

การวิเคราะห์เชิงพื้นที่เพื่อประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับครัวเรือนด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Geospatial analysis to estimate the solar energy in household scale by geographic information systems

จิรวัดน์ จันทองพูน^{1*}, พรนรายณ์ บุญราศรี¹, รจนา คุณพูล¹, ศิริวัฒน์ จงหวัง¹, ณ์ฐพงษ์ อรุณวงศ์¹ และ วัชรารภรณ์ แซงอิน¹

Jirawat Jantongpoon^{1*}, Pornarai Boonrasi¹, Rodjana Khoonpoon¹, Siritwat Jongwang¹, Natapong Arunvong¹ and Watcharaporn Sengain¹

Received: 13 February 2024 ; Revised: 18 March 2024 ; Accepted: 30 April 2024

บทคัดย่อ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดที่สามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่จำกัด และไม่ก่อให้เกิดมลพิษหรือส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข สำหรับการสร้างแผนที่พื้นที่มีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์ระดับครัวเรือนทำการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และ 2) ทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบ่งพื้นที่มีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์ออกเป็น 4 ระดับ คือ พื้นที่มีศักยภาพสูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมากไม่เหมาะแก่การติดตั้ง ผลจากการศึกษาพบว่าพื้นที่ที่มีค่าศักยภาพสูงในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ คือพื้นที่ที่สามารถรับแสงได้ตลอดช่วงเวลาที่เกิดแสงซึ่งมีความเข้มรังสีเฉลี่ยมากกว่า 5.28 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งได้แก่ บริเวณพื้นที่โล่งและหลังคา

คำสำคัญ: รังสีดวงอาทิตย์, พลังงานแสงอาทิตย์, อากาศยานไร้คนขับ, แบบจำลองความสูงเชิงเลข

Abstract

Solar energy is a clean, unlimited energy source that can be utilized without causing pollution or environmental harm. This study aimed to: 1) apply imagery from Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to create a Digital Surface Model (DSM) for generating a map of solar radiation potential areas at the household scale, and to analyze solar radiation using Geographic Information Systems (GIS); and 2) analyze the suitability of solar cell installation. The solar radiation potential areas were categorized into four levels: high, medium, low, and very low, with the very low level deemed unsuitable for installation. The study found that high-potential areas for solar cell installation are those that receive sunlight throughout the day, with an average radiation intensity greater than 5.28 kWh/m²/day, including open spaces and roofs.

Keywords: Solar radiation, Solar energy, Unmanned aerial vehicle, Digital elevation model

¹ หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา

¹ Survey Engineering Program, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla Province.

* Corresponding author; E-mail address: jirawat.j@rmutsv.ac.th

บทนำ

โดยรวมของประเทศไทยมีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีตามการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ โดยแหล่งพลังงานส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศและเสียค่าใช้จ่ายในการนำเข้าพลังงานประมาณปีละ 8 แสนล้านบาท (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2559) และการใช้พลังงานดังกล่าวยังก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศที่สำคัญ ได้แก่ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และฝุ่นละอองต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อนส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน และมีผลต่อความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ โดยมีการจัดตั้งโครงการการสนับสนุนจากหน่วยงานรัฐให้มีการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในครัวเรือน

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อช่วยลดการสูญเสียไฟฟ้าในระบบจำหน่ายได้ และเป็นการทำให้ประชาชนส่วนใหญ่ของประเทศมีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่มีความสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และสามารถพึ่งพาตนเองได้ ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 ถึง พ.ศ. 2580 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) ที่มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนในรูปของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ จังหวัดสงขลา เป็นจังหวัดที่อุดมสมบูรณ์ด้วยทรัพยากรที่ค่อนข้างหลากหลาย เป็นเมืองเศรษฐกิจสำคัญของภาคใต้ มีพื้นที่ทำการเกษตร 4,956.90 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 67.03 จากพื้นที่ทั้งหมด เป็นพื้นที่ปลูกพืชผัก 5.06 ตารางกิโลเมตร เนื่องด้วยพื้นที่บ้านท่าเมรุ ตำบลบางกล้า อำเภอบางกล้า จังหวัดสงขลา เป็นพื้นที่อยู่ติดกับทะเลสาบสงขลาทำให้สภาพของน้ำมีความเค็มเกินไปไม่สามารถนำมาใช้ในการเกษตรได้จากปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องสูบน้ำไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำบาดาลมาใช้ในการเกษตร ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสินค้าเกษตรสูงเป็นอย่างมาก เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานทดแทน โดยการนำเทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ (Mihăilescu *et al.*, 2019) เพื่อสำหรับการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการเกษตรกรรมรายแปลง (ไฟฟ้าสำหรับเครื่องสูบน้ำเพื่อการเกษตร) หรือส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในระดับครัวเรือนมากยิ่งขึ้น

การผลิตไฟฟ้าด้วยการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์นั้นองค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาพื้นที่ในการติดตั้งซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้มากหรือน้อย คือ ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ต่อพื้นที่ ในการจัดหาพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ บริเวณพื้นที่

เกษตรกรรม ภายในพื้นที่บ้านท่าเมรุ ตำบลบางกล้า อำเภอบางกล้า จังหวัดสงขลา เพื่อเป็นพื้นที่ต้นแบบในการศึกษาโดยการนำอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) เข้ามาช่วยในการเก็บข้อมูลภาคสนาม ข้อมูลความสูงภูมิประเทศ (Digital Elevation Model, DEM) สำหรับการสร้างแผนที่พื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่การศึกษา โดยแบ่งพื้นที่ตัวอย่างเป็น 2 พื้นที่ ทั้งสองพื้นที่มีลักษณะคล้ายกัน จะประกอบด้วยพื้นที่โล่ง แปลงการเกษตร และพื้นที่แหล่งน้ำ เพื่อคำนวณปริมาณพลังงานต่อพื้นที่รับรังสีของดวงอาทิตย์ (Area Solar Radiation) ด้วยการวิเคราะห์เชิงพื้นที่จากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

คำนวณปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ และสร้างแผนที่พื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับครัวเรือนด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อประเมินพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมต่อการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

- 1) กำหนดขอบเขตบริเวณพื้นที่ศึกษาโดยแบ่งเป็น 2 พื้นที่การศึกษา ตั้งอยู่ที่บ้านท่าเมรุ ตำบลบางกล้า อำเภอบางกล้า จังหวัดสงขลา โดยพื้นที่ศึกษาที่ 1 มีเนื้อที่ 31 ไร่ 3 งาน 50 ตารางวา มีขอบเขตทิศเหนือและทิศตะวันออกติดสวนยางพารา ทิศใต้ติดกับคลองเกาะน้ำรอบ และทิศตะวันตกติดกับคลองภูมินาดาริสายที่ 1 พื้นที่ศึกษาที่ 2 มีเนื้อที่ 53 ไร่ 0 งาน 50 ตารางวา มีขอบเขตทิศเหนือติดกับพื้นที่ชุ่มน้ำและสวนปาล์มน้ำมัน ทิศใต้ติดกับพื้นที่ชุมชน ทิศตะวันออกติดกับพื้นที่ชุ่มน้ำ และทิศตะวันตกติดกับถนนบ้านท่าเมรุ-ควนเนียง ดัง Figure 1 และใช้ข้อมูลภาพถ่ายเทียมเพื่อทำการวางแผนการบิน และวางแผนดำเนินงาน



Figure 1 Study area

2) การสำรวจพื้นที่ศึกษา เพื่อทำการวางแผนการ สร้างจุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 5 จุด โดยเลือกเป็นพื้นที่ โลง ซึ่งอากาศยานไร้คนขับจะต้องมองเห็นจุดดังกล่าวขณะบิน ถ่ายภาพ และการรับวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ซึ่งทำการรับวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (Network Base RTK) ใช้หลักการ VRS (Virtual Reference Station) รับวัดค่าพิกัด จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 5 จุดภายในพื้นที่ศึกษา

3) การรับวัดภาพถ่ายทางอากาศ โดยเก็บข้อมูลด้วย อากาศยานไร้คนขับรุ่น Phantom 4 Pro ที่มี กล้องดิจิทัล ความละเอียด 20 ล้านจุดภาพพร้อม Sensor ขนาด 1 นิ้ว ซึ่งจัดอยู่ในประเภท Professional Grade และใช้รูปแบบการ บินแบบ Grid ที่ให้ความละเอียดถูกต้องสำหรับการจัดสร้าง

แบบจำลอง DSM ที่ดีกว่ารูปแบบการบินแบบทั่วไป โดย บริเวณพื้นที่ศึกษามีต้นไม้สูงโดยประมาณ 30 ถึง 40 เมตร จึง เลือกใช้ความสูงบินอยู่ที่ 70 เมตร เหนือระดับทะเลปานกลาง การกำหนดส่วนซ้อนด้านหน้าและส่วนซ้อนด้านข้าง คือ ร้อยละ 80 และร้อยละ 70 ตามลำดับ ทั้งสองพื้นที่ศึกษา ทำการบินถ่ายเมื่อวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2566 ในพื้นที่ศึกษาที่ 1 และเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ในพื้นที่ศึกษาที่ 2 โดยมีรายละเอียดตามมาตรฐานการบินของคณะอนุกรรมการ มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนเพื่องานวิศวกรรม (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565) ดัง Table 1

Table 1 UAV photogrammetry specifics

| Details of Aerial Photography Survey | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|--------|-------------|--------|
| Order | Details | Area 1 | Area 2 | Unit |
| 1 | Covered area | 68,172 | 35,908 | sq. m. |
| 2 | Duration of flights | 21 | 13 | min. |
| 3 | Flight height | 70.00 | 70.00 | m. |
| 4 | Overlap | 80 | 80 | % |
| 5 | Sidelap | 70 | 70 | % |
| 6 | Flight pattern | | Grid | |
| 7 | GCP | 5 | 5 | point |
| 8 | Aircraft type | | Multi-rotor | |

4) การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยโปรแกรม Pix4Dmapper โดยข้อมูลที่ประมวลผลได้ในภายหลังการปรับ แก่ทางโฟโตแกรมเมตรีจะได้ข้อมูลกลุ่มจุดความสูงสามมิติ (Point cloud) หลังจากนั้นใช้ข้อมูลกลุ่มจุดความสูงสามมิติ เพื่อสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า (Triangular irregular network, TIN) และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบราสเตอร์ เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Surface Model, DSM) ในพื้นที่ศึกษา

5) การวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์ จากข้อมูลแบบ จำลองพื้นผิวเชิงเลข (DSM) ในการวิเคราะห์ต้องประมวลผล การแผ่รังสีทั้งหมด (Global I_{tot}) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และผลรวมการแผ่รังสีรูปแบบโดยตรง (Dir I_{tot}) สามารถคำนวณ

ได้จากสมการที่ 2 และรูปแบบกระจาย (Dif I_{tot}) สามารถคำนวณ ได้จากสมการที่ 3 ผ่านการประมวลผลด้วยโปรแกรมระบบ สารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยการสร้างแบบจำลองรังสีดวงอาทิตย์ (Modeling solar radiation) จะประกอบด้วยขั้นตอนย่อย เป็น 4 กระบวนการ คือ 1. การคำนวณมุมมองแบบครึ่งทรงกลม ที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ 2. การซ้อนทับของมุมมองบน แผนที่ดวงอาทิตย์ เพื่อประเมินรังสีแสงอาทิตย์ในรูปแบบ โดยตรง 3. การซ้อนทับของมุมมองภาพบนแผนที่ท้องฟ้า เพื่อประเมินการกระจายรังสีแสงอาทิตย์ 4. กระบวนการซ้ำ สำหรับทุกตำแหน่งที่น่าสนใจเพื่อสร้างแผนที่การแผ่รังสีดวง อาทิตย์ (Mihăilescu *et al.*, 2019) ดัง Figure 2

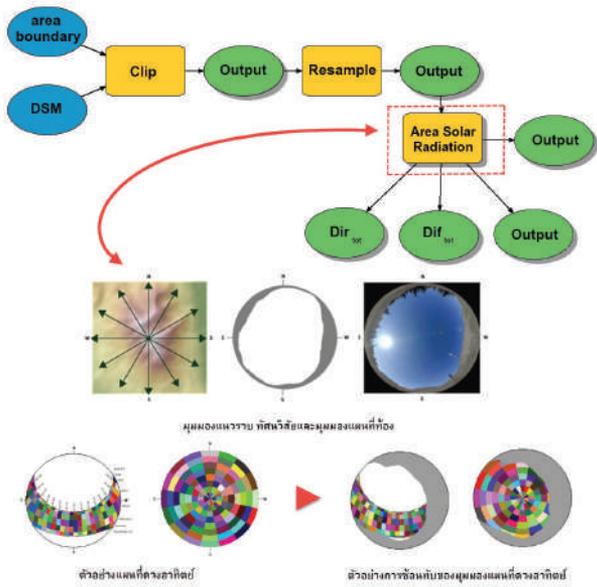


Figure 2 Methods for analyzing area solar radiation

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot} \quad (1)$$

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{q,a} \quad (2)$$

$$Dif_{tot} = \sum Dif_{q,a} \quad (3)$$

เมื่อ

$Global_{tot}$ คือ การแผ่รังสีทั้งหมด

Dir_{tot} คือ รังสีรูปแบบโดยตรง

Dif_{tot} คือ รังสีรูปแบบกระจาย

$\sum Dir_{q,a}$ คือ ผลรวมของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ในรูปแบบโดยตรงจากทุกส่วนของแผนที่แสงอาทิตย์

$\sum Dif_{q,a}$ คือ ผลรวมของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย จากภาคส่วนแผนที่ท้องฟ้า

จาก Figure 2 จะใช้ข้อมูลความสูงจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข โดยสร้างในรูปแบบ Mesh หรือโครงข่ายสามเหลี่ยม เพื่อทำการวิเคราะห์เชิงพื้นที่สำหรับการหาความลาดเอียงของพื้นที่ (aspect, topographic slope face) ที่จะบอกค่าน้ำหนักและมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ วิเคราะห์ร่วมกับวงโคจรของดวงอาทิตย์ และข้อมูลอื่นๆ ก็จะทำให้สามารถประมวลผลข้อมูล solar radiation ที่บอกปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้

6) การเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จาก DSM กับข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยที่ได้จากเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไฟล์จากสถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ศูนย์บริการวิชาการที่ 8 ตำบลคลองหลา อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา โดยเป็นข้อมูลเฉลี่ยย้อนหลัง 10 ปี พ.ศ. 2554 ถึง พ.ศ. 2563 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณค่าพลังงานแสงอาทิตย์จากแบบจำลอง DSM (Malgorzata, 2019)

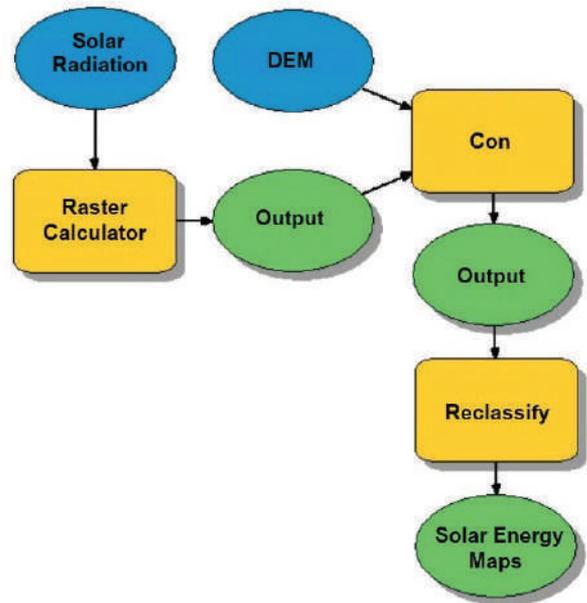


Figure 3 Methods for creating solar energy map

7) การวิเคราะห์เพื่อกำหนดพื้นที่เหมาะสมในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เกณฑ์การแบ่งพื้นที่ที่มีศักยภาพเพื่อการลงทุนผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทยกระทรวงพลังงาน เพื่อใช้สำหรับการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับครัวเรือน โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นที่ดัง Figure 3

จาก Figure 3 เป็นการวิเคราะห์เพื่อกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสมในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ จัดแบ่งพื้นที่ที่มีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์ ออกเป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงใน Table 2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) ตามเกณฑ์การแบ่งพื้นที่ที่มีศักยภาพเพื่อการลงทุนผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทยกระทรวงพลังงานผ่านเครื่องมือ Raster Calculator และกำหนดเงื่อนไขด้วยเครื่องมือ Con บนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Table 2 Criteria for dividing potential areas

| Average radiation intensity per day (kWh/m ² -day) | Potential areas |
|---|-----------------|
| More than 5.28 | High |
| 5.28 - 3.56 | Medium |
| 3.56 - 1 | Low |
| Less than 1 | Very Low |

8) การนำไปใช้ประโยชน์ โดยในที่นี้จะใช้สมการแนะนำที่มาจากบริษัทรับออกแบบระบบ ชื่อ SMA Solar Technology AG (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2559) ดังสมการที่ 4

$$P_{PV} = (E_a \times SF) / (E_{pv} \times n_{system}) \quad (4)$$

เมื่อ

P_{pv} คือ กำลังของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หน่วยกิโลวัตต์

E คือ ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย หน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน

SF คือ สัดส่วนการใช้พลังงานของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบรวม โดยมีค่าเท่ากับ 1 ในกรณีมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเดียว

n_{system} คือ ค่าประสิทธิภาพของระบบ โดยมีค่าเริ่มต้นที่ประมาณร้อยละ 70

E_{pv} คือ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์จำเพาะในแต่ละพื้นที่ หน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวันต่อกิโลวัตต์สูงสุด (kWh/a/kWp)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลจากการสร้างแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข

ในการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศด้วย UAV และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเพื่อสร้างภาพตัดแก้เชิงเลข โดยผลลัพธ์ของการประมวลผลภาพแสดงผลใน Table 3 และมีผลลัพธ์การประมวลผลแสดงใน Figure 4

Table 3 The GCP and GSD quality

| Areas | GCP | RMSE (m.) | | | GSD (cm.) |
|-------|-----|-----------|-------|-------|-----------|
| | | X | Y | Z | |
| 1 | 5 | 0.012 | 0.007 | 0.008 | 2.12 |
| 2 | 5 | 0.011 | 0.014 | 0.021 | 2.12 |

จากข้อมูลใน Table 3 พบว่า มีค่าความละเอียดของจุดภาพภาคพื้นดินเท่ากับ 2.12 ซม. และมีค่าความคลาดเคลื่อนของจุดภาพเท่ากับ 0.174 จุดภาพ ในส่วนของ

ค่าความคลาดเคลื่อนของจุดควบคุมภาคพื้นดิน (RMSE) นั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงพิกัดเฉลี่ยนั้นในแกน X Y และ Z เท่ากับ 0.012 ม. 0.007 ม. และ 0.008 ม. ตามลำดับสำหรับ

พื้นที่ศึกษาที่ 1 และค่าความละเอียดของจุดภาพภาคพื้นดินเท่ากับ 2.12 ซม. และมีค่าความคลาดเคลื่อนของจุดภาพเท่ากับ 0.164 จุดภาพ และมีค่าความคลาดเคลื่อนในแกน X Y และ Z เท่ากับ 0.011 ม. 0.014 ม. และ 0.021 ม. ตามลำดับ สำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 2 ค่าเกณฑ์การรังวัดภาพกำหนดให้

ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ไม่เกิน 7.5 ซม. และ GCP Error แนวราบไม่เกิน 3 ซม. และในแนวดิ่งไม่เกิน 5 ซม. ซึ่งค่าทั้งหมดที่ได้มาผ่านเกณฑ์มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ

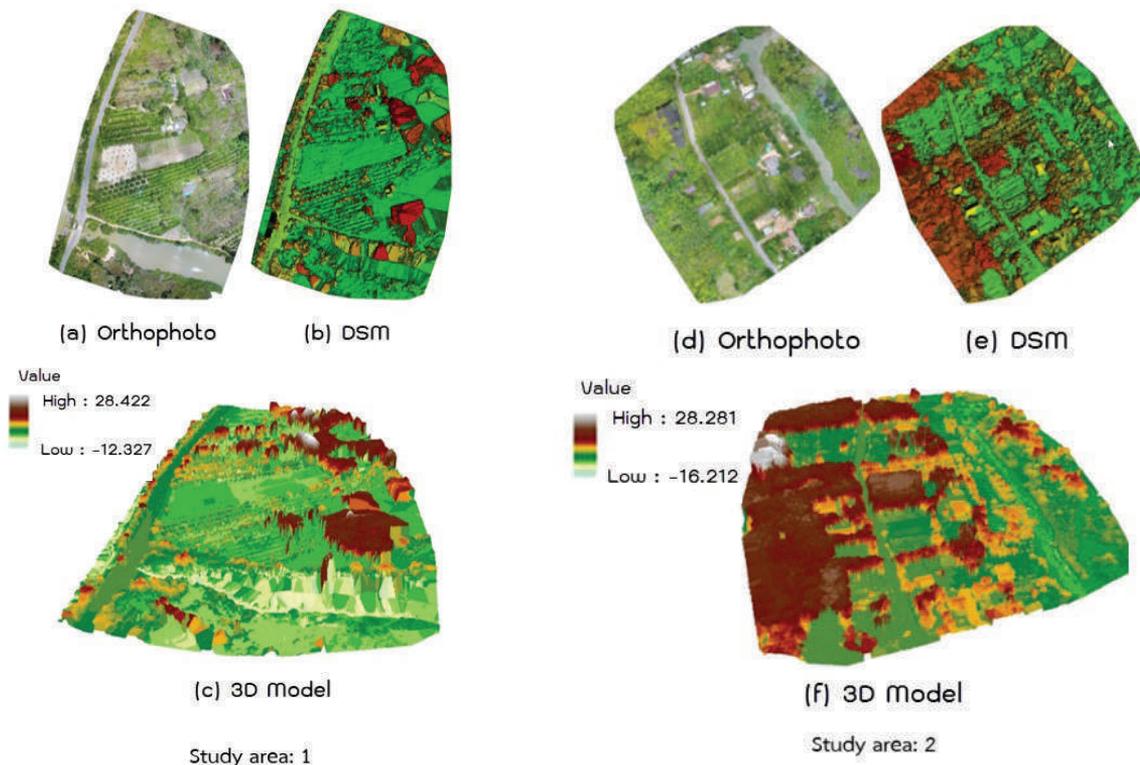


Figure 4 UAV photogrammetry results

2. ผลจากการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับในการวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์

ผลจากการวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์แบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 2 เซนติเมตร โดย Resample เป็นความละเอียด 10 เซนติเมตร เพราะต้องการลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ ทั้งนี้ต้องพิจารณาความละเอียด

ของการนำไปใช้งาน เพื่อนำประมวลผล Global_{tot} ที่ได้จากผลรวมของการแผ่รังสี Dir_{tot} และการแผ่รังสี Dif_{tot} ในพื้นที่ศึกษาที่ 1 และ 2 โดยมีผลลัพธ์ค่ารังสีดวงอาทิตย์ทั้งสองพื้นที่ดังใน Table 4 และดังแสดงในตัวอย่างในรูปแบบแผนที่พื้นที่ศึกษาที่ 1 ใน Figure 5

Table 4 Solar radiation results

| Solar radiation results | | | | |
|-------------------------|-----------------------|--|--------|-----------------------|
| Order | Details | Solar radiation(kWh/m ² -day) | | Note. |
| | | area 1 | area 2 | |
| 1 | Max. energy value | 5.52 | 5.53 | Open area and roof |
| 2 | Min. energy value | 0.00 | 0.00 | Area with large trees |
| 3 | Mean energy value | 3.56 | 3.74 | |
| 4 | Dir _{tot} | 4.32 | 4.32 | |
| 5 | Dif _{tot} | 1.20 | 1.20 | |
| 6 | Global _{tot} | 5.52 | 5.53 | |

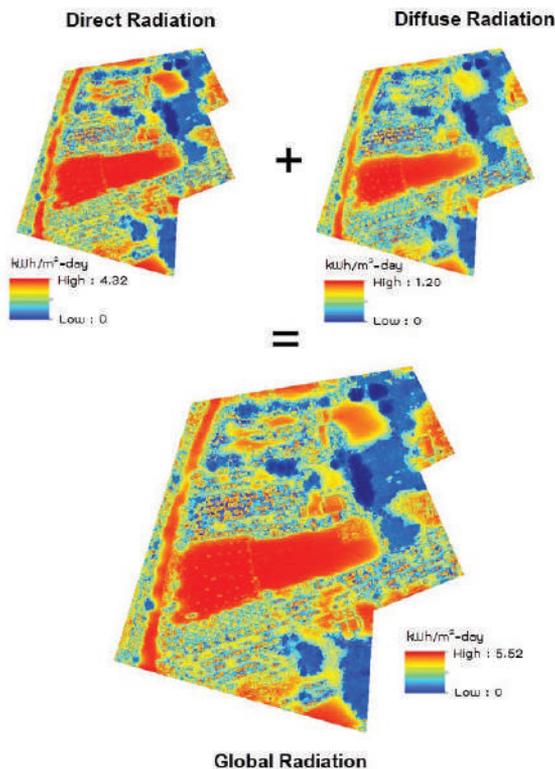


Figure 5 In area study 1, global radiation map

3. ผลจากการเปรียบเทียบกับสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขด้วยโปรแกรมระบบภูมิสารสนเทศเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ที่เป็นเครื่องมือวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ชนิดรังสีรวม โดยต้องทำการบันทึกข้อมูลต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 5 ปี ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ชุดข้อมูลภาคสนามจากสถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลัง ศูนย์บริการวิชาการที่ 8 ตำบลคลองหลา อำเภอกลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ที่เริ่มเก็บข้อมูลมาตั้งแต่ พ.ศ. 2545 โดยทำการแปลงข้อมูลจากข้อมูลรายวันเป็นรายเดือนย้อนหลัง 10 ปี (ข้อมูลย้อนหลัง พ.ศ. 2554 - 2564) เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของทั้งสองชุดข้อมูล ผลการศึกษาพบว่าค่าที่วัดได้จากสถานีวัดกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลอง DSM ในแต่ละเดือนมีความใกล้เคียงกันมีข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงค่าที่ได้ดัง Table 5 โดยทั้งสองพื้นที่ค่ารังสีจะมากสุดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน

มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.66 kWh/m²-day ซึ่งตรงกับช่วงฤดูร้อนในพื้นที่ศึกษา และน้อยสุดช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 kWh/m²-day ซึ่งตรงกับช่วงฤดูฝนในพื้นที่ศึกษา และเมื่อนำค่ารังสีดวงอาทิตย์แบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มรังสีจากสถานีวัดรังสีย้อนหลัง 10 ปี พบว่า ความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดัง Figure 6 ผลจากการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ พบว่าพื้นที่ศึกษาที่ 1 มีค่าความสัมพันธ์ร้อยละ 91 และในพื้นที่ศึกษาที่ 2 มีค่าความสัมพันธ์ร้อยละ 89 ซึ่งข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องในระดับสูงมากในทิศทางบวก และจากผลต่างระหว่างสองชุดข้อมูลพบว่า ข้อมูลจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขมีค่าปริมาณความเข้มรังสีมากกว่าข้อมูลสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์ และพบค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) เฉลี่ยสองพื้นที่ที่เท่ากับ 9.37 และเดือนที่มีค่าคลาดเคลื่อนร้อยละมากกว่า 10 ได้แก่เดือนพฤศจิกายนถึงกุมภาพันธ์ ดังTable 6 แต่โดยรวมค่าที่ประมวลผลได้จากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขมีความถูกต้องสามารถใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ได้

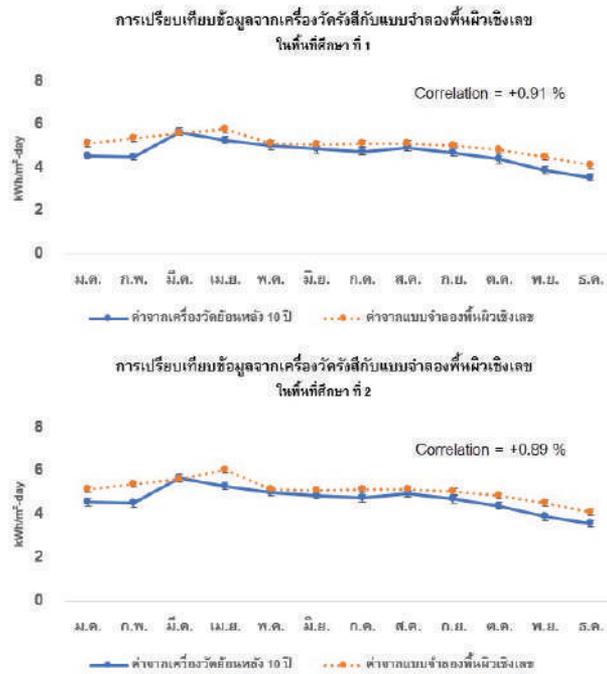


Figure 6 Comparison of solar radiation between Thermopile pyranometer and DSM

Table 5 Monthly solar radiation data

| Month | kWh/m ² -day | | |
|-------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| | Data from a 10-year retrospective thermopile pyranometer | Solar radiation from DSM, Area 1 | Solar radiation from DSM, Area 2 |
| JAN | 4.57 | 5.15 | 5.16 |
| FEB | 4.52 | 5.39 | 5.40 |
| MAR | 5.69 | 5.65 | 5.66 |
| APR | 5.31 | 5.80 | 6.05 |
| MAY | 5.03 | 5.16 | 5.17 |
| JUN | 4.89 | 5.11 | 5.13 |
| JUL | 4.76 | 5.15 | 5.17 |
| AUG | 4.97 | 5.16 | 5.17 |
| SEP | 4.72 | 5.06 | 5.07 |
| OCT | 4.41 | 4.84 | 4.85 |
| NOV | 3.91 | 4.53 | 4.54 |
| DEC | 3.58 | 4.12 | 4.13 |

Table 6 Comparison of Thermopile pyranometer and DSM

| Month | kWh/m ² -day | | % Error | |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------|--------|
| | The diff. value of Area 1 | The diff. value of Area 2 | Area 1 | Area 2 |
| JAN | 0.58 | 0.59 | 12.69 | 12.91 |
| FEB | 0.82 | 0.83 | 19.25 | 19.47 |
| MAR | 1.08 | 1.09 | 0.70 | 0.53 |
| APR | 1.23 | 1.48 | 9.23 | 13.94 |
| MAY | 0.59 | 0.60 | 2.58 | 2.78 |
| JUN | 0.54 | 0.56 | 4.50 | 4.91 |
| JUL | 0.58 | 0.6 | 8.19 | 8.61 |
| AUG | 0.59 | 0.60 | 3.82 | 4.02 |
| SEP | 0.49 | 0.50 | 7.20 | 7.42 |
| OCT | 0.27 | 0.28 | 9.75 | 9.98 |
| NOV | -0.04 | -0.03 | 15.86 | 16.11 |
| DEC | -0.45 | -0.44 | 15.08 | 15.36 |

4. ผลจากการประเมินพื้นที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมต่อการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

ผลจากการวิเคราะห์เพื่อกำหนดพื้นที่เหมาะสมในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เกณฑ์การแบ่งพื้นที่มีศักยภาพเพื่อการลงทุนผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจัดแบ่งพื้นที่มีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์ ออกเป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงเงื่อนไขไว้ใน Table 2 พบว่าในพื้นที่ศึกษาที่ 1 และ 2 พบว่ามีพื้นที่มี

ศักยภาพสูง 5,443.97 ตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 10.53 ของพื้นที่ทั้งหมด และ 122.01 ตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.18 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่มีศักยภาพต่ำมากไม่เหมาะแก่การติดตั้ง 2,330.14 ตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 4.51 ของพื้นที่ทั้งหมด และ 2,680.06 ตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 3.95 ของพื้นที่ทั้งหมด ดัง Table 7

และสามารถแสดงผลในรูปแบบแผนที่ได้ ดัง Figure 6 พบว่า พื้นที่ที่มีศักยภาพสูงที่สามารถรับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่า >5.28 kWh/m²-day เป็นพื้นที่โล่งและหลังคาที่สามารถรับแสงได้ตลอดช่วงเวลาที่เกิดแสง สามารถสังเกตภายในวงกลม หมายเลข 1 ใน Figure 7 และพื้นที่ที่มีศักยภาพต่ำมาก

ไม่เหมาะสมแก่การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (<1 kWh/m²-day) พบเป็นพื้นที่สวนยางพาราและสวนปาล์มน้ำมัน และพื้นที่ที่มีไม้ยืนต้นสูงมากกว่า 11.00 เมตร สามารถสังเกตภายในวงกลม หมายเลข 2

Table 7 Results from the assessment of areas with solar energy potential suitable for installing solar cells.

| Results from the assessment of areas with solar energy potential suitable for installing solar cells | | | | |
|--|--|---|---|--|
| Order | Details | Solar energy potential areas (m ²) | | Note. |
| | | Area 1 | Area 2 | |
| 1 | High potential areas (>5.28 kWh/m ² -day) | 5,443.97 m ² is 10.53 percent of the total area | 122.01 m ² is 0.18 percent of the total area | Open area and roof that receives light throughout daylight hours |
| 2 | Medium potential areas (5.28-3.56 kWh/m ² -day) | 18,445.63 m ² is 35.68 percent of the total area | 20,442.99 m ² is 30.10 percent of the total area | Open area with intermittent shading at certain times |
| 3 | Low potential areas (3.56-1 kWh/m ² -day) | 18,239.52 m ² is 35.28 percent of the total area | 22,472.67 m ² is 33.08 percent of the total area | The shaded area of tree canopies |
| 4 | Very low potential areas (<1 kWh/m ² -day) | 2,330.14 m ² is 4.51 percent of the total area | 2,680.06 m ² is 3.95 percent of the total area | The area of rubber and palm plantations |
| 5 | The area with trees taller than 11.00 m. | 7,240.28 m ² is 14.00 percent of the total area | 22,209.55 m ² is 32.70 percent of the total area | The area unable to install solar cell |

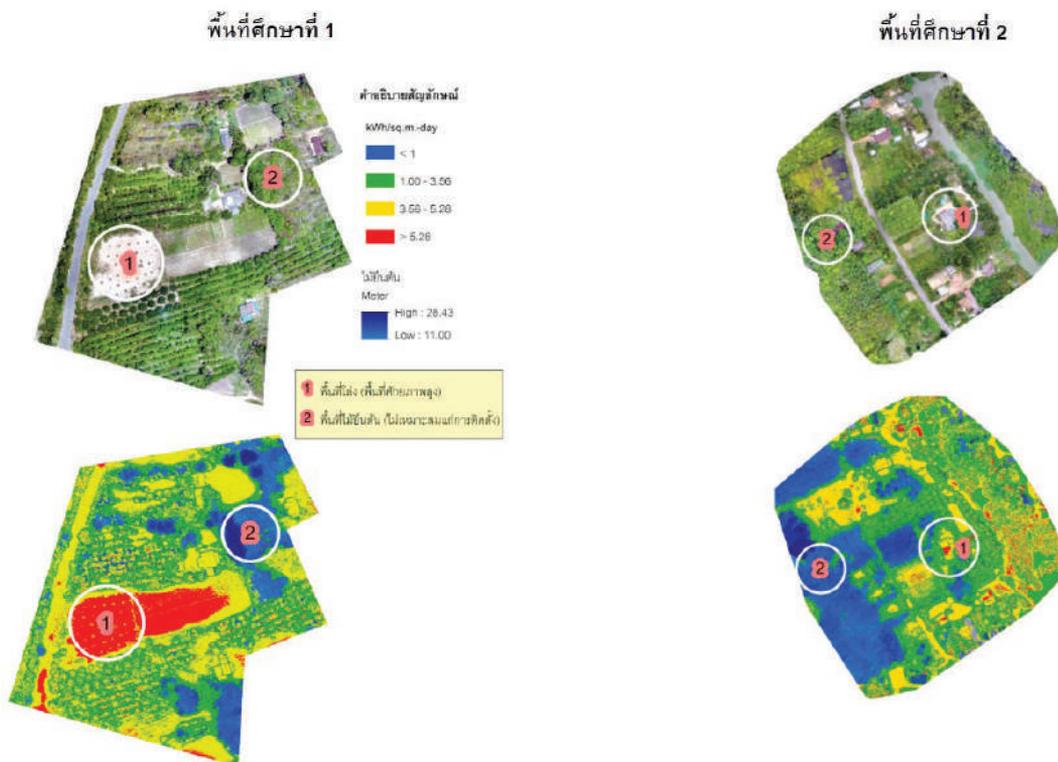


Figure 7 Solar radiation potential

5. การนำไปใช้ประโยชน์

การเลือกขนาดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งแบบ On Grid และ Off Grid สามารถทำได้เมื่อทราบเป้าหมายพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการแล้วสามารถคำนวณขนาดของแผงได้ โดยในที่นี้จะใช้สมการแนะนำที่มาจากบริษัทรับออกแบบระบบ ชื่อ SMA Solar Technology AG ประเทศเยอรมนี ดังแสดงในสมการที่ 4

ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์ในการพิจารณาเลือกพื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับการใช้งาน เครื่องสูบน้ำไฟฟ้าที่ใช้ในการเกษตร และบ้านที่อยู่อาศัยทั่วไป โดยการหาขนาดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้เพียงพอต่อความต้องการ โดยเลือกพิจารณาพื้นที่ที่มีศักยภาพปานกลางที่มีค่า 3.56-5.28 kWh/m²-day จะใช้ E_{pv} เท่ากับ 4.42 kWh/a/kWp และพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงมีค่ามากกว่า 5.28 kWh/m²-day จะใช้ E_{pv} เท่ากับ 5.28 kWh/a/kWp

ยกตัวอย่างการใช้งานเครื่องสูบน้ำขนาดกลางทั่วไป รุ่น 3DPC3.8-123-110-1100 ที่ค่า HEAD 60 เมตร จะได้ค่า Flow rate ที่ประมาณเกือบ 2.5 ลบ.ม./ชม เครื่องสูบน้ำมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม 110 V และมีค่าการกินไฟฟ้าที่ 1,100 W มี Total Head MAX 123 เมตร การหาขนาดชุดแผงสำหรับเครื่องสูบน้ำที่ใช้เวลาเฉลี่ย 2 ชั่วโมงต่อวัน ต้องการใช้กำลังไฟฟ้า 2.2 kWh

พิจารณาพื้นที่ที่มีศักยภาพปานกลาง

$$P_{PV} = (2.2 \times 1) / (4.42 \times 0.7) = 0.711 \text{ kW หรือ ใช้แผงรวมประมาณ 750 W}$$

พิจารณาพื้นที่ที่มีศักยภาพสูง

$$P_{PV} = (2.2 \times 1) / (5.28 \times 0.7) = 0.595 \text{ kW หรือ ใช้แผงรวมประมาณ 600 W}$$

หรืออีกยกตัวอย่างการใช้งานกำลังไฟฟ้าสำหรับบ้านพักอาศัย 2 ชั้นทั่วไป ที่มีขนาดพื้นที่ใช้สอย 125 ตารางเมตร จะมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ที่สำคัญๆ คล้ายคลึงกัน ซึ่งทางสถิติค่าเฉลี่ยของครอบครัวนั้นมีประมาณ 4 คน จะมีอัตราความต้องการใช้ไฟฟ้าโดยประมาณ 11.01 kW/h เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4 จะได้

พิจารณาพื้นที่ที่มีศักยภาพปานกลาง

$$P_{PV} = (11.01 \times 1) / (4.42 \times 0.7) = 3.558 \text{ kW หรือ ใช้แผงรวมประมาณ 3,600 W}$$

พิจารณาพื้นที่ที่มีศักยภาพสูง

$$P_{PV} = (11.01 \times 1) / (5.28 \times 0.7) = 2.978 \text{ kW หรือ ใช้แผงรวมประมาณ 3,000 W}$$

W

สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วย UAV สำหรับการประมาณค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ จากข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (DSM) พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์มีความใกล้เคียงกันในแต่ละเดือน เมื่อเทียบกับสถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ แสดงความสัมพันธ์ในระดับสูงมากในทิศทางบวก พบผลต่างระหว่างสองชุดข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขมีค่าปริมาณแสงอาทิตย์มากกว่าข้อมูลสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์ เป็นผลมาจากข้อมูลสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์ได้วัดรวมถึงปริมาณความชื้น อนุภาคน้ำในชั้นบรรยากาศ จึงทำให้ค่าที่วัดได้น้อยกว่าแบบจำลองพื้นผิว และจากข้อสังเกตข้อมูลค่าความเข้มรังสี พบว่าเดือนที่มีความเข้มของรังสีสูงอยู่ในช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคมซึ่งตรงกับช่วงฤดูร้อน และเดือนที่มีความเข้มรังสีต่ำอยู่ในช่วงตุลาคมถึงธันวาคม ซึ่งตรงกับช่วงฤดูฝน และพบค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (MAPE) เฉลี่ยสองพื้นที่เท่ากับ 9.37 ซึ่งเดือนที่มีค่าคลาดเคลื่อนร้อยละมากกว่า 10 ได้แก่ เดือนพฤศจิกายน ถึงกุมภาพันธ์ซึ่งเป็นผลมาจากในช่วงเดือนนั้นมีอิทธิพลจากฤดูหนาว และมรสุมในพื้นที่ (รวมถึงจำนวนพายุ) ทำให้เกิดความเบนเบี่ยงระหว่างชุดข้อมูล เพราะการคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขไม่คำนึงถึงอิทธิพลเหล่านี้ แต่โดยรวมค่าที่ประมวลแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขมีความถูกต้อง สามารถใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ได้ เพื่อนำมาใช้ประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่สำหรับการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์และสร้างแผนที่พื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ชุมชนบ้านท่าเมรุ ตำบลบางกล้า อำเภอบางกล้า จังหวัดสงขลา พบว่า พื้นที่ที่มีศักยภาพสูงสุดเป็นพื้นที่โล่งและพื้นผิวของหลังคาที่หันไปทางทิศใต้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (จากรุวรรณ พิพัฒน์พุทธพันธ์, 2564) ที่กล่าวว่า ประเทศไทยตั้งอยู่ซีกโลกเหนือ แนวการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์จะอ้อมไปทางทิศใต้ ทำให้ทิศใต้เป็นทิศทางที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด และพื้นที่ไม่เหมาะสมต่อการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ คือพื้นที่บริเวณไม้ยืนต้นและบริเวณโดยรอบที่มีเงาบังพื้นผิวตลอดช่วงเวลาที่เกิดแสง โดยแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ทำการวิเคราะห์เพียงหลังคา (Kausika et al., 2021)

และเมื่อนำมาประเมินศักยภาพเชิงพื้นที่ ในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าการเลือกติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่ศักยภาพสูงสามารถลดชุดแผงรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถึงร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ศักยภาพปานกลาง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สามารถประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่มีความถูกต้องในระดับเดซิเมตร สำหรับการสร้างแผนที่พื้นที่มีศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์ระดับครัวเรือน สอดคล้องกับ (วิลาวัดน์ ประสมทรัพย์, 2560) และมีต้นทุนที่ถูกกว่าการสำรวจด้วย LiDAR เพื่อวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้ ทำให้เป็นแนวทางสำหรับการประมาณค่าเชิงพื้นที่สำหรับการวิเคราะห์เพื่อการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในระดับครัวเรือน

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข (DSM) มีความละเอียดเชิงพื้นที่มากเกินไป ทำให้ระยะเวลาล่าช้าในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการลดความละเอียดเชิงพื้นที่ (Resample) ให้มีความละเอียดน้อยลงเพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ ทั้งนี้การปรับความละเอียดของข้อมูลต้องดูความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน และสำหรับการวิเคราะห์พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ระดับตำบล อำเภอ หรือการติดตั้งในลักษณะของโรงงานผลิตไฟฟ้า ควรเพิ่มข้อมูลด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ เช่น ระยะห่างจากเส้นทางสายหลัก ระยะห่างจากโครงข่ายไฟฟ้า ระยะห่างจากพื้นที่เมือง เป็นต้น (สามารถ วงษ์ฤทธิ์, 2555) มาเป็นปัจจัยในการพิจารณา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ผู้สนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2567 และหน่วยงานของภาครัฐและผู้เชี่ยวชาญที่อนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและ พลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 -2580 (AEDP2018)*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : https://www.dede.go.th/download/ Plan_62/20201021_TIEB_AEDP2018.pdf. (19 มีนาคม 2565).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. (2559). *คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [https:// BibA11106คู่มือแสงอาทิตย์59.pdf](https://BibA11106คู่มือแสงอาทิตย์59.pdf) (dede.go.th). (23 ธันวาคม 2565).

คณะอนุกรรมการมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2565). *มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

จารุวรรณ พิพัฒน์พุทธพันธ์. (2564). *การพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ควบคู่กับการทำเกษตรกรรมในโรงเรือน (Greenhouse) จากแนวคิดนโยบายของสภามหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://webkc.dede.go.th/testmax/node/3151>. (21 กันยายน 2566).

วิลาวัดน์ ประสมทรัพย์, ดิถรณ์ ธิกรกุลโตมร, ธนกร ทอดสูงเนิน, ศิลาภรณ์ จันทะลุน และ ภาณุวิชญ์ เอ็นดู. (2560). *การประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข จากอากาศยานไร้คนขับ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, หน้า SGI22-1 - SGI22-6.*

สามารถ วงษ์ฤทธิ์ และปฐมภรณ์ ศรีผดุงธรรม. (2555). *การวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่สำหรับติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยโดยใช้ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับแผนที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 158-165.*

Choi, Y., Suh, J. & Kim, S. M. (2019). GIS-Based Solar Radiation Mapping, Site Evaluation, and Potential Assessment: A Review. *Applied Sciences*, 9(1960):1-29. DOI: 10.3390/app9091960.

Cioban, A., Criveanu, H., Matei, F., Pop, I., & Rotaru, A. (2013). Aspects of Solar Radiation Analysis using ArcGIS, *Bulletin UASVM Horticulture*. 70(2)/2013, 437-440. <https://www.researchgate.net/publication/311740728>.

Dubayah, R. & P.M. Rich, A. (1995). Topographic solar radiation models for GIS. *Journal of Geographic Information Systems* 9. Volume 9 (1995), 405-413. <https://doi.org/10.1080/02693799508902046>.

ESRI. *How Solar Radiation Is Calculated—ArcGIS Pro*. Documentation. Available online: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-solar-radiation-is-calculated.htm> (accessed on 21 February 2021).

- Hofierka, J.; Šúri, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS, *Implementation and applications. In Proceedings of the Open-source GIS—GRASS users conference 2002, Trento, Italy, 11-13 September 2002; pp. 51-70.*
- Mihăilescu, A., & Cornelia-Badea, A. (2019). Analysing Solar Radiation in Suceava. *E-Journal of Geodesy, Cartography and Cadastre, No,10 (2019), 49-54.* [https://jgcc.geoprevi.ro/index.php/issues/jgcc-no-10.](https://jgcc.geoprevi.ro/index.php/issues/jgcc-no-10)
- Kausika, B. B. & ; van Sark, W.G.J.H.M.. (2021). Calibration and Validation of ArcGIS Solar Radiation Tool for Photovoltaic Potential Determination in the Netherlands. *Energies 2021, 14(7), 1865.* [https://doi.org/10.3390/en14071865.](https://doi.org/10.3390/en14071865)
- Malgorzata, P. S. (2019). A GIS Open Source Software application for mapping solar energy resources in urban areas, *E3S Web of Conferences 116, 00060 (2019).* [https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600060.](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600060)
- Ramachandra, T.V. (2007). Solar energy potential assessment using GIS. *Energy Education Science and Technology 2007 Volume(issue) 18(2): 101-114.*
- Rich, P.M., R. Dubayah, W.A. Hetrick & S.C. Saving, S.C. (1994). Using Viewshed models to calculate intercepted solar radiation. applications in ecology, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, 524-529.*