41	4.65	35.98
Mar	5.43	0.95	4.12	7.32	0.59	1.09	4.73	6.56	0.46	5.25	36.51
Apr	7.38	1.11	4.80	7.88	0.63	1.17	5.04	8.15	0.62	7.04	43.82
May	8.46	1.15	4.95	7.65	0.62	1.12	4.84	8.81	0.71	8.00	46.31
Jun	8.26	1.06	4.59	6.95	0.56	1.01	4.38	8.31	0.69	7.74	43.55
Jul	8.02	1.06	4.56	6.98	0.56	1.02	4.41	8.25	0.67	7.58	43.11
Aug	7.31	1.05	4.52	7.17	0.58	1.06	4.56	7.96	0.62	7.00	41.82
Sep	6.09	1.00	4.31	7.24	0.58	1.07	4.63	7.06	0.52	5.84	38.33
Oct	5.49	1.10	4.75	8.52	0.69	1.26	5.44	7.03	0.47	5.30	40.05
Nov	4.04	1.02	4.39	8.47	0.68	1.25	5.39	5.78	0.35	3.91	35.28
Dec	3.45	0.98	4.24	8.62	0.69	1.30	5.63	5.68	0.31	3.52	34.43
Total	71.61	12.32	53.22	93.04	7.49	13.94	60.21	86.62	6.17	69.59	474.20

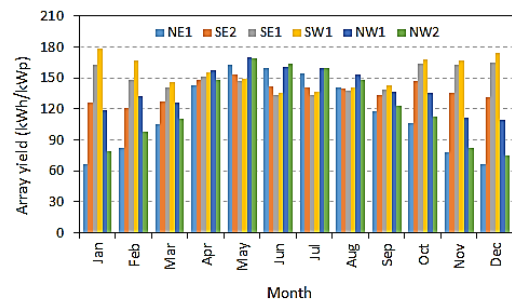
4. ผลการประเมินพลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการผลิตตั้ง (Y_a) โดยพิจารณา Y_a รายเดือนในแต่ละทิศทางตลอดทั้งปีแสดงดังภาพที่ 7 พบว่า Y_a มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งปีซึ่งมีค่าสูงสุดในทิศทางรับรังสีอาทิตย์ทางทิศใต้

ยกเว้นช่วงเดือนมิถุนายน โดยช่วงเดือนดังกล่าวจะมีค่าสูงสุดในทิศทางรับรังสีอาทิตย์ทางทิศเหนือเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบระนาบเอียง รวมทั้งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้



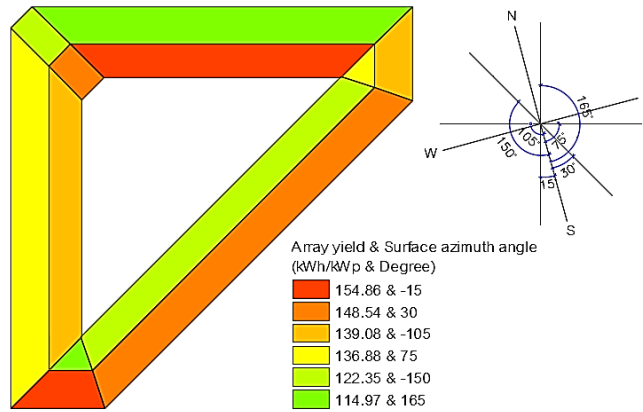
ภาพที่ 6 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า

ผลการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ GIS ที่ระบุด้วยแถบสีแสดงช่วงศักยภาพสูงสุด-ต่ำสุด แสดงดังภาพที่ 8 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของ Y_a ในแต่ละทิศทางตลอดทั้งปี โดยแบ่งระดับจากค่าสูง-ต่ำ ซึ่งระบุด้วยแถบสีแดง-เขียว ตามลำดับ พบว่าแต่ละทิศทาง



ภาพที่ 7 พลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการผลิตตั้ง (Y_a)

ให้ค่า Y_a ที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ โดยมีค่าสูงสุดในทิศ SW1 SE1 NW1 SE2 NW2 และ NE1 มีค่า 154.86 148.54 139.08 136.88 122.35 และ 114.97 กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลวัตต์ติดตั้ง ตามลำดับ



ภาพที่ 8 ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดทั้งปีในแต่ละทิศทาง

สรุปและอภิปรายผล

การประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาภายใต้เงื่อนไขทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และประมวลผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งใช้อาคารสำนักวิทยบริการ (อาคาร A) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เขตพื้นที่ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม เป็นกรณีศึกษา พบว่าอาคารดังกล่าวสามารถจำแนกทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์ตามทิศทางของหลังคาโดยใช้ γ ได้ 6 ทิศทาง โดยแต่ละทิศทางมีผลต่อรังสีอาทิตย์ที่ได้รับ ซึ่งรังสีอาทิตย์ที่ได้รับทางทิศเหนือ (γ สูง) มีค่าสูงในช่วงเดือนมิถุนายนเท่านั้น ในขณะที่รังสีอาทิตย์ที่ได้รับทางทิศใต้ (γ ต่ำ) มีค่าสูงตลอดทั้งปียกเว้นช่วงเดือนดังกล่าว (เหตุการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจากการเอียงของแกนโลกและการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรี) นอกจากนี้ผลการประเมินพลังงานไฟฟ้าต่อกำลังการติดตั้ง (Y_p) พบว่ามีค่าสูงสุดในทิศ SW1 SE1 NW1 SE2 NW2 และ NE1 มีค่า 154.86 148.54 139.08 136.88 122.35 และ 114.97 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/กิโลวัตต์ ติดตั้ง ตามลำดับ ดังนั้นทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์จึงส่งผลโดยตรง

ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า $E = E(G_{\beta\gamma}, T_{abm})$ ด้วยเหตุนี้เพื่อให้ได้รับรังสีรวมสูงสุดตลอดทั้งปี งานด้านรังสีอาทิตย์จึงหันหน้ารับรังสีอาทิตย์ไปทางทิศใต้ ถึงแม้ทิศทางดังกล่าวไม่สามารถรับรังสีรวมได้สูงสุดตลอดทุกเดือน แต่สามารถรับรังสีรวมได้สูงสุดตลอดทั้งปี แต่ด้วยข้อจำกัดของหลังคาที่ไม่สามารถเปลี่ยนทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์ได้ การประเมินทิศทาง การรับรังสีอาทิตย์เพื่อประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะติดตั้งใช้งานจริงจึงมีความสำคัญที่ต้องพิจารณา ดังนั้นการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา นอกจากจะพิจารณาพื้นที่หลังคาเพื่อประเมินจำนวนแผง กำลังไฟฟ้าติดตั้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ยังต้องพิจารณาปัจจัยการออกแบบอีกหลายด้านร่วมกัน โดยต้องคำนึงถึงข้อมูลด้านเทคนิคและความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เช่น น้ำหนักแผง ความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างหลังคา อุปกรณ์ยึดจับแผง ค่าเสื่อมสภาพของแผงตลอดอายุการใช้งาน รวมทั้งมุมเอียงและทิศทางของหลังคาที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ นอกจากนี้เพื่อให้การประเมินมีความละเอียดสูงควรพิจารณา d_n ในแต่ละวันตลอดทั้งปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2018). *Alternative Energy Development Plan: AEDP2015*. Bangkok: Ministry of Energy.
- [2] International Energy Agency. (2017). *Annual Report 2016*. France: IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS).
- [3] Natthapong Suwanasang; and Sopitsuda Tongsoptit. (2015). An Assessment of the Technical and Economic Potential of Rooftop Solar Systems on Chulalongkorn University's Buildings. *Journal of Energy Research*. 12(2): 59-74.
- [4] Perawut Chinnavornrungrsee.; et al. (2015). Evaluation of Rooftop Solar PV Performance of Different PV Module Technologies Operating in Thailand. *Ladkrabang Engineering Journal*. 32(2): 19-24.
- [5] Nipon Ketjoy; and Kongrit Mansiri. (2010). Technical Performance Study of 6.52 kW Photovoltaic Grid Connected System. *Naresuan University Journal*. 18(3): 27-35.
- [6] Emmanuel Kymakis.; et al. (2009). Performance Analysis of a Grid Connected Photovoltaic Park on the Island of Crete. *Energy Conversion and Management*. 50(3): 433-438.
- [7] Bakirci Kadir. (2012). General Models for Optimum Tilt Angles of Solar Panels: Turkey Case Study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(8): 6149-6159.
- [8] Basharat Jamil.; et al. (2016). Estimation of Solar Radiation and Optimum Tilt Angles for South-Facing Surfaces in Humid Subtropical Climatic Region of India. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 19(4): 1826-1835.
- [9] Taehoon Hong.; et al. (2014). A GIS (Geographic Information System)-Based Optimization Model for Estimating the Electricity Generation of the Rooftop PV (Photovoltaic) System. *Energy*. 65: 190-199.
- [10] T. Santos.; et al. (2014). Applications of Solar Mapping in the Urban Environment. *Applied Geography*. 51: 48-57.
- [11] Muhammad Iqbal. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. New York: Academic Press.
- [12] Muneer; and Saluja. (1985). A Brief Review of Models for Computing Solar Radiation on Incline Surfaces. *Energy Conversion and Management*. 25(4): 443-458.
- [13] P.I. Cooper. (1969). The Absorption of Solar Radiation in Solar Still. *Solar Energy*. 12(3): 333-346.
- [14] Serm Janjai. (2017). *Solar Radiation*. 2nd ed. Nakornpathom: Phetkasem Printing Group.
- [15] Map of World. (2017). *Thailand Latitude and Longitude Map*. Retrieved December 13, 2017, from http://www.mapsofworld.com/lat_long/thailand-lat-long.html
- [16] B. Minnaert; and P. Veelaert. (2014). A Proposal for Typical Artificial Light Sources for the Characterization of Indoor Photovoltaic Applications. *Energies*. 7(3): 1500-1516.
- [17] Eco Direct. (2017). *300 Watt Mono Solar Panel*. Retrieved December 13, 2017, from <https://www.ecodirect.com/SolarWorld-SW300-Plus-Mono-5BB-300W-Mono-Panel-p/solarworld-sw300-plus-mono-5bb.htm>

- [18] Wutthisat Chokkuea. (2013). *Parabolic Trough Solar Thermal Electric Power Plant for House*. Doctor of Philosophy, Ph.D. (Mechanical Engineering). Mahasarakham: Graduate School Mahasarakham University.
- [19] Thai Meteorological Department (TMD). (2018). *Weather Classified by City*. Retrieved December 13, 2017, from <http://www.aws-observation.tmd.go.th>
- [20] Volker Quaschnig. (2005). *Understanding Renewable Energy Systems*. London: Earthscan.
- [21] Antonio Luque; and Steven Hegedus. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- [22] R.G. Ross; and M.I. Smokre. (1986). *Flat-Plate Solar Array Project: Final Report, Volume VI: Engineering Sciences and Reliability*. USA: Jet Propulsion Laboratory.
- [23] International Energy Agency. (2001). *Operational Performance, Reliability and Promotion of Photovoltaic Systems*. Germany: IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS).