



การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัย  
ราชภัฏลำปาง ด้วยข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับ

วารินทร์ วงษ์วรรณ

ดุขฎฐินิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์

คณะภูมิสารสนเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัย  
ราชภัฏรำปาง ด้วยข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับ



วารินทร์ วงษ์วรรณ

คุณูปการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์

คณะภูมิสารสนเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

AN ASSESSMENT OF SOLAR ROOFTOP POTENTIAL ON LAMPANG RAJABHAT  
UNIVERSITY'S BUILDINGS BASED ON DIGITAL SURFACE MODEL (DSM)  
FROM UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)



WARIN WONGWAN

A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR DOCTOR DEGREE OF PHILOSOPHY  
IN GEOINFORMATICS  
FACULTY OF GEOINFORMATICS  
BURAPHA UNIVERSITY

2023

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมคุณิพนธ์และคณะกรรมการสอบคุณิพนธ์ได้พิจารณาคุณิพนธ์  
นิพนธ์ของ วารินทร์ วงษ์วรรณ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปรัชญาคุณิพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมคุณิพนธ์

คณะกรรมการสอบคุณิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ พลธีร์รักษ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาวิตรี รตโนภาส สุวรรณ  
ลี)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐพล มหาวิค)

.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐพันธ์ ฌนอมสัตย์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ พลธีร์รักษ์)

.....

..... กรรมการ

(ดร.สิทธิศักดิ์ หมุ่คำหล้า)

(อาจารย์ ดร.ณัฐพันธ์ ฌนอมสัตย์)

..... กรรมการ

(ดร.สิทธิศักดิ์ หมุ่คำหล้า)

..... ผู้รักษาการแทนคณบดีคณะภูมิสารสนเทศศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับคุณิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาคุณิพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเอียด)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

62820002: สาขาวิชา: ภูมิสารสนเทศศาสตร์; ปร.ด. (ภูมิสารสนเทศศาสตร์)  
 คำสำคัญ: แบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์  
 แสงอาทิตย์, ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา, รังสีดวง  
 อาทิตย์, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

วารินทร์ วงษ์วรรณ : การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บน  
 หลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ด้วยข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ  
 จากอากาศยานไร้คนขับ.

(AN ASSESSMENT OF SOLAR ROOFTOP POTENTIAL ON LAMPANG RAJABHAT UNIVERSIT  
 Y'S BUILDINGS BASED ON DIGITAL SURFACE MODEL (DSM)FROM UNMANNED AERIAL VE  
 HICLE (UAV)) คณะกรรมการควบคุมดัชนีพนธ์: ณรงค์ พลธิรักษ, ณัฐพันธ์ ถนอมสัตย์, สิทธิศักดิ์ หมู  
 คำหล้า ปี พ.ศ. 2566.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บน  
 หลังคาอาคาร ด้วยข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับ และ  
 วิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารใน  
 มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง วิธีการศึกษาผู้วิจัยได้ทำการบินและถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับและ  
 ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบอัตโนมัติเพื่อจัดทำแผนที่ภาพถ่ายทาง  
 อากาศ (Orthophoto) และข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model:  
 DSM) ที่มีความละเอียดจุดภาพ 10 เซนติเมตร จากนั้นวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร  
 ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ในซอฟต์แวร์ ArcGIS Desktop ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้ก็นำไป  
 ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการ  
 ประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารตาม  
 หลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตรา  
 ผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback  
 Period)

ผลการศึกษาพบว่า ใน พ.ศ. 2563 ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเท่ากับ 4.28  
 kWh/m<sup>2</sup> ต่อวัน หรือ 130.69 kWh/m<sup>2</sup> ต่อเดือน หรือ 1,415.8 kWh/m<sup>2</sup> ต่อปี ช่วงเดือนธันวาคม-  
 มกราคมมีค่ารังสีดวงอาทิตย์ต่ำกว่าช่วงเดือนอื่นของปี ส่วนช่วงเดือนพฤษภาคม-กรกฎาคมมีค่ารังสี  
 ดวงอาทิตย์สูงกว่าช่วงเวลาอื่นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าในแต่ละ  
 วันในช่วงเวลาหนึ่งปี หลังคาแบบลาดเอียงไปทางทิศใต้มีค่ารังสีดวงอาทิตย์สูงแต่เมื่อความลาดชัน

มากกว่า 40 องศาซึ่งสีดวงอาทิตย์จะลดลง บนหลังคาแบบลาดฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรหันไปทางทิศใต้และเอียงประมาณ 15 องศา โดยสรุปอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามีจำนวน 23 อาคาร ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 4,106 แผง คิดเป็นพื้นที่ร้อยละ 8.29 กำลังผลิตติดตั้งรวมไม่ต่ำกว่า 1,300 กิโลวัตต์ ผลการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ในพื้นที่ที่ได้ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง พบว่าค่าประมาณสูงกว่าค่าจริง (%error) เท่ากับ 0.19 เมื่อนำไปหักลบออกจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ในพื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 127,003.68 kWh ต่อเดือน หรือ 1,524,044.15 kWh ต่อปี สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยได้ร้อยละ 42.28

ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารพบว่า เมื่อโครงการมีอายุ 25 ปี จะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิมากกว่าศูนย์ อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 11.47 ซึ่งสูงกว่าอัตราต้นทุนเงินกู้เฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (WACC) ที่ใช้เป็นอัตราคิดลดของโครงการ และโครงการมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 9 ปี 6 เดือน ซึ่งน้อยกว่าอายุโครงการ จึงสามารถสรุปได้ว่าการดำเนินการดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีมีความคุ้มค่าในการลงทุน และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีก 791.44 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO<sub>2</sub>eq) ต่อปี

62820002: MAJOR: GEOINFORMATICS; Ph.D. (GEOINFORMATICS)

KEYWORDS: Digital Surface Model (DSM), Photovoltaic (PV), Solar Radiation, Rooftop PV System, Geographic Information System (GIS)

WARIN WONGWAN :

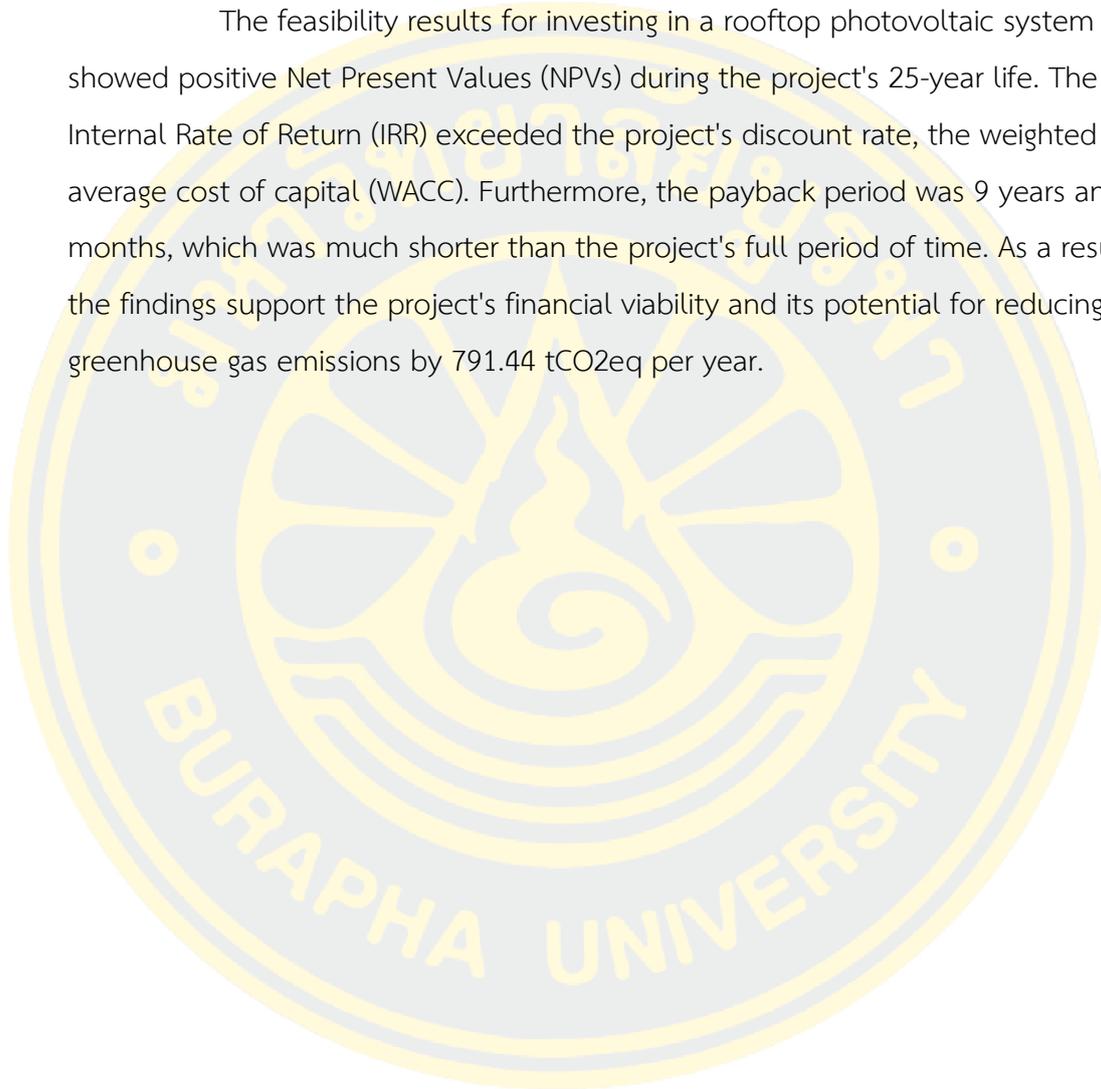
AN ASSESSMENT OF SOLAR ROOFTOP POTENTIAL ON LAMPANG RAJABHAT UNIVERSITY'S BUILDINGS BASED ON DIGITAL SURFACE MODEL (DSM) FROM UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV). ADVISORY COMMITTEE: NARONG PLEERUX, Ph.D. NATTAPAN THANOMSAT, Ph.D. SITTHISAK MOUKOMLA, Ph.D. 2023.

This research aimed to assess the solar rooftop potential using a digital surface model (DSM) generated from an unmanned aerial vehicle (UAV) and to analyze the feasibility of investing in rooftop photovoltaic systems for Lampang Rajabhat University's buildings. The research methodology involved conducting a UAV survey and utilizing automated software to process UAV images, creating an Orthophoto and a digital surface model (DSM) with a resolution of 10 cm/pixel to analyze point solar radiation in ArcGIS Desktop. The derived solar radiation values were then employed in evaluating the viability of investing in rooftop photovoltaic (PV) systems, considering factors like Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period (PB) through project analysis and evaluation.

According to the analysis, the solar radiation value on the building roof in 2020 was 4.28 kWh/m<sup>2</sup> per day, 130.69 kWh/m<sup>2</sup> per month, or 1,415.8 kWh/m<sup>2</sup> per year. The solar radiation was lowest between December and January, while May-July showed higher values due to the sun's changing position in the sky throughout the year. South-oriented pitched roofs had high solar radiation, nevertheless slopes steeper than 40° reduced the radiation. Flat roofs with solar panels oriented south and inclined at around 15° were found to be effective. The study revealed 23 buildings with solar rooftop potential and 4,106 solar panels covering 8.29 percent of the roof area and generating a total capacity of at least 1,300 kW. When the PV estimated value was compared to the actual value, a 0.19% difference was found. After adjusting the PV estimated value in PV-potential areas, the solar energy

potential was determined to be 127,003.68 kWh per month or 1,524,044.15 kWh per year. This potential could result in a 42.28% reduction in the university's electricity costs.

The feasibility results for investing in a rooftop photovoltaic system showed positive Net Present Values (NPVs) during the project's 25-year life. The Internal Rate of Return (IRR) exceeded the project's discount rate, the weighted average cost of capital (WACC). Furthermore, the payback period was 9 years and 6 months, which was much shorter than the project's full period of time. As a result, the findings support the project's financial viability and its potential for reducing greenhouse gas emissions by 791.44 tCO<sub>2</sub>eq per year.



## กิตติกรรมประกาศ

ดุชฎินิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนทุนการศึกษา (ทุนพัฒนาบุคลากร ประจำปี พ.ศ.2562) จากมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปาง และความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ พลธิรักษ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก อาจารย์ ดร.ณัฐพันธ์ ถนอมสัตย์ และ ดร.สิทธิศักดิ์ หมุ่คำหล้า อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ แก้ไข ตรวจสอบสิ่งที่บกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำดุชฎินิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่อย่างดี รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.สาวิตรี รตโนภาส สุวรรณลี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐพล มหาวิค ประธานกรรมการสอบปากเปล่าดุชฎินิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา ความสมบูรณ์ของงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและส่งเสริมการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนให้กำลังใจ ทำให้ข้าพเจ้ามีความเพียรในการทำงาน และสามารถศึกษาเล่าเรียนจนสำเร็จ การศึกษา

วารินทร์ วงษ์วรรณ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	5
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
ข้อจำกัดของการวิจัย.....	7
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
พลังงานแสงอาทิตย์และการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	9
การสร้างแบบจำลองความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ.....	22
ความคุ้มค่าในการลงทุน.....	36
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45
ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย.....	45

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย .....	46
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	60
การบันทึกภาพถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับ.....	60
การวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ .....	65
การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร.....	83
ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร .....	98
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล.....	105
อภิปรายผล.....	105
สรุปผล.....	107
ข้อเสนอแนะ .....	110
บรรณานุกรม.....	112
ภาคผนวก.....	119
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	131

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 รายละเอียดเทคนิคการรังวัดหาค่าพิกัดด้วย GPS แบบต่าง ๆ .....	30
ตารางที่ 2-2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์.....	41
ตารางที่ 3-1 ข้อมูลในการศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 58	58
ตารางที่ 4-1 ค่าความคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ. 63	63
ตารางที่ 4-2 รังสีดวงอาทิตย์รายวันในแต่ละฤดูกาล .....	70
ตารางที่ 4-3 ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบรายเดือนใน พ.ศ. 2563 .....	74
ตารางที่ 4-4 อาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	82
ตารางที่ 4-5 การผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้แล้ว ใน พ.ศ. 2563. 87	87
ตารางที่ 4-6 ไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ของแต่ละอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า ....	89
ตารางที่ 4-7 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแล้ว ปี 2563. 92	92
ตารางที่ 4-8 ศักยภาพพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	94
ตารางที่ 4-9 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้ารายปีของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง (กิโวลด์ต์-ชั่วโมง).....	96
ตารางที่ 4-10 ร้อยละของไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับความต้องการใช้ไฟฟ้า .....	97
ตารางที่ 4-11 ผลประโยชน์ของโครงการหรือพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ .....	99
ตารางที่ 4-12 ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	102

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1-1 กรอบแนวคิดในการวิจัย .....	5
ภาพที่ 1-2 แผนที่ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง .....	7
ภาพที่ 2-1 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ .....	11
ภาพที่ 2-2 ทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า .....	11
ภาพที่ 2-3 (ก) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทย พ.ศ.2560 .....	14
ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างการคำนวณด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รังสีอาทิตย์ .....	15
ภาพที่ 2-5 รูปแบบของจุดควบคุมภาพถ่ายรูปอากาศ รูปวงกลมและรูปสี่เหลี่ยม .....	28
ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัย .....	47
ภาพที่ 3-2 แผนการบินถ่ายภาพทางอากาศบริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง .....	48
ภาพที่ 3-3 เครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ (Point Solar Radiation) .....	50
ภาพที่ 3-4 ระบบอ่านหน่วยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ (AMR) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค .....	56
ภาพที่ 4-1 การบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ .....	61
ภาพที่ 4-2 การกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบภาพถ่าย .....	61
ภาพที่ 4-3 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และหลักการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ .....	62
ภาพที่ 4-4 ตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Control points) และจุดตรวจสอบ (Check points) .....	62
ภาพที่ 4-5 ภาพถ่ายทางอากาศ (Orthophoto) .....	65
ภาพที่ 4-6 แบบจำลองพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model: DSM) .....	65
ภาพที่ 4-7 ข้อมูล DSM เฉพาะส่วนของหลังคาอาคาร .....	66
ภาพที่ 4-8 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์รายวันในช่วงวิษุวัต (21 มี.ค.-20 มิ.ย. และ 22 ก.ย.-20 ธ.ค.) .....	67
ภาพที่ 4-9 รังสีดวงอาทิตย์รายวันในช่วงครีษมายัน (21 มิ.ย.-21 ก.ย.) .....	68
ภาพที่ 4-10 รังสีดวงอาทิตย์รายวันในช่วงเหมายัน (21 ธ.ค.-20 มี.ค.) .....	69

ภาพที่ 4-11 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์สัปดาห์ที่ 2 (8-14 ม.ค. 2563).....	71
ภาพที่ 4-12 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์สัปดาห์ที่ 25 (17-23 มิ.ย. 2563).....	72
ภาพที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์รายสัปดาห์ในช่วง ปี 2563.....	73
ภาพที่ 4-14 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในรอบปี 2563 บริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง.....	74
ภาพที่ 4-15 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์เดือนเฉลี่ยต่อเดือนใน พ.ศ. 2563 .....	76
ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบรังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์กับข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน.....	78
ภาพที่ 4-17 แผนภาพการกระจายของค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์กับข้อมูลของกรมพัฒนา พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.....	78
ภาพที่ 4-18 ความลาดชันและรังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารลักษณะต่าง ๆ.....	79
ภาพที่ 4-19 พื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ..	81
ภาพที่ 4-20 แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ในสัปดาห์ที่ 2 และ 40.....	83
ภาพที่ 4-21 แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเดือน พ.ค. และ ธ.ค.....	84
ภาพที่ 4-22 แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งปี .....	86
ภาพที่ 4-23 อาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	87
ภาพที่ 4-24 แผนภาพการกระจายของรังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์กับไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง.....	89
ภาพที่ 4-25 แผนที่อาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	91
ภาพที่ 4-26 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงกับจำนวนวันที่ฝนตก .....	93
ภาพที่ 4-27 การใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางในรอบสัปดาห์ .....	95
ภาพที่ 4-28 การใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางย้อนหลัง 5 ปี (พ.ศ.2560-2564) .....	96
ภาพที่ 4-29 เปรียบเทียบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับความต้องการใช้ไฟฟ้า.....	98
ภาพที่ 4-30 ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ .....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นปัจจัยพื้นฐานสำหรับการดำรงชีวิตและระบบเศรษฐกิจในปัจจุบัน การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความต้องการใช้พลังงานขยายตัวเพิ่มขึ้น ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 (Power Development Plan: PDP2018) ได้พยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย คาดประมาณว่า พ.ศ. 2560-2580 มีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 3.8 ต่อปี (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2562) แผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติให้ความสำคัญกับความมั่นคงทางพลังงาน (Security) ที่ความต้องการพลังงานสอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การเพิ่มของประชากรและการขยายตัวของเขตเมือง ด้านเศรษฐกิจ (Economy) ที่ต้นทุนพลังงานเหมาะสมและไม่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย และให้ความสำคัญด้านสิ่งแวดล้อม (Ecology) ด้วยการสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เพิ่มสัดส่วนการผลิตพลังงานหมุนเวียนภายในประเทศ และการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากการผลิตไฟฟ้ารูปแบบเดิมเป็นตัวเร่งให้เกิดภาวะโลกร้อน การนำเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้เป็นหนึ่งในวิธีการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนเพื่อบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Wong et al., 2016) ตามการคาดการณ์ของบริษัทบีพี (BP) ระบุว่าใน พ.ศ. 2593 เกือบครึ่งของพลังงานไฟฟ้าจะผลิตจากพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ (BP, 2019) สำหรับประเทศไทย กระทรวงพลังงานมีนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน โดยให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) รับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ ก๊าซชีวภาพ ชยะ พลังน้ำ พลังงานลม จากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยสนับสนุนผ่านมาตรการส่วนเพิ่มราคาซื้อไฟฟ้า (Adder) มาตรการจูงใจดังกล่าวทำให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นทุกปี แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) กำหนดให้เพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน รวมทั้งพิจารณาถึงศักยภาพแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถนำมาพัฒนาได้ในรูปของพลังงานไฟฟ้าเป็นร้อยละ 15-20 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย โดยมีเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ประมาณ 6,000 เมกะวัตต์ ใน พ.ศ. 2579 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) จากเดิมที่สามารถผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ราว 2,982 เมกะวัตต์ ใน พ.ศ. 2562 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) นับว่าเป็นเป้าหมายที่ท้าทายในการสนับสนุนการลงทุนพัฒนาผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีการเจริญเติบโตสูงสุด เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ดีขึ้นมาก มีต้นทุนต่ำลง ประสิทธิภาพดีและเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติ เป็นพลังงานสะอาดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สำหรับประเทศไทย พ.ศ.2560 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของประเทศไทยมีค่า 17.6 MJ/m<sup>2</sup>-day หรือ 4.89 kWh/m<sup>2</sup>-day ลดลงจาก พ.ศ. 2542 และ 2553 เนื่องจากส่วนหนึ่งมาจากปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์หรือมีสาเหตุมาจากภาวะโลกร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของประเทศไทย จะเห็นว่ามีความสูงเหมาะแก่การใช้งานเป็นพลังงานทางเลือกในการผลิตไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560) สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร (Solar PV Rooftop) เป็นโครงการที่รัฐบาลส่งเสริมให้มีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์หรือเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าขายให้กับภาครัฐ ซึ่งได้มีการจูงใจด้วยอัตราซื้อไฟฟ้าหรือค่า Fit (Feed-in tariff) ที่มีความเหมาะสมในปัจจุบันตามกลไกของตลาดที่ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และให้การสนับสนุนในระยะยาว 25 ปี โดยรับซื้อไฟฟ้าสำหรับโครงการ 3 ขนาด ได้แก่ บ้านอยู่อาศัย อาคารธุรกิจขนาดเล็ก และอาคารธุรกิจขนาดกลางและใหญ่หรือโรงงาน (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2556)

ด้วยต้นทุนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงหลายปีที่ผ่านมา ส่งผลให้มีการนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคส่วนอาคารธุรกิจและโรงงาน ส่วนสถาบันการศึกษาเป็นกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสูงและมีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น แต่ไม่มีการนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้อย่างแพร่หลาย อาคารต่างๆ ในสถาบันการศึกษาเป็นพื้นที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงกลางวันซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สูงสุดเช่นเดียวกัน (ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์, 2557) ใน พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 3,562,815 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อเทียบกับ พ.ศ. 2562 มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าลดลงร้อยละ 5.26 มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางได้ดำเนินนโยบายอนุรักษ์พลังงานภายใต้มาตรการลดใช้พลังงาน และเข้าร่วมโครงการส่งเสริมการใช้พลังงาน

ทดแทนในหน่วยงานภาครัฐ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โดยได้รับการสนับสนุนงบประมาณติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา ขนาดกำลังผลิตติดตั้งไม่น้อยกว่า 300 กิโลวัตต์ (มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 2560) ช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยได้อีกทางหนึ่ง หลังคาอาคารที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจำนวน 944 แผง คิดเป็นพื้นที่ 1,836.7 ตารางเมตรหรือร้อยละ 1.91 ของพื้นที่หลังคาทั้งหมด ยังมีพื้นที่หลังคาอาคารอีกจำนวนมากที่มีศักยภาพในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับใช้ในมหาวิทยาลัยแต่ยังไม่ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์

อย่างไรก็ดี ปัญหาที่สำคัญในการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ปริมาณแสงอาทิตย์ใน 1 วัน ไม่ได้มีตลอด 24 ชั่วโมง และปริมาณของพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้นั้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในแต่ละวัน เวลาของปี ตำแหน่งที่ตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสภาพอากาศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.) การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model : DSM) ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีรายละเอียดสูงจากกระบวนการรังวัดด้วยภาพคู่ซ้อนที่ได้จากการบินถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มาวิเคราะห์หาค่ารังสีดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง Solar Radiation Analysis ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) สำหรับใช้ประเมินศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร จากนั้นวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ผลการศึกษาจะนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของมหาวิทยาลัย ตลอดจนลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากฟอสซิลที่เป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อน

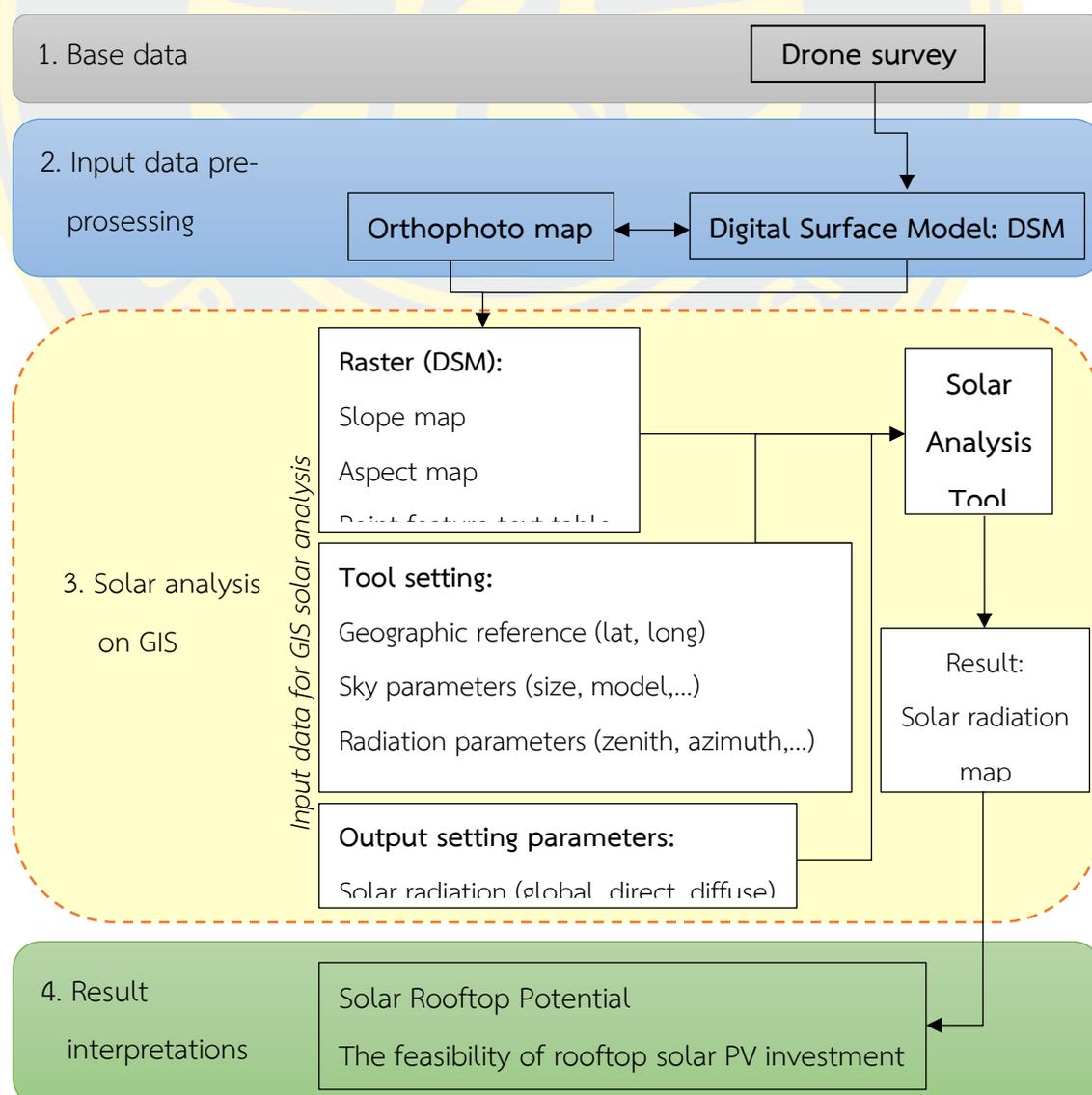
### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ด้วยข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับ
2. วิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

## กรอบแนวคิดในการวิจัย

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง มีกรอบในการดำเนินงาน ดังภาพที่ 1-1 เริ่มจากการบินถ่ายภาพทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ ครอบคลุมพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง เพื่อจัดทำข้อมูล DSM และแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ (Ortho map) สำหรับนำไปวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือ Point Solar Radiation ในซอฟต์แวร์ ArcGIS Desktop 10.3.1 ผลที่ได้แสดงเป็นแผนที่รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation map)

ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จะถูกนำไปคำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (Solar Rooftop Potential) ทำการเปรียบเทียบกับความต้องการใช้ไฟฟ้าเพื่อหาสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ และประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารต่อไป



ภาพที่ 1-1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบศักยภาพภาพพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร และต้นทุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
2. ได้ข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับผู้บริหารในการวางแผนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
3. ได้ข้อมูลส่งเสริมการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สนับสนุนนโยบายที่จะเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่เป็นสาเหตุการเกิดก๊าซเรือนกระจกและช่วยลดภาวะโลกร้อน

### ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ เป็นการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง มีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

#### 1. ขอบเขตด้านเนื้อหา

1.1 ข้อมูล DSM ได้จากภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้ UAV ครอบคลุมพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จากนั้นจัดทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ และประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ซึ่งเป็นอาคารที่ยังใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

1.2 วิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ ด้วยเครื่องมือ Point Solar Radiation ในซอฟต์แวร์ ArcGIS Desktop 10.3.1 ผลที่ได้แสดงเป็นแผนที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์หน่วยวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ )

1.3 คำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จากความเข้มแสงอาทิตย์ โดยใช้สมการในการคำนวณประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 ประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยอาศัยหลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

## 2. ขอบเขตด้านพื้นที่

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง ตั้งอยู่เลขที่ 119 หมู่ 9 ถนนลำปาง-แม่ทะ ต.ชมพู อ.เมือง จ.ลำปาง มีพื้นที่ประมาณ 675 ไร่ หรือ 1.08 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ระหว่างละติจูด  $18^{\circ}13'27''$  ถึง  $18^{\circ}14'27''$  เหนือ และลองจิจูด  $99^{\circ}28'27''$  ถึง  $99^{\circ}29'32''$  ตะวันออก มีอาคารสำหรับใช้ในการจัดการเรียนการสอน อาคารสำนักงาน หอประชุม โรงอาหารและอาคารพักอาศัย ฯลฯ ในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยจำนวน 53 อาคาร (ภาพที่ 1-2) ปัจจุบันอาคารบางหลังไม่มีการใช้งานอาคารแล้ว ได้แก่ อาคารเรียนชั่วคราวและอาคารคหกรรม จำนวน 5 หลัง อาคารที่ยังคงใช้งานอยู่ในปัจจุบันจะใช้พื้นที่หลังคาอาคารในการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์



ภาพที่ 1-2 แผนที่ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง  
(มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 2561)

### ข้อจำกัดของการวิจัย

การประเมินศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง มีข้อจำกัดของการวิจัย คือ การวิเคราะห์หาค่ารังสีดวงอาทิตย์ ค่าที่ได้จากการคำนวณอาจถูกลดทอนด้วยสภาพอากาศ (Weather) ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทั้งวัน และจากปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศที่มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านเข้ามายังพื้นโลก

### นิยามศัพท์เฉพาะ

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่หนึ่ง หมายถึง ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้นในช่วงเวลาหนึ่ง มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร/วัน (kWh/m<sup>2</sup>/day)

ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คือ ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกติดตั้งไว้บนหลังคาอาคาร

แบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model: DSM) คือ การสร้างแบบจำลองความสูงของภูมิประเทศ และจัดเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบตารางกริดหรือข้อมูลราสเตอร์ โดยรวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกด้วย เช่น สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้และพุ่มไม้ เป็นต้น

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell, Photovoltaic, PV) คือ การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำจึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านที่อยู่อาศัยหรือบนอาคาร (Solar rooftop, Solar PV Rooftop) คือการนำแสงอาทิตย์มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นตัวรับแสงแดดแล้วเปลี่ยนให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ผ่านอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แล้วส่งให้เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านใช้งาน

อาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง หมายถึง อาคารสำหรับใช้ในการจัดการเรียนการสอน อาคารสำนักงาน หอประชุม โรงอาหารและอาคารพักอาศัย ฯลฯ ในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยที่ยังคงใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปาง ด้วยข้อมูล DSM จาก UAV โดยทบทวนแนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีรายละเอียดดังนี้

1. พลังงานแสงอาทิตย์และการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
2. การสร้างแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ
3. ความคุ้มค่าในการลงทุน
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### พลังงานแสงอาทิตย์และการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

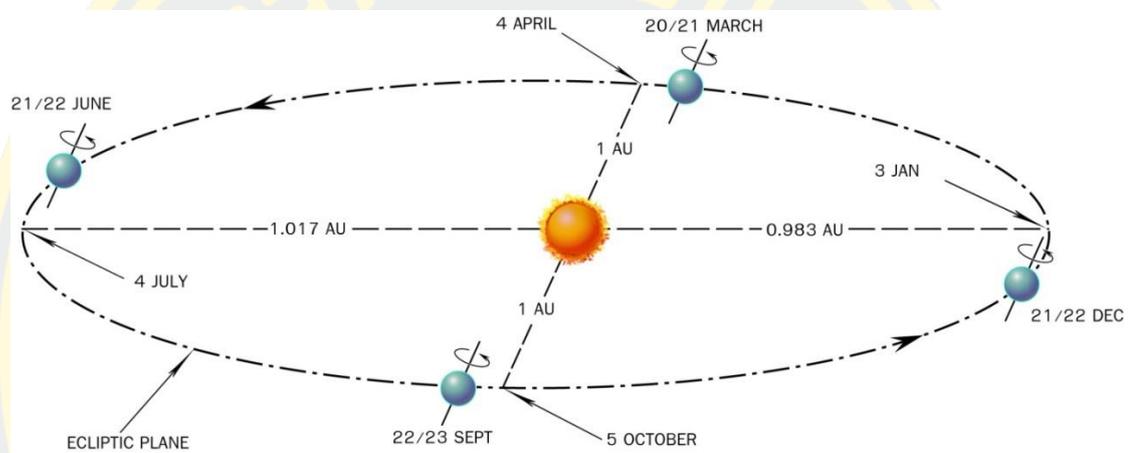
##### 1. ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์

1.1 รังสีดวงอาทิตย์หรือพลังงานแสงอาทิตย์ คือ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานที่มีประโยชน์ได้ เช่น ความร้อนและไฟฟ้า ทุกตำแหน่งบนโลกได้รับแสงแดดอย่างน้อยช่วงหนึ่งของปี ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงจุดใดจุดหนึ่งบนพื้นผิวโลกแตกต่างกันไปตามที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ช่วงเวลาในแต่ละวัน ฤดูกาล ภูมิประเทศและสภาพอากาศในท้องถิ่นนั้น เนื่องจากโลกกลม รังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นผิวโลกในมุมต่าง ๆ ตั้งแต่  $0^\circ$  (เหนือขอบฟ้า) ถึง  $90^\circ$  (เหนือศีรษะ) เมื่อรังสีของดวงอาทิตย์อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวโลกจะได้รับพลังงานทั้งหมดที่เป็นไปได้ ยิ่งรังสีดวงอาทิตย์เอียงมากเท่าไรก็จะยิ่งเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนานขึ้นเท่านั้น เมื่อรังสีอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศบางส่วนก็ถูกดูดซับ กระจายและสะท้อนโดยโมเลกุลของอากาศ ไอน้ำ เมฆ ฝุ่น มลพิษในอากาศ ไฟป่าและภูเขาไฟ เรียกรังสีดวงอาทิตย์แบบนี้ว่ารังสีกระจาย (Diffuse radiation) ส่วนรังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกโดยไม่กระจายเรียกว่ารังสีตรง (Direct radiation) ผลรวมของรังสีกระจายและรังสีโดยตรงเรียกว่ารังสีโลก (Global radiation) สภาพบรรยากาศสามารถลดรังสีดวงอาทิตย์โดยตรงลงร้อยละ 10 ในวันที่ท้องฟ้าโปร่งและอากาศแห้ง และลดลงได้ถึงร้อยละ 100 ในช่วงวันที่มีเมฆมากและหนา (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2013)

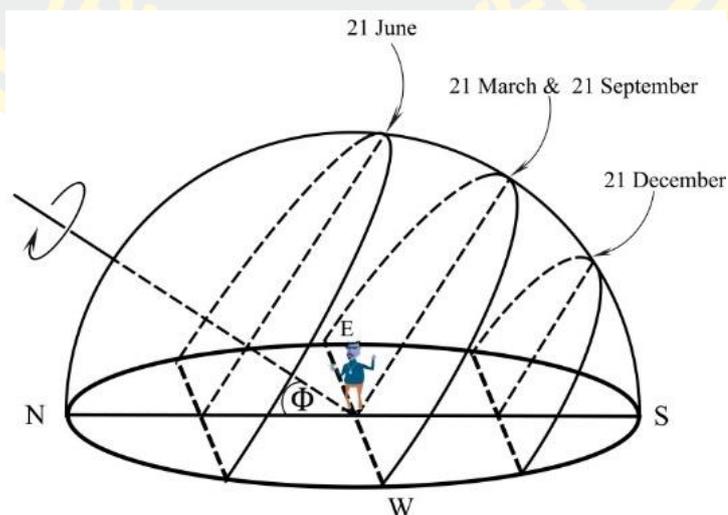
ร้อยละ 98 ของรังสีอาทิตย์ในอวกาศมีความยาวคลื่นระหว่าง  $0.25 - 3.0 \mu\text{m}$  โดยค่าคงที่รังสีอาทิตย์ (Solar constant) ถูกกำหนดให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับทิศทางที่ชี้ไปยังดวงอาทิตย์ ในอวกาศที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ ค่าที่ยอมรับว่าเป็นค่าคงที่รังสีอาทิตย์ในปัจจุบันนี้ คือ  $1,367 \text{ W/m}^2$  ค่าจริงของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างจากดวงอาทิตย์ถึงโลกมีค่าแตกต่างจากค่าคงที่ของรังสีอาทิตย์ประมาณร้อยละ  $\pm 3.35$  เนื่องจากระยะทางดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงตลอดในหนึ่งปี ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึงผิวโลกจะมีค่าต่ำกว่า Solar constant เพราะถูกกรองด้วยบรรยากาศ การแผ่รังสีของแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดพลังงานขึ้นและหน่วยสำหรับการวัดกำลัง คือ วัตต์ (W) อย่างไรก็ตาม ปริมาณพลังงานขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์ และขนาดของพื้นที่ผิวที่รับแสง ดังนั้น การฉายรังสีจึงมีหน่วยวัดเป็น  $\text{W/m}^2$  (วัตต์ต่อตารางเมตร) ส่วนการฉายรังสีเป็นมาตรฐานวัดพลังงานแสงอาทิตย์ วัตต์พลังงานเป็น Wh (วัตต์ชั่วโมง) หรือ kWh (กิโลวัตต์ชั่วโมง) พลังงานแสงอาทิตย์เป็นผลของกำลังงานแสงอาทิตย์และเวลา ซึ่งวัดเป็น  $\text{Wh/m}^2$  (วัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร) หรือเป็น  $\text{kWh/m}^2$  (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร) จึงจำเป็นต้องรู้ว่าจะสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้มากแค่ไหนในหนึ่งวัน ดังนั้น จึงวัดพลังงานแสงอาทิตย์ในหน่วย  $\text{Wh/m}^2\text{-day}$  (วัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน) หรือ  $\text{kWh/m}^2\text{-day}$  (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน)

วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์มีลักษณะเป็นวงรี โดยมีความรี (Eccentricity) เท่ากับ 0.016722 มีระยะกึ่งแกนหลัก (Semi-major axis)  $1.4968 \times 10^8$  กิโลเมตร โดยมีดวงอาทิตย์อยู่ที่จุดโฟกัสหนึ่งของวงรีดังกล่าว ระนาบของวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เรียกว่า ระนาบสุริยวิถี (Ecliptic plane) แกนหมุนของโลกเอียงทำมุมกับเส้นตั้งฉากของระนาบสุริยวิถี 23.5 องศา ดังนั้น ระนาบศูนย์สูตร (Equatorial plane) ของโลกจึงทำมุมกับระนาบสุริยวิถี 23.5 องศาด้วย การที่แกนหมุนของโลกเอียงนี้ทำให้โลกหันซีกเหนือและซีกใต้เข้าหาดวงอาทิตย์มากน้อยต่างกันในขณะที่โคจรรอบดวงอาทิตย์ อายน (Solstice) เป็นจุด 2 จุดบนอีลิปติก หรือวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ และอยู่กึ่งกลางระหว่างจุดวิษุวัต (Equinox) จึงเป็นจุดที่มีระยะสูงสุดจากเหนือและใต้ของเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า คนบนโลกในตำแหน่งทั้งสองนี้จะเห็นดวงอาทิตย์หยุดการเปลี่ยนเดคลิเนชัน คือ ดวงอาทิตย์จะมีค่าเดคลิเนชันเหนือหรือใต้มากที่สุด ในซีกโลกเหนือจุดที่เห็นดวงอาทิตย์อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรมากที่สุดเรียกว่า อุตรายันหรือศรีษมายัน (Summer solstice) ตรงกับประมาณวันที่ 21-22 มิถุนายน ซึ่งดวงอาทิตย์มีค่าเดคลิเนชันเหนือสุด ครึ่งโลกฝ่ายเหนือจะได้รับแสงอาทิตย์มากที่สุดและส่องลงมายังพื้นโลกเกือบตรงดิ่ง ระยะเวลากลางวันยาวกว่ากลางคืน และทำนองเดียวกันจุดที่เห็นดวงอาทิตย์อยู่ใต้เส้นศูนย์สูตรมากที่สุดเรียกว่า ทักษิณายนหรือเหมายัน (Winter solstice) ตรงกับ

ประมาณวันที่ 21-22 ธันวาคม ซึ่งดวงอาทิตย์มีค่าเดคลิเนชันต่ำสุด วิษุวัต เป็นจุดที่เกิดวิถีของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏเห็นตัดกับเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า ซึ่งมีอยู่ 2 จุดตรงข้ามกัน เมื่อดวงอาทิตย์โคจรตามวิถีที่ปรากฏเห็นผ่านจุดใดจุดหนึ่งนี้จะทำให้เกิดเวลากลางวันและกลางคืนเท่ากันทั่วโลก ดังนั้นในรอบปีหนึ่ง ๆ ดวงอาทิตย์จึงโคจรตามวิถีที่ปรากฏผ่านจุดวิษุวัต 2 ครั้ง ครั้งหนึ่งจะผ่านวันที่ 21 มีนาคม เรียกว่า วสันตวิษุวัต (Vernal equinox) และอีกครั้งหนึ่งผ่านในวันที่ 21 กันยายน เรียกว่า ศารทวิษุวัต (Autumnal equinox) ดังนั้น การเกิดฤดูกาลจึงเป็นผลมาจากการที่แกนหมุนของโลกเอียงทำมุมกับเส้นตั้งฉากของระนาบสุริยวิถี ดังภาพที่ 2-1 และ 2-2



ภาพที่ 2-1 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์  
(มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2560)



ภาพที่ 2-2 ทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า  
(มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2560)

เดคลิเนชันเป็นระยะเชิงมุมของดวงอาทิตย์ (Sun's declination) ที่นับจากเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าเป็น 0 องศา วัดตามวงเดคลิเนชันไปทางเหนือหรือใต้เส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าจนถึง 90 องศา ที่ขั้วท้องฟ้าทั้งสอง ถ้าดวงอาทิตย์อยู่ทางเหนือเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าเรียกว่า มีเดคลิเนชันเหนือ ถ้าอยู่ทางใต้เรียกว่า มีเดคลิเนชันใต้ เดคลิเนชันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างเด่นชัดในการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยรังสีมีความเข้มข้นขึ้นในช่วงฤดูร้อนเมื่อดวงอาทิตย์อยู่สูงขึ้นไปบนท้องฟ้า และความเข้มข้นรังสีดวงอาทิตย์ลดลงในช่วงฤดูหนาวเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ต่ำลงบนท้องฟ้า

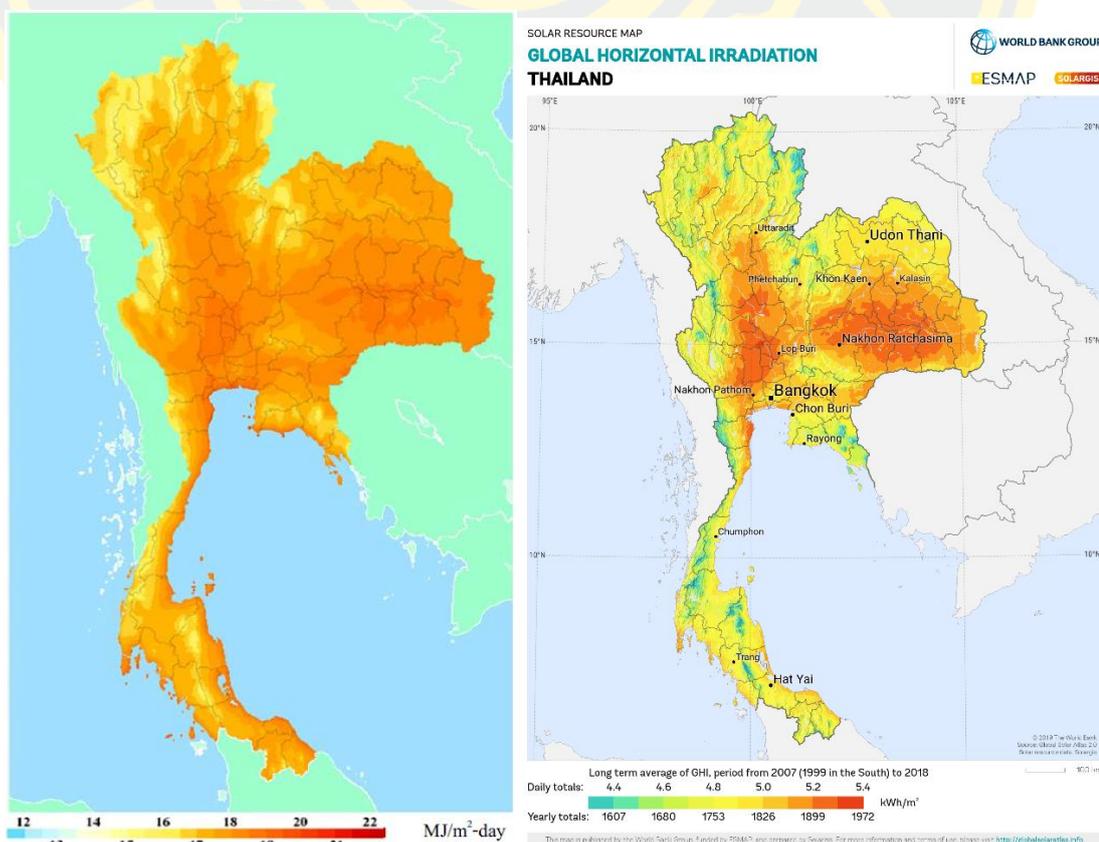
รังสีดวงอาทิตย์โลกหรือรังสีรวมประกอบด้วยรังสีกระจายและรังสีตรง อัตราส่วนระหว่างรังสีกระจายต่อรังสีรวมเป็นข้อมูลสำคัญ เป็นตัวบอกคุณภาพของรังสีดวงอาทิตย์ เนื่องจากการวัดรังสีกระจายทำได้ยากกว่ารังสีรวม ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีค่าอัตราส่วนระหว่างรังสีกระจายต่อรังสีรวม จากการศึกษาโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนรังสีกระจายต่อรังสีรวมของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ 0.42 ซึ่งแสดงว่าประเทศไทยได้รับรังสีกระจายเป็นส่วนค่อนข้างสูง ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในรอบปีอยู่ระหว่าง 16-22 MJ/m<sup>2</sup>-day โดยมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมและสูงสุดในเดือนเมษายน แล้วค่อย ๆ ลดลงต่ำสุดในเดือนธันวาคม จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมพบว่า ในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีตรงค่อนข้างสูง ทั้งนี้เพราะช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงฤดูแล้ง ท้องฟ้าโปร่งปราศจากเมฆ รังสีดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่จึงเป็นรังสีตรง และตั้งแต่เดือนพฤษภาคมเป็นต้นไปรังสีตรงจะค่อย ๆ ลดลง

## 1.2 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์

ประเทศไทยได้ดำเนินการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 และได้ทำการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียม เมื่อปี พ.ศ. 2560 พบว่า การกระจายตามพื้นที่ของรังสีดวงอาทิตย์ในแต่ละเดือนได้รับอิทธิพลของลมมรสุมและลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ รังสีดวงอาทิตย์นอกจากจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทางเดินของดวงอาทิตย์ตามเวลาในรอบปีแล้ว ยังขึ้นอยู่กับภูมิประเทศด้วย เดือนเมษายนเป็นช่วงเวลาที่พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด สำหรับการกระจายตามพื้นที่รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีพบว่า บริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 18-20 MJ/m<sup>2</sup>-day อยู่บริเวณภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ ดังภาพที่ 2-3(ก) เมื่อคำนวณค่ารังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อ

เดือนของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่า มีค่าเท่ากับ 17.6 MJ/m<sup>2</sup>-day จากการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในปี พ.ศ.2542 และ พ.ศ.2553 พบว่า ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีค่า 18.2 และ 18.0 MJ/m<sup>2</sup>-day ตามลำดับ เห็นได้ว่าศักยภาพความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของประเทศไทยมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ลดทอนแสงอาทิตย์ที่เข้ามาถึงพื้นโลก อย่างไรก็ตามจากค่ารังสีดวงอาทิตย์ของประเทศไทยก็ยังมีค่าสูงเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกได้เป็นอย่างดี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

มีการให้บริการแผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละพื้นที่ทุกมุมโลก (Global solar atlas) ผ่านเว็บไซต์ ซึ่งเผยแพร่โดยกลุ่มธนาคารโลกที่ได้รับทุนสนับสนุนจาก ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) และจัดทำโดยบริษัท Solargis เพื่อสนับสนุนข้อมูลให้กับอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์หรือโครงการพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแสดงข้อมูลค่าประมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Power Potential: PVO<sub>UT</sub>) ค่าการแผ่รังสีโลก (Global Horizontal Irradiation: GHI) และค่าการแผ่รังสีตรง (Direct Normal Irradiation: DNI) สำหรับรังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ของประเทศไทยแสดงดังภาพที่ 2-3(ข)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2-3 (ก) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทย พ.ศ.2560

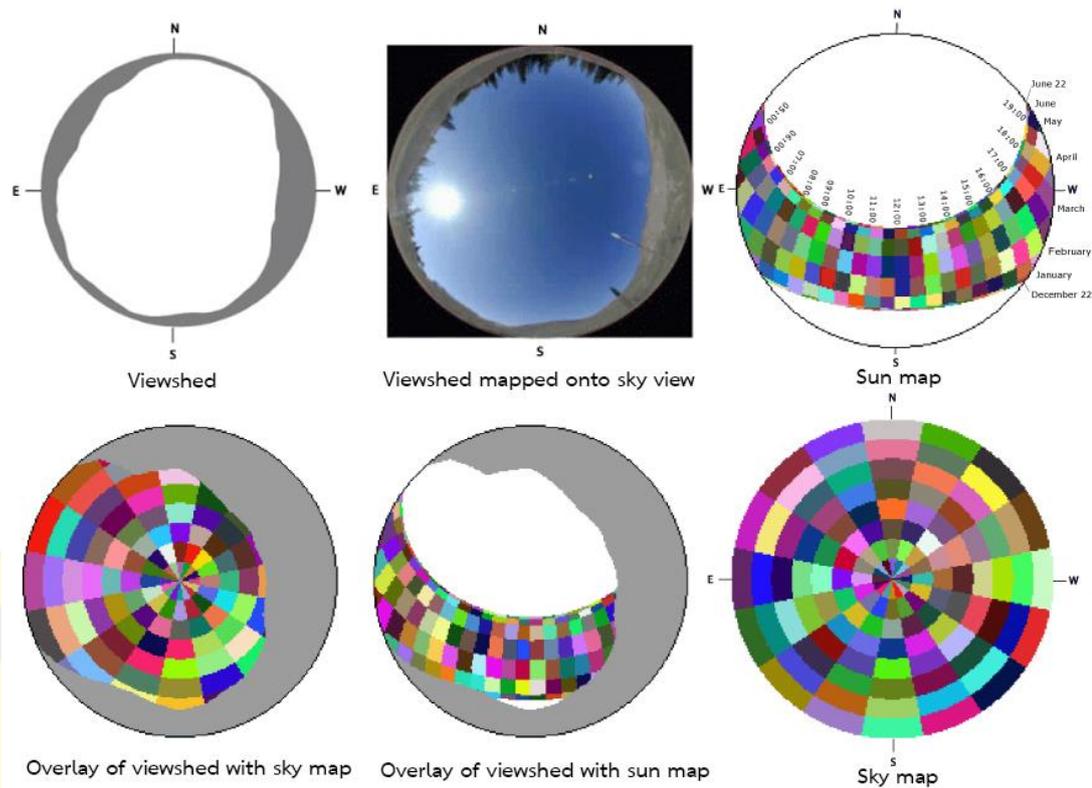
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

(ข) แผนที่ค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ของประเทศไทย

(Solargis, 2019)

## 2. การวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation analysis)

การวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือ Solar radiation analysis ในซอฟต์แวร์ ArcGIS คำนวณรังสีดวงอาทิตย์เหนือภูมิประเทศหรือตำแหน่งใด ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ได้ โดยคำนึงถึงผลกระทบจากบรรยากาศ ละติจูดและระดับความสูง ความลาดชัน (Slope) และทิศทางความลาด (Aspect) การเปลี่ยนแปลงมุมดวงอาทิตย์ในแต่ละวันและฤดูกาล รวมถึงผลกระทบของเงาที่เกิดจากภูมิประเทศโดยรอบ เครื่องมือนี้พัฒนาโดยใช้หลักการอัลกอริธึมการมองภาพครึ่งวงกลม “hemispherical viewshed” ที่พัฒนาโดย Rich et al. (1994) และพัฒนาเพิ่มเติมโดย Fu and Rich (2000) ที่ปรับอัลกอริธึมให้มีการสร้างพื้นที่การมองภาพครึ่งวงกลมแบบมองขึ้นด้านบน (Upward-looking hemispherical viewshed) ในทุกตำแหน่งของแบบจำลองความสูงดิจิทัล (Digital Elevation Model: DEM) การมองภาพครึ่งวงกลมนั้นคล้ายกับภาพถ่ายครึ่งวงกลมแบบมองขึ้นด้านบน (Fisheye) ซึ่งจะมองท้องฟ้าจากพื้นดินขึ้นไปด้านบน ขนาดของท้องฟ้าที่มองเห็นได้มีผลต่อรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้รับ ตัวอย่างเช่น พื้นที่ในทุ่งโล่งจะได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงกว่าพื้นที่ในหุบเขาลึก เครื่องมือวิเคราะห์รังสีอาทิตย์จะคำนวณการมองภาพครึ่งวงกลมแบบมองขึ้นด้านบนจากพื้นผิวภูมิประเทศแล้วนำไปซ้อนทับกับแผนที่ดวงอาทิตย์ (Sun map) เพื่อประเมินการแผ่รังสีตรง และซ้อนทับกับแผนที่ท้องฟ้า (Sky map) เพื่อประเมินการแผ่รังสีกระจาย ตัวอย่างดังภาพที่ 2-4 ทำซ้ำขั้นตอนในทุกพิกเซลของ DEM เพื่อสร้างแผนที่รังสีดวงอาทิตย์



ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างการคำนวณด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รังสีอาทิตย์  
(ESRI, 2016)

โดยทั่วไป รังสีตรงเป็นรังสีส่วนใหญ่ของรังสีรวมหรือรังสีโลก และรังสีกระจายเป็นรังสีอันดับสอง รังสีสะท้อน (Reflect radiation) มีสัดส่วนเพียงเล็กน้อยของรังสีรวม ยกเว้นบริเวณที่ล้อมรอบด้วยพื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงสูง เช่น บริเวณที่มีหิมะปกคลุม เครื่องมือรังสีของดวงอาทิตย์ใน Spatial Analyst ในซอฟต์แวร์ ArcGIS คำนวณรังสีรวมโดยไม่รวมรังสีสะท้อน ดังนั้น รังสีรวมเป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย โดยมีสมการที่ใช้คำนวณรังสีดวงอาทิตย์ดังนี้

$$Rad_{Glob} = Rad_{Dir} + Rad_{Dif} \quad (2-1)$$

รังสีโลก ( $Rad_{Glob}$ ) คือ ผลรวมของรังสีตรง ( $Rad_{Dir}$ ) และรังสีกระจาย ( $Rad_{Dif}$ )

## 2.1 การคำนวณ Viewshed

Viewshed เป็นข้อมูลแรสเตอร์ (Raster) ที่แสดงท้องฟ้าที่มองเห็นได้หรือถูกบดบังเมื่อมองจากตำแหน่งหนึ่ง ๆ คำนวณโดยการหาจำนวนทิศทางโดยรอบตำแหน่งนั้น ๆ และมุมสูงสุด

ของสิ่งกีดขวางท้องฟ้าหรือมุมขอบฟ้า ในแต่ละพิกเซล (Pixel) ของแรสเตอร์จะได้รับการกำหนดค่าที่สอดคล้องกับทิศทางของท้องฟ้าที่มองเห็นหรือมีสิ่งบดบัง ซึ่งสอดคล้องกับมุมเซนิท (Zenith)  $\theta$  หรือมุมเหนือศีรษะ และมุมแอสซิมาท (Azimuth)  $\alpha$  ซึ่งคือมุมที่วัดจากทิศเหนือจริงตามเข็มนาฬิกาไปยังตำแหน่งเป้าหมาย

## 2.2 การคำนวณ Sun map

รังสีตรงจากดวงอาทิตย์มาจากแต่ละทิศทางของท้องฟ้า คำนวณโดยใช้แผนที่ดวงอาทิตย์ในการแสดงภาพครึ่งวงกลมแบบเดียวกับ Viewshed แผนที่ดวงอาทิตย์เป็นข้อมูลแรสเตอร์ที่แสดงเส้นทางดวงอาทิตย์ (Sun track) หรือตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนผ่านท้องฟ้าซึ่งเปลี่ยนไปตามชั่วโมงของวันและวันต่างๆ ของปี แผนที่ดวงอาทิตย์แยกเป็นส่วน (Sectors) ที่กำหนดโดยตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาระหว่างวัน (ชั่วโมง) และช่วงเวลาของปี (วันหรือเดือน) เส้นทางดวงอาทิตย์คำนวณจากละติจูดของพื้นที่และการกำหนดค่าเวลาในแต่ละส่วนของแผนที่ดวงอาทิตย์ ซึ่งจะระบุค่าที่ไม่ซ้ำกัน พร้อมด้วยตำแหน่งศูนย์กลางของเซนิทและมุมแอสซิมาท รังสีดวงอาทิตย์ที่มาจากแต่ละส่วนของแผนที่ดวงอาทิตย์จะถูกคำนวณแยกจากกัน และ Viewshed จะนำมาซ้อนทับบนแผนที่ดวงอาทิตย์เพื่อคำนวณรังสีตรง โดยมีสมการที่ใช้คำนวณรังสีตรงดังนี้

$$Rad\_Dir = \sum Dir_{\theta, \alpha} \quad (2-2)$$

รังสีตรง ( $Rad\_Dir$ ) เท่ากับผลรวมของรังสีตรงจากแผนที่ดวงอาทิตย์ทั้งหมด ซึ่งรังสีตรงจากแผนที่ดวงอาทิตย์ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของเซนิทและมุมแอสซิมาท ( $Dir_{\theta, \alpha}$ ) ที่มุมเซนิท ( $\theta$ ) และมุมแอสซิมาท ( $\alpha$ ) คำนวณโดยสมการ

$$Dir = ConS \times \beta m(\theta) \times SolDur_{\theta, \alpha} \times SolGap_{\theta, \alpha} \times \cos (AngIn_{\theta, \alpha}) \quad (2-3)$$

เมื่อ  $ConS$  คือ ค่าคงที่รังสีอาทิตย์ (solar constant) มีค่าเท่ากับ  $1.367 \text{ kW/m}^2$

$\beta$  คือ การส่งผ่านของชั้นบรรยากาศ (Transmissivity) ของเส้นทางที่สั้นที่สุด (เฉลี่ยทุกความยาวคลื่น) ในทิศทางของเซนิท

$m(\theta)$  คือ ระยะทางเดินแสงสัมพัทธ์ (Relative optical path length) วัดเป็นส่วนเทียบกับระยะทางเดินแสงจากจุดเซนิท

$SolDur_{\theta, \alpha}$  คือ ระยะเวลาแต่ละส่วนของแผนที่ดวงอาทิตย์

$SolGap_{\theta,\alpha}$  คือ สัดส่วนของท้องฟ้าที่มองเห็นได้ (Gap fraction) ของแต่ละส่วนของแผนที่ดวงอาทิตย์

$AngIn_{\theta,\alpha}$  คือ มุมตกกระทบระหว่างตำแหน่งศูนย์กลางของส่วนของท้องฟ้ากับแกนตั้งฉากกับพื้นผิว

### 2.3 การคำนวณ Sky map

รังสีกระจายมาจากทุกทิศทางของท้องฟ้าที่เป็นผลจากการกระเจิงของส่วนประกอบในชั้นบรรยากาศ (เมฆ อนุภาค และอื่นๆ) ในการคำนวณรังสีกระจาย แผนที่ท้องฟ้าถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงภาพครึ่งวงกลมของท้องฟ้าทั้งหมด โดยแบ่งเป็นชุดของส่วนท้องฟ้า (Series of sky sectors) ที่กำหนดด้วยมุมเซนิทและมุมแอซิมัท แต่ละส่วนถูกกำหนดค่าที่ไม่ซ้ำกัน พร้อมด้วยตำแหน่งศูนย์กลางของเซนิทและมุมแอซิมัท รังสีกระจายถูกคำนวณสำหรับแต่ละส่วนของท้องฟ้าตามทิศทางเซนิทและแอซิมัท และ Viewshed จะนำมาซ้อนทับบนแผนที่ท้องฟ้าเพื่อคำนวณรังสีกระจาย โดยมีสมการที่ใช้คำนวณรังสีกระจายดังนี้

$$Rad\_Dif = \sum Dif_{\theta,\alpha} \quad (2-4)$$

รังสีกระจาย ( $Rad\_Dif$ ) คือ ผลรวมของรังสีกระจายจากแผนที่ท้องฟ้าทั้งหมด ซึ่งรังสีกระจายจากแผนที่ท้องฟ้าที่ตำแหน่งศูนย์กลางของเซนิทและมุมแอซิมัท ( $Dif_{\theta,\alpha}$ ) ที่มุมเซนิท ( $\theta$ ) และมุมแอซิมัท ( $\alpha$ ) คำนวณโดยสมการ

$$Dif = Rglo \times Pfr \times Dur \times SkyGap_{\theta,\alpha} \times Weight_{\theta,\alpha} \times \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (2-5)$$

เมื่อ  $Rglo$  คือ รังสีโลกปกติ

$Pfr$  คือ สัดส่วนของรังสีโลกปกติที่ฟุ้งกระจาย โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.2 สำหรับสภาพท้องฟ้าโปร่ง และ 0.7 สำหรับสภาพท้องฟ้าที่มีเมฆมาก

$Dur$  คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์

$SkyGap_{\theta,\alpha}$  คือ สัดส่วนของท้องฟ้าที่มองเห็นได้ (Gap fraction) ของแต่ละส่วนของท้องฟ้า

$Weight_{\theta,\alpha}$  คือ สัดส่วนของรังสีกระจายในส่วนท้องฟ้าที่กำหนดเทียบกับทั้งหมดทุกส่วน

$\text{Angln } \theta, \alpha$  คือ มุมตกกระทบระหว่างตำแหน่งศูนย์กลางของส่วนของท้องฟ้ากับพื้นผิว

### 3. การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องตรงมายังโลก แม้ว่าชั้นบรรยากาศจะดูดซับและสะท้อนรังสีเหล่านี้ แต่ก็ยังมีพลังงานจำนวนมากที่มาถึงพื้นผิวโลก ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่กระทบพื้นโลกแตกต่างกันไปตามภูมิภาค ฤดูกาล เวลาของวัน สภาพภูมิอากาศและมลพิษทางอากาศ เมื่อรังสีดวงอาทิตย์มาถึงโลกจะมีการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอในแต่ละภูมิภาค โดยพื้นที่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรจะได้รับรังสีแสงอาทิตย์มากกว่าบริเวณอื่น ๆ ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นกับความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ส่องมาที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ 1) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand-alone system) 2) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (PV grid connected system) และ 3) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV hybrid system) ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการศึกษาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า การทำงานของระบบจะเกิดขึ้นเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้บนหลังคา เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงออกมาไหลผ่านตัวควบคุมเข้าสู่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับผ่านมิเตอร์ผลิตไฟฟ้า จ่ายเข้าระบบไฟฟ้าภายในอาคาร ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปิดใช้ภายในอาคารใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าส่วนที่เกินนั้นจะจ่ายผ่านมิเตอร์ขายไฟฟ้าคืนให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แต่ในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือมีการเปิดใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าส่วนที่ขาดจะถูกซื้อเข้ามาจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยผ่านมิเตอร์ซื้อไฟฟ้าตามปกติ

อุปกรณ์ที่สำคัญในระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ มีส่วนประกอบดังนี้

3.1.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ไฟฟ้าที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า

โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกันพลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำจึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งาน แรงแเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเซลล์เดียวจะมีค่าต่ำมาก การนำมาใช้งานจะต้องนำเซลล์หลายๆ เซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงขึ้น เซลล์ที่นำมาต่อกันในจำนวนและขนาดที่เหมาะสมเรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar module หรือ Solar panel) การทำเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นแผงก็เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน ด้านหน้าของแผงเซลล์ ประกอบด้วย แผ่นกระจกที่มีส่วนผสมของเหล็กดำมีคุณสมบัติในการยอมให้แสงผ่านได้ดีและยังเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์อีกด้วย แผงเซลล์จะต้องมีการป้องกันความชื้นที่ดีมากเพราะจะต้องอยู่กลางแจ้งเป็นเวลายาวนานในการประกอบจะต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนและป้องกันความชื้นที่ดี เช่น ซิลิโคน และอีวีเอ (Ethelene vinyl acetate) เพื่อเป็นการป้องกันแผ่นกระจกด้านบนของแผงเซลล์จึงต้องมีการทำกรอบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง

องค์ประกอบหลักในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic) ในท้องตลาดมีเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ 3 ชนิดหลัก ๆ คือ โมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline) โพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) และฟิล์มบาง (Thin film) ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรืออัตราการแปลงผัน หมายถึง จำนวนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ามาจะถูกแปลงผันเป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 11-15 หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงตามอายุการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 0.5 ทุก ๆ ปี ผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์มักเสนอการรับประกันว่าการจ่ายพลังงานจะสูงกว่าร้อยละ 80 หลังจาก 25 ปี

3.1.2 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current: AC) ซึ่งถูกนำมาใช้กับระบบโซลาร์เซลล์ โดยรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากนั้นก็แปลงเป็นกระแสสลับไปยังโหลดต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้งานหรือขายให้แก่การไฟฟ้า ในกระบวนการแปลงกระแสไฟฟ้านี้จะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น ในการแปลงพลังงานไฟฟ้านั้นพลังงานกระแสตรงเรียกว่าด้านอินพุตและพลังงานของกระแสสลับเรียกว่าด้านเอาต์พุต พลังงานที่ออกมาด้านเอาต์พุตจะไม่เท่ากับอินพุตเนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เช่น เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพร้อยละ 92

หมายความว่า เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ารับกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าด้านอินพุต 1,000 W กำลังของกระแสสลับที่เหลือจากการแปลงในด้านเอาต์พุต คือ 920 W

ในอดีตเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีการพัฒนาน้อยมาก ส่งผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ มีราคาแพงและมีประสิทธิภาพต่ำ ปัจจุบันผู้ผลิตมีการคิดค้นพัฒนาเทคโนโลยีและมีการแข่งขันกันมากขึ้น ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ต้นทุนต่อหน่วยของผู้ลงทุนจะลดลงซึ่งจะเพิ่มโอกาสให้ผู้ลงทุนมีความคุ้มค่ามากขึ้น และการติดตั้งระบบขนาดใหญ่คือมีกำลังการผลิตติดตั้งมาก เช่น กรณีติดตั้งบนอาคาร จะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยของผู้ลงทุนต่ำกว่าการติดตั้งระบบขนาดเล็ก นอกจากนี้ ปัจจัยทางด้านเทคนิคเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ประสิทธิภาพของแผง และสมรรถนะระบบ ก็เป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณผลประโยชน์ของโครงการ (ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์, 2557)

### 3.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ มีวิธีการคำนวณได้ดังสมการที่ 2-6 (Pop & Grama, 2021)

$$E = A \times R \times H \times PR \quad (2-6)$$

- เมื่อ E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง: kWh)
- A คือ ขนาดพื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ตารางเมตร: m<sup>2</sup>)
- R คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
- H คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร: kWh/m<sup>2</sup>)
- PR คือ อัตราส่วนสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย (มีค่าระหว่าง 0.5-0.9)

### 3.3 การประเมินความต้องการพลังงานไฟฟ้า

ความต้องการพลังงานของระบบไฟฟ้าขึ้นอยู่กับโหลดภายในระบบโหลด คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าใด ๆ ที่ใช้ในบ้านหรือสำนักงาน การประเมินความต้องการพลังงานไฟฟ้าหรือการประเมินโหลด มีวิธีในการพิจารณาระดับกำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านหรือสำนักงานดังนี้

3.3.1 การประเมินความต้องการพลังงานด้วยการอ่านโดยตรงบนป้ายชื่อบนเครื่องใช้ไฟฟ้า ตัวอย่างการคำนวณความต้องการพลังงานรายวันสำหรับโทรทัศน์ โดยตรวจสอบการใช้กำลังไฟฟ้าของโทรทัศน์ โดยปกติจะอยู่ในแผ่นป้ายที่ด้านหลัง เช่น อ่านได้ 68 วัตต์ ระยะเวลาใช้งาน 3 ชั่วโมงต่อวัน ความต้องการพลังงานรายวัน ( $E_{\text{daily}}$ ) สำหรับโทรทัศน์ คือ  $68 \text{ วัตต์} \times 3 \text{ ชั่วโมง} = 204 \text{ วัตต์ชั่วโมง}$  ทำซ้ำกับเครื่องใช้ไฟฟ้าในแต่ละประเภท

3.3.2 การประเมินความต้องการพลังงานด้วยการวัดแรงดันและกระแสโดยตรงโดยใช้มัลติมิเตอร์เพื่อตรวจสอบกำลังไฟฟ้า

3.3.3 การประเมินความต้องการพลังงานโดยตรงด้วยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (meter) เป็นข้อมูลการใช้ไฟฟ้า (Load profile) ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลจากเครื่องวัดอัตโนมัติในเขตจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นการตรวจวัดการใช้พลังงานซ้ำ ๆ กันอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง ๆ เช่น ทุกชั่วโมง หรือทุก 15 นาที สามารถคำนวณเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในช่วง 15 นาทีนั้นได้ ค่าเฉลี่ยลักษณะการใช้ไฟฟ้าจะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละเดือน

3.3.4 ระบบอ่านหน่วยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ (Automatic meter reading: AMR) ระบบ AMR เป็นระบบการอ่านหน่วยมิเตอร์แบบอัตโนมัติผ่านระบบสื่อสารชนิดต่าง ๆ และนำข้อมูลที่อ่านได้ทั้งหมดเก็บที่ AMR data center เพื่อใช้ในการพิมพ์ใบแจ้งค่าไฟฟ้า ลูกค้าสามารถตรวจสอบและดาวน์โหลดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าผ่าน AMR Website คุณสมบัติของระบบ AMR คือ สามารถแสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้าทุก 15 นาทีตามช่วงเวลา เช่น รายวัน รายสัปดาห์ รายเดือน รายปี และตามช่วงเวลาที่กำหนด สามารถเปรียบเทียบข้อมูลการใช้ไฟฟ้า ณ วันเวลาใดเวลาหนึ่งตามที่ต้องการ ประโยชน์ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับจากการติดตั้งมิเตอร์ระบบ AMR คือ สามารถนำข้อมูลการใช้ไฟฟ้าไปบริหารจัดการ (Demand side management) ของตนเองให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ทั้งนี้ ในการคำนวณผลประหยัดที่ได้จากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะคำนวณโดยเปรียบเทียบระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงเวลาเดียวกัน

## การสร้างแบบจำลองความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ

การผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับรังสีดวงอาทิตย์และคุณสมบัติทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง ดังนั้นการประเมินไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์จึงต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมาก เช่น เส้นทางการเดินทางของดวงอาทิตย์ สภาพบรรยากาศ กระบวนการกระจายของแสง เพื่อให้การวิเคราะห์และประมวลผลเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตามค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ยังมีได้ถือเป็นข้อมูลหลักในทางอุตุนิยมวิทยาเหมือนข้อมูลอื่น ๆ ในปัจจุบัน เช่น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน จึงยังไม่มีข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในบางพื้นที่ โดยค่าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งตกกระทบลงบนพื้นที่หนึ่งสามารถคาดการณ์ได้โดยอาศัยเครื่องมือต่าง ๆ ที่มีอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน เช่น ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) หรืออาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียม นอกจากนี้การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction: NWP) ยังสามารถใช้ประเมินค่าความเข้มแสงอาทิตย์ได้อีกด้วย เครื่องมือเหล่านี้จะสามารถทำงานและวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างแม่นยำ จำเป็นจะต้องมีฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ได้จากการรวบรวมจากสถานีตรวจวัดต่าง ๆ ครอบคลุมพื้นที่ในระดับภูมิภาคมาไว้ในฐานข้อมูลส่วนกลาง (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2562)

การนำ GIS มาใช้ประเมินรังสีดวงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้ข้อมูลความสูงภูมิประเทศ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศมีผลกระทบต่อศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ และสภาพแวดล้อมที่สร้างขึ้นในเมืองก็มีผลกระทบต่อศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของอาคารในเขตเมืองด้วย โดย สมาคมการสำรวจและการแผนที่แห่งประเทศไทย (2556) ได้อธิบายเกี่ยวกับค่าความสูงภูมิประเทศว่า ค่าความสูงภูมิประเทศสามารถแยกออกได้เป็นค่าความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model: DSM) และค่าความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (Digital Elevation Model: DEM) ซึ่งทั้ง DSM และ DEM จะอ้างอิงกับระดับน้ำทะเลปานกลาง สำหรับ DSM คือค่าความสูงบนพื้นผิวที่ปกคลุมพื้นผิวภูมิประเทศที่แท้จริง เช่น ค่าระดับสูงบนเรือนยอดของต้นไม้ หรือค่าระดับสูงบนหลังคาบ้าน เนื่องจากการรังวัดจากอากาศยานไม่สามารถสังเกตเห็นพื้นผิวดินที่แท้จริงได้ ส่วน DEM คือค่าความสูงพื้นผิวพื้นดินของภูมิประเทศที่แท้จริงที่แสดงผลในแผนที่ภูมิประเทศด้วยเส้นชั้นความสูง ในบริเวณพื้นที่เปิดโล่งค่าความสูง DSM จะมีค่าเท่ากับค่าความสูง DEM แต่ในบริเวณพื้นที่ที่มีสิ่งปกคลุมพื้นดินนั้นค่าความสูง DSM จะมีค่าสูงกว่าค่าความสูง DEM

### 1. การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2559)

การพัฒนาเทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันมีการนำมาใช้ในงานการสำรวจด้วย

ภาพถ่าย (Photogrammetry) ด้วยการติดกล้องถ่ายภาพดิจิทัลทั่วไปเพื่อทำการถ่ายภาพและนำมาประมวลผลภาพ ซึ่งให้ผลลัพธ์ 3 ลักษณะ คือ แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ (Orthophoto) แบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model: DSM) และแบบจำลองสามมิติ (3D model) การใช้ UAV ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายนั้นเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากมีพิสัยการบินครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1-5 ตารางกิโลเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดและระบบของ UAV ขณะที่ UAV ต้นทุนต่ำมีการพัฒนาที่ดีขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลดลง และมีประสิทธิภาพในการผลิตผลลัพธ์ที่สามารถให้ความถูกต้องทางตำแหน่งสูงขึ้นในระดับน้อยกว่า 10 เซนติเมตรได้ ทั้งนี้ ผู้ใช้ต้องมีการวางแผนการบินอย่างเหมาะสม รวมทั้งมีความเข้าใจในหลักการและวิธีการประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์สำหรับงานสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ โดยเฉพาะของอากาศยานไร้คนขับ หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่า "โดรน" (Drone) ที่ใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายนั้น มักจะเรียกเป็น UAV ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ 1) ประเภทปีกหมุน (Multirotor) ที่มีลักษณะการทำงานแบบเดียวกับเฮลิคอปเตอร์ โดยมีใบพัดแวนอนมากกว่า 2 ใบ เช่น 3 4 6 และ 8 ใบ และ 2) ประเภทปีกยัด (Fixed wing) มีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องบินทั่วไป มีขนาดเล็กและอาจมีการลดองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องลง ขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิตระบบอากาศยานไร้คนขับ

ระบบอากาศยานไร้คนขับสำหรับงานสำรวจด้วยภาพถ่าย (UAV Photogrammetry) ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ตัวอากาศยาน (Platform) ระบบควบคุมการบินอัตโนมัติ (Autopilot) ระบบบันทึกภาพ (Sensor) และซอฟต์แวร์ประมวลผล ระบบควบคุมการบินอัตโนมัติถือเป็นส่วนสำคัญที่สุด ประกอบด้วย หน่วยประมวลผล GPS และ IMU (Inertial Measurement Unit) เนื่องจากในการควบคุมการบินต้องมีระบบวิหิตควบคุมระยะไกลระหว่างสถานีฐานและตัวอากาศยาน จึงต้องมีระบบโปรแกรมวางแผนการบินสำหรับการถ่ายภาพให้เป็นไปตามข้อกำหนดการถ่ายภาพที่ต้องการ ได้แก่ ส่วนซ้อนของภาพถ่าย และส่วนเกยของภาพถ่าย การกำหนดวิธีการบินถ่ายภาพ จะใช้ข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่ได้จากการวางแผนการบินเป็นตัวกำหนดการบินของ UAV และการถ่ายภาพของระบบบันทึกภาพ ด้วยวิธีการกำหนดช่วงเวลาถ่ายภาพ หรือสั่งถ่ายภาพด้วยคำสั่งจากระบบควบคุมการบินอัตโนมัติ เมื่อถึงตำแหน่งพิกัดที่ต้องถ่ายภาพพร้อมทั้งมีการบันทึกตำแหน่งพิกัดและค่าความเอียงของภาพแต่ละภาพที่ถ่าย ผลผลิตของการสำรวจด้วยภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับมี 3 ลักษณะ คือ 1) แผนที่ภาพถ่าย คือ ภาพถ่ายที่ผ่านกระบวนการตัดแก้ให้มีคุณสมบัติเหมือนภาพจริง มีรายละเอียดทุกอย่างที่บันทึกได้ มีความถูกต้องสูง 2) กลุ่มข้อมูลจุดพิกัด 3 มิติ คือ ข้อมูลจุดพิกัด 3 มิติจำนวนมาก ซึ่งเป็นตำแหน่งจุดต่าง ๆ บนพื้นผิว โดยแต่ละจุดจะมีค่าสีจากการถ่ายภาพในแบบ

RGB และ 3) แบบจำลอง 3 มิติ คือ ภาพแบบจำลอง 3 มิติเหมือนจริง สร้างจากกลุ่มข้อมูลจุด 3 มิติ และใส่รายละเอียดของภาพถ่าย

สำหรับการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ เพื่อสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศสำหรับใช้ประเมินความเข้มแสงอาทิตย์ครั้งนี้ มีการวางแผนการบิน การสร้างจุดควบคุมภาพถ่าย การถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ และการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ เป็นไปตามมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2561) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

## 2. การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

เพื่อควบคุมความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์ของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ขั้นตอนการวางแผนการบินเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากการกำหนดพารามิเตอร์ของการวางแผนการบินจะต้องสอดคล้องกับความถูกต้องที่ต้องการ ซึ่งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการวางแผนการบินประกอบด้วย

**2.1 ความสูงบิน** ความสูงบินเป็นส่วนสำคัญของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากความสูงบินที่ต่ำลงจะได้ความละเอียดของภาพถ่ายสูงขึ้น สามารถผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งที่มีความถูกต้องมากขึ้น แต่ต้องใช้เวลาบินนานขึ้นเพื่อให้ได้ภาพที่มีส่วนซ้อนและส่วนเกยเท่าเดิม นอกจากระยะเวลาในการบินเพิ่มขึ้นแล้วยังต้องคำนึงถึงจำนวนภาพที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการประมวลผล ดังนั้น นอกจากจะต้องระวังเรื่องความสูงของสภาพพื้นที่แล้ว ระดับสูงบินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยสามารถคำนวณระดับสูงบินได้จากสมการที่ 2-7

$$H = \frac{GSD \times f \times IW}{SW \times 100} \quad (2-7)$$

เมื่อ H (Flight Height) คือ ความสูงการบินเหนือจุดขึ้นบิน หน่วย เมตร

GSD คือ ระยะพื้นที่ต่อพิกเซล หน่วย เซนติเมตรต่อพิกเซล

SW (Sensor Width) คือ ระยะด้านกว้างของเซนเซอร์ หน่วย มิลลิเมตร

f (Focal Length) คือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ หน่วย มิลลิเมตร

IW (Image Width) คือ จำนวนพิกเซลด้านกว้าง หน่วย พิกเซล

**2.2 GSD** การกำหนดค่า GSD ขึ้นกับความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการ โดยมีการกำหนดความถูกต้องในงานแผนที่ งานสำรวจ งานออกแบบ งานก่อสร้าง งานระบบ และงานบริหารจัดการทางด้านสารสนเทศ เป็นต้น แบ่งตามประเภทกิจกรรมหรือการใช้งานตามมาตรฐาน FGDC (Geospatial Positioning Accuracy Standards PART 4: Standards for Architecture, Engineering, Construction (A/E/C) and Facility Management National) ซึ่งมาตรฐานนี้จะระบุค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งทั้งในแนวราบและในแนวตั้งของงานทางด้านวิศวกรรม เพื่อสนับสนุนการนำข้อมูลแผนที่หรือข้อมูลเชิงตำแหน่งมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลอาจได้มาจากข้อมูลภูมิศาสตร์ ข้อมูลดาวเทียม หรือข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาประมวลผลเป็นข้อมูลเชิงตำแหน่งและแผนที่

**2.3 ส่วนซ้อนและส่วนเกย** การกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยสำหรับการวางแผนการบินในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับนั้น มีความแตกต่างกับการสำรวจด้วยภาพถ่ายแบบดั้งเดิม เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับมีขนาดเล็กและไม่สามารถควบคุมความเร็วและทิศทางการบินได้อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการถ่ายภาพ ดังนั้น หากกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยน้อยเกินไปอาจทำให้ภาพที่ถ่ายไม่สามารถต่อกันได้ การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับจะต้องกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยดังนี้

2.3.1 ส่วนซ้อนหรือพื้นที่ที่ทับกันอยู่ของภาพประชิดในแนวนอน กำหนดให้การถ่ายภาพมีส่วนซ้อนกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 75

2.3.2 ส่วนเกยหรือพื้นที่ที่ทับกันอยู่ระหว่างแนวนอนที่ประชิดกัน กำหนดให้การถ่ายภาพมีส่วนเกยกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 60

**2.4 รูปแบบการบิน** การวางแผนรูปร่างของบล็อกการบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยทั่วไปจะกำหนดให้บินถ่ายในลักษณะบล็อกสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้โครงข่ายมีความแข็งแรงและลดจำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย โดยสามารถเลือกรูปแบบการบินได้ คือ รูปแบบการบินแบบทั่วไป และรูปแบบการบินแบบกริด

ภาพถ่ายที่ได้จากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเป็นส่วนสำคัญต่อการประมวลผลภาพถ่าย ดังนั้นจะต้องถ่ายภาพให้ได้ภาพที่มีคุณภาพที่ดีและมีความคมชัดที่สุด โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการถ่ายภาพดังนี้

**2.5 สภาพอากาศ** กล้องถ่ายภาพในปัจจุบันมีความสามารถในการจัดการกับแสงและเงาได้ดี แต่การบินในสภาพอากาศที่ไม่ดี ก็อาจทำให้คุณภาพของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้ลดลงหรือต้องใช้เวลาในการปรับค่าภาพถ่ายมากขึ้น ดังนั้น สภาพอากาศที่ดีควรมีปัจจัยที่เหมาะสมดังนี้

2.5.1 มุมรังสีดวงอาทิตย์ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดเงาของสิ่งแวดล้อมภายในโครงการ ดังนั้น การถ่ายภาพต้องถ่ายเมื่อดวงอาทิตย์อยู่สูงกว่า 45 องศาจากพื้น หรือช่วงเวลาที่เหมาะสมคือ 9.00 น. ถึง 15.00 น. ภายใต้สภาวะแสงที่ไม่ทำให้เกิดความเปรียบต่างสีของแสงและเงาอย่างชัดเจน

2.5.2 การปกคลุมของเมฆ แม้ว่าการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ส่วนใหญ่จะทำการบินต่ำกว่าเมฆ แต่หากบริเวณโครงการมีเมฆปกคลุมหนาจนทำให้เกิดเงาได้ ก็ควรหลีกเลี่ยงการบินถ่ายภาพ ณ ขณะนั้น

2.5.3 สภาพอากาศเหนือพื้นดิน การสำรวจทุกครั้งจำเป็นต้องรู้สภาพพื้นที่โดยรวม เช่น โอกาสการเกิดหมอกควันที่มีผลต่อการถ่ายภาพ หรือแม้กระทั่งสภาพพื้นหลังฝนตกก็อาจเป็นเหตุให้คุณภาพของภาพถ่ายทางอากาศลดลง ให้หลีกเลี่ยงการบินขณะสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม

**2.6 การตั้งค่าการถ่ายภาพ** ภาพถ่ายทางอากาศที่นำไปใช้ในการประมวลผลจะต้องมีคุณภาพที่ดี คุณสมบัตินี้พื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการถ่ายภาพให้มีความคมชัดและมีสีที่ถูกต้อง จึงต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ในการถ่ายภาพที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของพื้นที่ โดยทั่วไปการตั้งค่าการถ่ายภาพ ประกอบด้วย

2.6.1 รูรับแสง มีผลต่อความชัดลึกของภาพและปริมาณแสงที่ได้รับ โดยการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ต้องถ่ายภาพที่มีความแปรผันของความสูงในพื้นที่โครงการมากจะต้องคำนึงถึงขนาดของรูรับแสงมาก สำหรับรูรับแสงที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพทางอากาศไม่ควรน้อยกว่า  $f/5.6$  หรือช่วงรูรับแสงที่ดีที่สุดของเลนส์ที่ใช้

2.6.2 ความเร็วชัตเตอร์ ความเร็วชัตเตอร์จะต้องมีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้เกิดความเบลอของภาพเนื่องมาจากอากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่

2.6.3 ค่าความไวแสง การตั้งค่าความไวแสงคือการเพิ่มหรือลดค่าปริมาณแสงที่เข้าสู่กล้อง ทั้งนี้การเพิ่มค่าความไวแสงจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกับภาพที่บันทึก ซึ่งมีผลกับการประมวลผลภาพถ่าย ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับคุณภาพของกล้องที่สามารถลดสัญญาณรบกวนได้เมื่อต้องตั้งค่าความไวแสงที่สูงขึ้น

2.6.4 ค่าสมดุลแสงขาว การถ่ายภาพที่เวลาแตกต่างกัน ปริมาณแสงไม่เท่ากัน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับค่าสมดุลแสงขาวให้ถูกต้องและตรงกันตลอดระยะเวลาในการสำรวจ

2.6.5 ขนาดของภาพหรือสัดส่วนของภาพด้านกว้างต่อด้านยาว จะต้องมีส่วนสูงที่สุดที่กล้องให้ได้ ซึ่งกล้องบันทึกภาพในปัจจุบันสัดส่วนที่ใช้และมีจำนวนพิกเซลสูงที่สุดอยู่ที่ 3:2

**2.7 คุณภาพของภาพถ่าย** ภาพถ่ายเป็นข้อมูลตั้งต้นของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ การตรวจวัดคุณภาพของภาพถ่ายก่อนนำไปประมวลผลเป็นขั้นตอนที่ต้องให้ความสำคัญเมื่อบินถ่ายภาพเสร็จทุกครั้ง โดยคุณภาพหลักของการตรวจสอบ ได้แก่

2.7.1 ความคมชัด (Sharpness) รายละเอียดต่าง ๆ ของภาพต้องมีความคมชัด โดยภาพจะต้องโฟกัสได้ในระยะที่ต้องการ และความชัดลึกครอบคลุมความสูงที่ปรากฏในพื้นที่โครงการ และภาพจะต้องไม่เบลอนั้นเนื่องจากความเร็วของอากาศยานไร้คนขับที่มากกว่าความเร็วชัตเตอร์ที่ใช้ได้

2.7.2 ความสว่าง (Brightness) ภาพที่ได้จากการถ่ายทุกครั้งต้องมีความสว่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งภาพ ทั้งนี้กล้องถ่ายภาพในปัจจุบันสามารถตั้งค่าความไวแสงได้อย่างเหมาะสมโดยง่าย โดยใช้การวัดแสงแบบเฉลี่ยทั้งพื้นที่เพื่ตั้งค่าการถ่ายภาพก่อนบินทุกครั้ง

2.7.3 ความชัดเจน (Clarity) การถ่ายภาพในช่วงเวลาที่มีแสงน้อยจำเป็นต้องเพิ่มความไวแสงเพื่อให้ภาพมีความสว่างอย่างเหมาะสม แต่ค่าความไวแสงที่สูงขึ้นย่อมทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (noise) บนภาพมากยิ่งขึ้น หากจำเป็นต้องนำภาพที่มีสัญญาณรบกวนไปใช้ในการประมวลผลสามารถนำภาพไปปรับลดสัญญาณรบกวนในซอฟต์แวร์ปรับแต่งภาพได้

2.7.4 ความถูกต้องของสี (Color accuracy) สีของภาพจะต้องใกล้เคียงกับสีจริงมากที่สุด ทั้งนี้หากขณะบินถ่ายภาพมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงอาจส่งผลกระทบต่อค่าสมดุลแสงขาวที่ตั้งไว้ในตอนแรกทำให้การตรวจสอบสีของภาพมีความสำคัญและจำเป็นต้องปรับสีให้ถูกต้องก่อนนำไปประมวลผล

### 3. การสร้างจุดควบคุมภาพถ่าย

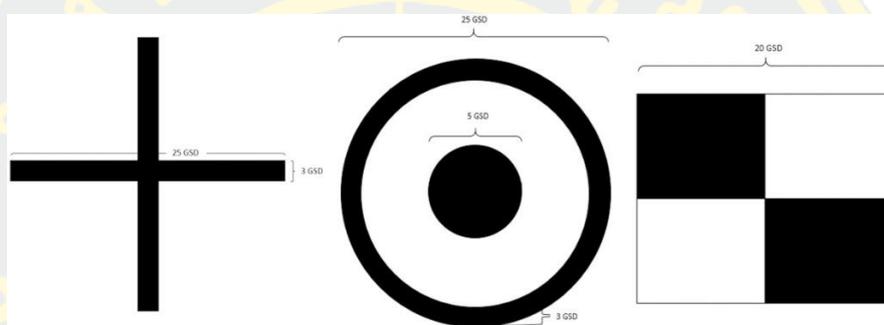
การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับจำเป็นต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายเพื่อประมวลผลปรับแก้ และคำนวณค่าองค์ประกอบภายนอกของภาพ ค่าการวางตัวของภาพถ่าย ดังนั้น จุดควบคุมภาพถ่ายจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพการผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งให้ถูกต้อง หลักการในการสร้างจุดควบคุมภาพถ่าย ได้แก่ การสร้างจุดควบคุมภาพถ่ายให้เห็นได้เด่นชัดบนภาพ การรังวัดค่าพิกัดที่สามารถนำมาโยนยัดภาพถ่ายได้ถูกต้องตามแผนที่วางไว้ และการกำหนดตำแหน่งเพื่อให้จุดควบคุมภาพถ่ายมีจำนวนและการกระจายตัวที่เหมาะสมครอบคลุมทั้งพื้นที่

**3.1 การสร้างจุดควบคุมภาพถ่าย** จุดควบคุมภาพถ่ายที่ดีจะต้องมองเห็นและสามารถรังวัดได้บนภาพถ่าย และสามารถหมายตำแหน่งจุดกึ่งกลางของจุดควบคุมภาพถ่ายได้โดยจุดควบคุมภาพ 1 จุด จะต้องปรากฏบนภาพอย่างน้อย 9 รูป โดยจุดควบคุมภาพถ่ายต้องมีสีตัดกับพื้นของภูมิ

ประเทศโดยรอบ ซึ่งมีรูปแบบเช่น รูปกากบาท รูปวงกลม หรือรูปสี่เหลี่ยม โดยใช้วิธีการทาสีที่ติดกับสีของภูมิประเทศโดยรอบหรือการใช้วัสดุอื่น ๆ ที่เป็นแผ่นสามารถถอดเก็บได้ โดย

3.1.1 รูปกากบาทหรือวงกลมที่เหมาะสมสามารถมองเห็นได้ชัด จะต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 25 เท่าของ GSD และมีความหนาของเส้นไม่น้อยกว่า 3 เท่าของ GSD (ภาพที่ 2-5)

3.1.2 รูปสี่เหลี่ยมที่สามารถวัดจุดโดยยึดบนภาพได้อย่างแม่นยำ จะต้องมีส่วนตัดกันของสีเป็นตารางหมากรุก และต้องมีขนาดด้านกว้างและด้านยาวไม่น้อยกว่า 20 เท่าของ GSD ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-5 รูปแบบของจุดควบคุมภาพถ่ายรูปกากบาท รูปวงกลมและรูปสี่เหลี่ยม (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2561)

### 3.2 การรังวัดจุดควบคุมภาพถ่าย

เทคโนโลยีด้านการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีการกำหนดคำเฉพาะขึ้นมาซึ่งมีชื่อว่า Global Navigation Satellite System หรือเรียกโดยย่อว่า GNSS เพื่อให้ครอบคลุมกว้างมากขึ้นโดยไม่ได้จำกัดเฉพาะระบบดาวเทียม GPS เพียงระบบเดียว ยังมีระบบดาวเทียมที่สร้างโดยประเทศรัสเซียอย่างระบบ GLONASS และระบบดาวเทียม GALILEO โดยกลุ่มประเทศในยุโรป ก็เป็นส่วนหนึ่งของระบบ GNSS ด้วย นอกจากนี้ GNSS ยังเพิ่มประสิทธิภาพของระบบดาวเทียมที่มีด้วยการใช้การใช้เครื่องส่งสัญญาณดาวเทียมภาคพื้นดิน (Pseudolite) และการใช้ Navigation system มาเป็นส่วนหนึ่งของระบบ GNSS ด้วย โดยหลักการและวิธีทำงานรังวัดด้วย GPS แบ่งเทคนิคการรังวัดหาค่าพิกัดด้วย GPS ออกเป็น 2 ลักษณะ (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552) คือ

3.2.1 การหาค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยว (Single point positioning) เรียกวิธีการหาค่าพิกัดแบบจุดเดี่ยวโดยย่อว่า SPP วิธีนี้เป็นการใช้เครื่องรับสัญญาณเพียง 1 เครื่อง ไปวางตรงจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด โดยทั่วไปจะใช้ข้อมูลสุโดเรนจ์มาประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดแบบทันทีซึ่งข้อมูล

โดเรนจ์เป็นข้อมูลพื้นฐานที่รับได้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสทุกชนิด ดังนั้นจึงนิยมใช้เครื่องรับสัญญาณแบบมือถือ (Handheld receiver) มาหาค่าพิกัดในลักษณะนี้เนื่องจากมีราคาถูก ส่วนค่าความถูกต้องที่ได้รับจากวิธีการนี้จะอยู่ระหว่าง 10-20 เมตร

3.2.2 การหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ (Relative positioning) วิธีนี้เป็นการใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งจะวางอยู่ที่จุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว เช่น หมุดหลักฐานกรมที่ดิน หรือหมุดหลักฐานกรมแผนที่ทหาร เป็นต้น ส่วนเครื่องรับอีกเครื่องจะถูกนำไปวางตรงจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ผลที่ได้จากการทำงานในลักษณะนี้คือตำแหน่งเปรียบเทียบของจุดหนึ่งเทียบกับอีกจุดหนึ่งหรือเป็นเส้นฐานที่มีทิศทางระหว่างจุดที่นำเครื่องรับทั้งสองไปวาง วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมาประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัด ในกรณีที่ใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ในการหาค่าพิกัด โดยทั่วไปเรียกวิธีนี้ว่า Pseudorange-based Differential GPS (DGPS) ค่าความถูกต้องที่ได้รับจากวิธีนี้อยู่ระหว่าง 0.5-5 เมตร และกรณีที่ใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการหาค่าพิกัดค่าความถูกต้องที่ได้รับจะอยู่ระหว่าง 1-5 เซนติเมตร ซึ่งการใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมาคำนวณหาค่าพิกัดนั้นจะใช้ได้กับเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดเท่านั้น วิธีการรังวัดในสนามของเทคนิคการหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งที่ใช้กันในปัจจุบันแบ่งเป็นวิธีต่าง ๆ ได้ดังนี้

3.2.2.1 วิธีการรังวัดแบบสถิต (Static survey) วิธีนี้ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งจะวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้วหรือสถานีฐาน ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดหรือสถานีจร วิธีนี้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีจรจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน อย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งอยู่กับที่เป็นระยะเวลาหนึ่งๆ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1-2 ชั่วโมง วิธีการนี้เป็นวิธีที่ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุด โดยเริ่มตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร-2.5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 20 กิโลเมตร)

3.2.2.2 วิธีการรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid static survey) วิธีการทำงานของวิธีนี้เหมือนกับวิธีการรังวัดแบบสถิตทุกประการ เพียงแต่ระยะเวลาในการรับสัญญาณจะสั้นลงเหลือประมาณ 10-20 นาที วิธีการนี้จะให้ค่าความถูกต้องระหว่าง 1-3 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร)

3.2.2.3 วิธีการรังวัดแบบจลนในทันที (Real time kinematic survey) วิธีการนี้เรียกโดยย่อว่า RTK ซึ่งหลักการทำงานของวิธีการรังวัดหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ด้วยวิธีการทำงานแบบจลนในทันทีนั้นคล้ายกับวิธีการแบบสถิต คือ ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่องโดยเครื่องที่หนึ่งถูกวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่

ต้องการทราบค่าพิกัด แต่กรณีของวิธีการหาค่าพิกัดแบบจลน์ในพื้นที่นั้นสามารถเคลื่อนย้ายเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่สองได้เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารระหว่างเครื่องรับทั้งสอง ซึ่งอาจเป็นเครื่องรับและส่งคลื่นวิทยุหรือโทรศัพท์มือถือ การหาค่าพิกัดของตำแหน่งจุดต่าง ๆ ด้วยวิธีนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีจรต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง และเครื่องรับสัญญาณที่ใช้จะต้องเป็นเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่เท่านั้น วิธีการนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1-5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร)

จากเทคนิคการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยจีพีเอสแบบต่าง ๆ ข้างต้น สามารถสรุปรายละเอียดของวิธีการรังวัดในสนาม อุปกรณ์เครื่องมือที่ต้องใช้ และค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่คาดว่าจะได้รับ ได้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 รายละเอียดเทคนิคการรังวัดหาค่าพิกัดด้วย GPS แบบต่าง ๆ

วิธีการ	อุปกรณ์ที่จำเป็น	วิธีการทำงานในสนาม	ค่าความถูกต้อง
SPP	เครื่องรับทุกชนิด แต่ทั่วไปมักใช้แบบมือถือ	สามารถเคลื่อนย้ายเครื่องไปตามจุดที่ต้องการหาค่าพิกัดได้ และในระหว่างทำงานต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง	10-20 ม.
Static	เครื่องรับแบบรังวัดชนิดความถี่เดียวหรือสองความถี่	ตั้งเครื่องรับทั้งสองอยู่กับที่ 1-2 ชั่วโมง และในระหว่างทำงานต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง	5 มม.-2.5 ซม.
Rapid static	เครื่องรับแบบรังวัดชนิดความถี่เดียวหรือสองความถี่	ตั้งเครื่องรับทั้งสองอยู่กับที่ 10-20 นาที และในระหว่างทำงานต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง	1-3 ซม.
RTK	เครื่องรับแบบสองความถี่เท่านั้นและอุปกรณ์สื่อสารทั้งเครื่องรับส่งวิทยุหรือโทรศัพท์มือถือ	สามารถเคลื่อนย้ายเครื่องไปตามจุดที่ต้องการหาค่าพิกัดได้ แต่ต้องรอจุดละประมาณ 1-2 นาที และในระหว่างทำงานต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 5 ดวง และต้องรับค่าปรับแก้จากสถานีฐานได้	1-5 ซม.

ทั้งนี้ ค่าความถูกต้องทางราบและทางตั้งของจุดควบคุมภาพถ่ายสำหรับการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับจะต้องมีค่าเป็น 1 ส่วน 4 เท่าของค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูล ตามมาตรฐาน ASPRS (2014), ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data ดังสมการที่ 2-8

$$RMSE_r = 1/4 * RMSE_r(map) \quad (2-8)$$

จากสมการ ความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบและทางตั้งของข้อมูลการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับจะนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการวางแผนการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่าย

### 3.3 ตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่าย

ตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายเป็นไปตามการแบ่งประเภทกล้องถ่ายภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของพิกัดจุดถ่ายภาพ ประกอบด้วย

3.3.1 Consumer grade เมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับในการถ่ายรูปทั่วไปและพิกัดจุดถ่ายภาพมีความถูกต้องต่ำ ต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายอย่างน้อย 9 จุด ต่อบล็อกการประมวลผลภาพถ่าย และจุดควบคุมภาพถ่ายจะต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยมีระยะห่างโดยประมาณไม่เกิน 200 เมตร

3.3.2 Professional grade เมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับในการถ่ายรูปที่มีคุณภาพสูงและพิกัดจุดถ่ายภาพมีความถูกต้องต่ำ ต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายอย่างน้อย 5 จุด ต่อบล็อกการประมวลผลภาพถ่าย และจุดควบคุมภาพถ่ายจะต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยมีระยะห่างโดยประมาณไม่เกิน 500 เมตร

3.3.3 Survey grade เมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับในการถ่ายรูปที่มีคุณภาพสูงและพิกัดจุดถ่ายภาพมีความถูกต้องต่ำ จะต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายอย่างน้อย 2 จุด ต่อเที่ยวบิน

## 4. หลักการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีและซอฟต์แวร์ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ข้อมูลเชิงตำแหน่งที่มีคุณภาพเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน จำเป็นต้องเข้าใจหลักการพื้นฐานของการสำรวจด้วยภาพถ่าย เพื่อควบคุมคุณภาพของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับได้ตามที่วางแผนไว้ โดยหลักการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ได้แก่

4.1 การวัดสอบกล้องถ่ายภาพ การวัดสอบกล้องเพื่อหาองค์ประกอบภายในของกล้องถ่ายภาพ (Interior orientation) ซึ่งเป็นค่าการจัดวางข้อมูลภาพถ่ายที่มีความสัมพันธ์กับทิศทางแนว

บิน นอกจากนี้กระบวนการวัดสอบยังใช้หาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์ของกล้องที่บันทึกภาพถ่าย ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการแก้ไขและการควบคุมความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์จากการประมวลผล ดังนั้น จึงต้องมีการวัดสอบเพื่อนำค่าพารามิเตอร์มาใช้ในการประมวลผล เพื่อสามารถควบคุมกระบวนการประมวลผลให้ได้ผลลัพธ์เชิงตำแหน่งที่มีคุณภาพ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ค่าความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมี และค่าความผิดเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัส ทั้งนี้การแก้ไขค่าความผิดเพี้ยนของเลนส์สามารถแก้ไขได้ในกระบวนการจับคู่ภาพเพื่อสร้าง Tie point

**4.2 การจับคู่ภาพเพื่อสร้าง Tie Point** การจับคู่ภาพเป็นขั้นตอนเริ่มต้นในการประมวลผลของซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ ประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานย่อย ได้แก่ การคำนวณหาพิกัดจุดถ่ายภาพ การปรับแก้และวัดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์ การสกัดหาข้อมูลจุดสำคัญ การจับคู่ภาพและการสร้าง Auto tie points จากสมการสภาวะร่วมเส้น ทั้งนี้ในขั้นตอนนี้เป็นส่วนสำคัญที่สุดในการผลิตข้อมูลพอยท์คลาวด์และภาพออร์โธจิงที่มีคุณภาพ

4.2.1 การสกัดหาข้อมูลจุดสำคัญ คือ การใช้เทคนิคการค้นหายอดสนใจของภาพแต่ละภาพ โดยคอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจทัศนียภาพ หรือแยกแยะวัตถุภายในภาพได้ ทั้งนี้ความชัดเจนของภาพจะทำให้คอมพิวเตอร์สามารถระบุข้อมูลวัตถุได้อย่างชัดเจนและการจับคู่ภาพ (Image matching) ได้อย่างถูกต้อง

4.2.2 การจับคู่ภาพ คือ การนำข้อมูลจุดสำคัญจากการสกัดหาวัตถุภายในภาพ ซึ่งข้อมูลจุดสำคัญที่สร้างขึ้นจะต้องไม่ขึ้นอยู่กับขนาดภาพ การหมุน และมุมมอง เพื่อนำมาใช้จับคู่ภาพและหาความสัมพันธ์ของวัตถุระหว่างภาพถ่ายได้อย่างแม่นยำ วิธีการประมวลผลการจับคู่ภาพจะใช้คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลหาปริภูมิค่าในมิติขนาดและระยะทางคำนวณหาตำแหน่งของข้อมูลจุดสำคัญ และกำหนดทิศทางให้กับข้อมูลจุดสำคัญ

Agisoft PhotoScan Professional เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพออร์โธโท (Orthophoto) และแบบจำลองความสูงดิจิทัล (DEM) แบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้หลักการจับคู่วัตถุที่ปรากฏในหลาย ๆ ภาพ (Structure from Motion: SfM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ประยุกต์รวมเอาความรู้ด้านคอมพิวเตอร์วิชั่น (Computer Vision) ดิจิทัลโฟโตแกรมเมตรี (Digital Photogrammetry) และการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) เข้าด้วยกันเพื่อประมาณค่าพิกัดสามมิติจากข้อมูลภาพถ่ายสองมิติ เป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นต่อมาจาก Photographs Processing โดยอาศัยการจัดเรียงภาพถ่ายของวัตถุเดียวกันในทิศทางที่แตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบและจับคู่ภาพถ่ายที่มีจุดพิกเซลบนภาพที่เหมือนกันซึ่งแสดงถึงวัตถุเดียวกัน วิธี Structure from Motion จำเป็นต้องใช้

พิกัดของกล้องถ่ายภาพบนระบบพิกัดฉากเช่นเดียวกัน โดยใช้ข้อมูลเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวจากกล้องถ่ายภาพ มุมก้มมุมเงย ระยะโฟกัส การบิดของภาพถ่ายและการเคลื่อนที่ของจุดพิกเซลอ้างอิงจะถูกนำมาคำนวณร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ชุดโปรแกรมสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยสำคัญคือทุกภาพถ่ายจะต้องมีการบันทึกข้อมูลทางกายภาพ มุมก้มของกล้อง ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ระยะโฟกัส เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่า

กระบวนการของเทคนิค SfM มี 3 ขั้นตอนหลักคือ 1) Keypoint Matching หรือการจับคู่พิกัดจากภาพถ่ายโดยอัตโนมัติ โดยพิกัดจากภาพถ่ายนี้เป็นพิกัดที่มีลักษณะเฉพาะหรือ Keypoint ที่ผ่านขั้นตอนทาง Image processing หลายขั้นตอน สามารถจับคู่กับพิกัดที่เหมือนกับภาพถ่ายอื่น ๆ ได้โดยอัตโนมัติ อัลกอริทึมที่ใช้ในการหา Keypoint คือ Scale Invariant Feature Transform หรือ SIFT ซึ่งได้ถูกสร้างขึ้นโดย Lowe (2004) Keypoint ชนิดนี้สามารถใช้จับคู่กับ Keypoint อันเดียวกันในทุกภาพเพื่อสร้างเป็น Track สำหรับแต่ละ Keypoint 2) Triangulation หลังจากที่ได้ Track แล้ว Track จะถูกนำมาสร้างพิกัดสามมิติโดยหลักการทาง Triangulation วิธีการ Triangulation นี้สามารถสร้างพิกัดสามมิติไปพร้อมกันกับสร้างตำแหน่งของภาพแต่ละภาพได้ และ 3) Bundle Adjustment เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการเพิ่มประสิทธิภาพที่สามารถปรับตำแหน่งพิกัดสามมิติและตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพให้มีความละเอียดมากขึ้น กระบวนการนี้จำเป็นต้องทำต่อเนื่องมาจากขั้นตอน Triangulation ที่ให้ผลลัพธ์ไม่ดีมากนัก ทำให้ต้องมีการปรับแก้ให้มีความถูกต้องมากขึ้น (Westoby et al., 2012)

4.2.3 การสร้าง Auto tie points จากสมการสถานะร่วมเส้น การสร้าง Auto tie points เกิดโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation: AT) คือ กระบวนการที่นำข้อมูลลำแสงที่ฉายลงบนภาพถ่ายที่ถูกบันทึกโดยกล้องถ่ายภาพทางอากาศในจำนวนที่มากมาทำการประมวลผลในการคำนวณ ทั้งการเล็งสกัดย้อนและกระบวนการเล็งสกัด ซึ่งการเล็งสกัดย้อน คือ กระบวนการในการหาค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอก ทำให้ทราบตำแหน่งและการวางตัวของภาพถ่ายเทียบกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน และในส่วนของการทำงานกระบวนการเล็งสกัดจะเป็นกระบวนการในการคำนวณตำแหน่งและการวางตัวของภาพถ่ายคู่ซ้อนสามมิติ รวมไปถึงกระบวนการเล็งสกัดนี้ยังใช้หาค่าพิกัดบนพื้นหลักฐานจริง ทั้งนี้การประมวลผลโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะทำการประมวลผลทั้งการเล็งสกัดย้อนและการเล็งสกัด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการสถานะร่วมเส้นนำมาใช้ในการปรับแก้และคำนวณค่าพิกัดภาคพื้นดินที่ไม่ทราบค่าซึ่งได้จากกระบวนการเล็งสกัด รวมไปถึงคำนวณปรับแก้ค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอกในแต่ละภาพถ่าย

ซึ่งในปัจจุบันการประมวลผลโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะใช้วิธีการคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสงเพื่อสร้าง Tie points

การควบคุมคุณภาพของ Tie points จะมีกระบวนการคัดกรองข้อมูลผิดพลาดออกจากข้อมูล Tie point เช่นค่า Reprojection error ที่บ่งบอกถึงความแม่นยำในทางตำแหน่งที่ไม่ดีที่เกิดในขั้นตอนการจับคู่ภาพ ทั้งนี้เพื่อพัฒนาความถูกต้องเชิงตำแหน่งจึงต้องมีการขจัดข้อมูล Tie point ที่มีค่า Reprojection error ที่สูงออกจากข้อมูล และนอกจากนี้เพื่อควบคุมคุณภาพของข้อมูลควรมีการขจัดข้อมูล Tie point ที่ได้จากการประมวลผลจับคู่ภาพถ่ายในจำนวนที่น้อยกว่า 3 ภาพหรือข้อมูล Tie point ที่อยู่แปลกแยกจากกลุ่มข้อมูล Tie point อื่น เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้อาจเป็นข้อมูลที่ไม่มีความสัมพันธ์ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งที่สูงขึ้น ซึ่งขั้นตอนการกำจัดข้อมูลผิดพลาดออกจากข้อมูล Tie point จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ และเมื่อทำการประมวลผลกำจัดค่าผิดพลาดออกจากข้อมูลเสร็จสิ้นแล้วต้องทำการประมวลผลใหม่อีกครั้งและตรวจสอบว่าข้อมูล Tie point ที่ได้ทำการประมวลผลนั้นครอบคลุมขอบเขตพื้นที่ที่ต้องการนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้งานหรือไม่ ถ้าหากมีส่วนที่ขาดหายไปจะต้องทำการวางแผนการบินใหม่และทำการบันทึกข้อมูลประมวลผลใหม่อีกครั้ง

ส่วนสุดท้ายคือ Bundle block adjustment เป็นการสร้างระบบสมการร่วมเส้นของจุดบนภาพถ่ายซึ่งคำว่า Bundle หมายถึงกลุ่มของลำแสงซึ่งมีจุดกำเนิดจากจุด Perspective Center ของภาพถ่ายและพาดผ่านจุดที่ปรากฏบนภาพถ่ายทั้งหมด ทั้งนี้การคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสงจะเป็นวิธีคำนวณหาค่าองค์ประกอบที่ไม่ทราบค่าโดยค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าได้แก่ พารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกของภาพถ่ายทุกภาพในบล็อก ค่าองค์ประกอบการจัดเรียงภายนอกของภาพ (Exterior Orientation : EO) เป็นการกำหนดตำแหน่ง (Position :  $X_o, Y_o, Z_o$ ) และการเอียง (Orientation :  $\omega, \phi, \kappa$ ) ของภาพถ่ายในระวางวัตถุ ซึ่งตำแหน่งถ่ายภาพกำหนดโดยพิกัดวัตถุของจุด Perspective Center ส่วนการเอียง อธิบายโดยใช้การเอียงของแกนกล้องขณะถ่ายภาพ (ขณะเปิดหน้ากล้อง) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial relationship) ระหว่างระบบพิกัดวัตถุ ( $X, Y, Z$ ) กับระบบพิกัดภาพถ่าย ( $x, y, z$ ) นอกจากนี้ การคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสงยังใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่า ได้แก่ ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดโยงยึด (Tie points) ดังนั้น หากสามารถสร้างจำนวนสมการได้มากกว่าตัวไม่ทราบค่า ก็จะสามารถหาตัวไม่ทราบค่าทั้งหมดโดยการปรับแก้ด้วยวิธี Least square adjustment เมื่อทำการประมวลผลเสร็จสิ้นแล้วผลลัพธ์ที่ได้คือ พารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก และค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดโยงยึด ในขั้นตอนนี้จะมีการวัดสอบค่าพารามิเตอร์ในการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนทางเลนส์ ด้วยกระบวนการ Self-

calibration ที่จะทำการวัดสอบจากข้อมูลชุดภาพถ่าย และเพื่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งควรที่จะนำผลการวัดสอบกลิ้งจากขั้นตอน Pre-calibration มาเป็นค่าเริ่มต้นในการประมวลผลแก้ไขค่าความผิดเพี้ยนของเลนส์ เพื่อควบคุมคุณภาพของภาพถ่ายได้อย่างแม่นยำ

**4.3 การโยงยึดค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย** คือ การนำเข้าและรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายเพื่อใช้ในปรับแก้ และทำการคำนวณค่าองค์ประกอบภายนอกของภาพ ค่าการวางตัวของภาพถ่ายใหม่ เมื่อโยงยึดค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่ายแล้วจะทำให้ Auto tie points มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ถูกต้อง และสามารถนำไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไปได้

**4.4 การสร้างพอยท์คลาวด์ (dense point cloud)** เป็นกลุ่มของจุดสามมิติที่เก็บค่าของตำแหน่งขอบของวัตถุในพิกัด X,Y,Z ทั้งนี้ ปัจจัยหลักในกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับการคำนวณค่าตำแหน่งของกล้องที่บันทึกภาพถ่าย โดยขั้นตอนในการประมวลผลสร้างข้อมูลพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่นจะเป็นการเพิ่มจำนวน Tie point ซึ่งหากทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลในระดับสูง หรือตั้งค่าความละเอียดในการประมวลผลที่ระดับสูง ทำให้ข้อมูลมีองค์ประกอบรายละเอียดที่หนาแน่น รวมไปถึงส่งผลให้ผลลัพธ์มีค่าความถูกต้องเชิงเรขาคณิตที่แม่นยำ แต่อาจต้องใช้ซอฟต์แวร์ในการประมวลผลเป็นระยะเวลาที่ค่อนข้างมาก และพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลในขั้นตอนนี้จะต้องสร้างจากภาพอย่างน้อย 3 ภาพ เพื่อควบคุมคุณภาพความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

**4.5 การสร้าง Mesh Model** Mesh คือ ข้อมูลพื้นผิวที่มีโครงสร้างแบบเวกเตอร์ที่ใช้แสดงลักษณะของรูปร่างของโมเดล ประกอบด้วยพื้นผิวของโมเดลยอดมุมและขอบมุมของโมเดล โดยจะนำพอยท์คลาวด์มาประมวลผลสร้าง Mesh เพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพเชิงตำแหน่ง แต่ทั้งนี้คุณภาพในการประมวลผลสร้าง Mesh นั้นขึ้นกับคุณภาพของพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลในขั้นตอนก่อนหน้า ในการประมวลผลสร้าง Mesh จะต้องมีการกำหนดและควบคุมจำนวนของรูปหลายเหลี่ยม (polygon) ใน ข้อมูล Mesh ซึ่งได้มากจากการคำนวณมาจากจำนวนจุดพอยท์คลาวด์ โดยจำนวนของรูปหลายเหลี่ยมในข้อมูล Mesh จะแสดงถึงระดับความละเอียดในข้อมูล ทั้งนี้หากจำนวนของรูปหลายเหลี่ยมมีค่าน้อยจะส่งผลกระทบต่อ Mesh ที่ทำการสร้างนั้นหยาบและไม่ละเอียด ซึ่งอาจไม่เหมาะสมที่จะนำไปประมวลผลใช้งานต่อ นอกจากนี้ยังมีส่วนของการ Interpolate Mesh เพื่อทำการสร้างพื้นผิวข้อมูลหรือเติมเต็มข้อมูลให้ครบถ้วน โดยทำการ Interpolate ด้วยวิธีการค้นหาจุดที่ใกล้เคียงกันบนพอยท์คลาวด์ เพื่อทำการประมวลผลสร้างเป็นพื้นผิวเพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลนั้นมีความสมบูรณ์และมีคุณภาพเพียงพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้

**4.6 การสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ** คือ การจำลองความสูงของภูมิประเทศ และจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริดหรือข้อมูลแรสเตอร์ โดยรวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทาง

กายภาพของโลกด้วย เช่น สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ และพุ่มไม้ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้การประมวลผลจากข้อมูล Mesh ทั้งนี้คุณภาพของ Mesh จึงส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ ซึ่งซอฟต์แวร์จะทำการประมวลผลโดยอาศัยความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (Image correlation) และทำการ Interpolate ชนิดข้อมูลทั้งหมดออกมาในรูปแบบข้อมูลราสเตอร์พื้นผิวภูมิประเทศ เพื่อนำไปประมวลผลสร้างข้อมูลออร์โธโกราฟีในขั้นตอนถัดไป

**4.7 การสร้าง Tru Orthophoto** เนื่องจากพื้นที่ที่ทำการถ่ายภาพมีค่าระดับความสูงแตกต่างกัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อจุดภาพจากความสูงที่ต่างของพื้นที่ (Relief displacement) ซึ่งจะทำให้จุดภาพบนภาพถ่ายคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งบนพื้นหลักฐานอ้างอิง ซึ่งจะมีลักษณะเคลื่อนที่ออกจากจุดमुखยสำคัญตามแนวรัศมีและแปรผันตามความสูงที่เทียบกับพื้นหลักฐานอ้างอิง จึงทำให้ต้องมีการประมวลผลเพื่อตัดแก้ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ด้วยการประมวลผลสร้างออร์โธโกราฟี

ออร์โธโกราฟี คือ การนำภาพมาประมวลผลแก้ไขและขจัดความผิดเพี้ยนทางลักษณะเรขาคณิตของวัตถุทั้งหมด ซึ่งจะแตกต่างจากภาพออร์โธโกราฟีที่ทำการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเรขาคณิตด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศ ได้แก่ Digital Terrain Model (DTM) และ Digital Elevation Model (DEM) ส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนของวัตถุที่อยู่ในระดับพื้นดินเท่านั้นที่จะถูกแก้ไข ดังนั้นในการประมวลผลภาพออร์โธโกราฟีจะต้องใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเพื่อนำมาประมวลผลแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิต รวมถึงจะต้องทำการผสมสีของภาพเข้าด้วยกันโดยวิธีการ Mosaic และต้องทำการแก้ไขสีของวัตถุในภาพ เช่น ใช้วิธี Color balancing หรือ Histogram matching ในการแก้ไขสีของวัตถุภายในภาพ เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์สำหรับการประมวลผลชุดข้อมูลที่มีความแตกต่างของระดับความสว่าง และเมื่อทำการประมวลผลเสร็จสิ้นแล้ว การบันทึกนำออกข้อมูลควรที่จะกำหนดจุดภาพของภาพออร์โธโกราฟีขึ้นอยู่กับขนาด GSD

### ความคุ้มค่าในการลงทุน

การตัดสินใจเลือกลงทุนในโครงการขึ้นอยู่กับความคุ้มค่าของโครงการนั้น ๆ ความคุ้มค่าของโครงการวัดได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างผลประโยชน์กับต้นทุนของโครงการโดยนำมาคำนวณหาตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการด้วยเกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุน ตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการใช้หลักเกณฑ์การตัดสินใจ 3 หลักเกณฑ์ประกอบด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ และระยะเวลาคืนทุน (เยาวเรศ ทับพันธุ์, 2551)

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) หมายถึง ผลรวมของผลประโยชน์สุทธิซึ่งได้มีการปรับค่าของเวลาแล้ว คำนวณได้จากผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ของโครงการตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนของโครงการ ดังสมการที่ 2-9

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (2-9)$$

โดยที่  $B_t$  = มูลค่าผลประโยชน์ของโครงการที่คาดว่าจะได้รับในปีที่  $t$

$C_t$  = มูลค่าต้นทุนของโครงการในปีที่  $t$

$i$  = อัตราคิดลด (Discount rate)

$t$  = ปีของโครงการคือ ปีที่ 0, 1, 2, ...,  $n$

$n$  = อายุของโครงการ

หลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน

ถ้า  $NPV > 0$  ควรลงทุนในโครงการนี้ เพราะโครงการสร้างผลประโยชน์สุทธิเป็นมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนที่จ่ายไปแสดงว่าเจ้าของโครงการได้รับผลประโยชน์มากกว่าความต้องการขั้นต่ำที่กำหนดไว้

ถ้า  $NPV = 0$  จะตัดสินใจลงทุนหรือไม่ลงทุนก็ได้ เพราะโครงการนี้มีมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนตลอดอายุโครงการเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนที่จ่ายไป

ถ้า  $NPV < 0$  ไม่ควรลงทุนในโครงการนี้ เพราะมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนตลอดอายุโครงการน้อยกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ หรือเจ้าของโครงการจะได้รับผลประโยชน์น้อยกว่าผลประโยชน์ขั้นต่ำที่กำหนดไว้

ทั้งนี้ NPV เป็นวิธีที่คำนึงถึงความสำคัญของมูลค่าของเงินตามเวลา โดยมีการคิดมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดตลอดอายุของโครงการ แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบ NPV ระหว่างแต่ละโครงการลงทุนได้หากเงินลงทุนเริ่มต้นสุทธิของแต่ละโครงการมีมูลค่าไม่เท่ากัน ต้องพิจารณาหลักเกณฑ์อื่น ๆ ควบคู่ไปด้วย

2. อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) หมายถึง อัตราความสามารถของเงินทุนที่ทำให้ผลประโยชน์คุ้มกับค่าใช้จ่ายเมื่อคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน หรืออัตราส่วนลดที่ทำให้  $NPV = 0$  ผลลัพธ์ที่ได้จะมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2-10

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (2-10)$$

โดยที่  $B_t$  = มูลค่าผลประโยชน์ของโครงการที่คาดว่าจะได้รับในปีที่  $t$

$C_t$  = มูลค่าต้นทุนของโครงการในปีที่  $t$

$r$  = อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR)

$t$  = ปีของโครงการคือ ปีที่ 0, 1, 2, ...,  $n$

$n$  = อายุของโครงการ

หลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน

IRR เป็นอัตราผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการลงทุนจำเป็นต้องมีการนำไปเปรียบเทียบกับอัตราค่าเสียโอกาสของเงินทุน ซึ่งอาจเป็นอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของสถาบันการเงิน อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ธุรกิจยอมรับได้ หรืออัตราผลตอบแทนจากการลงทุนในระยะยาวตามที่กฎหมายกำหนด อาทิ อัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาล ซึ่ง IRR ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราดังกล่าวจะจึงมีความคุ้มค่าในการลงทุน

**3. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)** ระยะเวลาคืนทุนเป็นการหารระยะเวลาที่คุ้มทุนของโครงการลงทุน คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับเงินลงทุนของโครงการ เป็นการพิจารณาความเสี่ยงและสภาพคล่องในการลงทุน แต่วิธีนี้จะไม่คำนึงถึงค่าของเงินตามเวลาและกระแสเงินสดรับหลังจากปีที่คืนทุน ดังสมการที่ 2-11

$$PB = \text{จำนวนปีก่อนที่จะได้คืนทุนหมด} + \frac{\text{ส่วนที่ยังได้คืนไม่ครบ ณ วันต้นปีถัดไป}}{\text{กระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับในปีนั้น}} \quad (2-11)$$

ในการพิจารณาระยะเวลาในการคืนทุน ระยะเวลาคืนทุนจะต้องไม่นานเกินไปเพื่อเป็นข้อพิจารณาว่าควรลงทุนในโครงการนั้นหรือไม่ ทั้งนี้ ระยะเวลาคืนทุนไม่ได้คำนึงถึงค่าของเงินตามเวลาและกระแสเงินสดรับหลังจากปีที่คืนทุน ซึ่งโครงการลงทุนบางโครงการอาจจะมีกระแสเงินสดรับในปีหลายๆ เป็นจำนวนมาก

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

การบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยรูปแบบการบินแบบทั่วไป มีการกำหนดความสูงการบิน ส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) ประมาณร้อยละ 80 หากค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบโดยใช้โครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS NETWORK) และการประมวลผลภาพถ่ายด้วยซอฟต์แวร์การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบอัตโนมัติ ซึ่งตามมาตรฐานสำหรับการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับแล้วความถูกต้องในทางราบไม่ควรเกิน 5 เท่าของ GSD ทางตั้งไม่ควรเกิน 6 เท่าของ GSD ดังการศึกษาของ ต่อลาภ การปลื้มจิตร et al. (2562) ศึกษาศักยภาพของโปรแกรมประยุกต์ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV ได้ค่า GSD ประมาณ 2.35 เซนติเมตร ได้ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศจากรังวัดภาพเชิงเลขในทางราบเท่ากับ 0.071 เมตร คิดเป็น 3 เท่าของ GSD และทางตั้ง 0.143 เมตร คิดเป็น 6 เท่าของ GSD

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ประกอบด้วย ภาพถ่ายทางอากาศ (Orthophoto) และข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (DSM) ซึ่งการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยการใช้ซอฟต์แวร์การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบอัตโนมัติ โดยการศึกษาของ มงคล วงษา et al. (2562) ได้เปรียบเทียบการสร้างภาพ Orthophoto ด้วยซอฟต์แวร์ที่สืบทอดกับซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan professional พบว่า ภาพ Orthophoto ที่ได้จากซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan professional มีการปรับแก้ภาพสร้างข้อมูลในส่วนที่ขาดหายไปเพื่อให้ภาพที่ได้มีความสมบูรณ์กว่าภาพที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ที่สืบทอด ส่วนการสร้างข้อมูล DSM ความละเอียดสูง การศึกษาของ ปิยะณัฐ ปิยะศิลป์ et al. (2562) ได้เปรียบเทียบเทคนิคการสร้าง DSM ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับที่เหมาะสมกับการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้าง พบว่า DSM ที่สร้างด้วยเทคนิค IDW เหมาะสมกว่าเทคนิค TIN และการใช้เทคนิค IDW ในการสร้าง DSM สามารถแสดงรูปร่างอาคารและสิ่งปลูกสร้างซึ่งเหมาะกับการสำรวจสิ่งปลูกสร้างเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ การใช้ภาพจากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับในการสร้าง DSM มีต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำและสร้างได้ภายในเวลาอันสั้น ดังการศึกษาของ Yalcin (2018) ที่ศึกษาการสร้าง DSM ความละเอียดสูงโดยใช้ภาพจากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ พบว่าการใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วย UAV ในการสร้างข้อมูลพื้นผิวภูมิประเทศ เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับสถานการณ์ที่ไม่สามารถใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วย LiDAR หรือการสำรวจระยะไกลโดยใช้ดาวเทียมได้ เนื่องจากปัญหาด้านต้นทุนและเวลา

## 2. การวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์

การประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ต่าง ๆ ของโลกโดยอาศัยข้อมูลดาวเทียม ได้แก่ โครงการ Global Solar Atlas ส่วนในประเทศไทย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2560) จัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม GMS5 GOES9 และ MTSATIR ที่มีความละเอียด 3x3 ตารางกิโลเมตร ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ คำนวณรังสีดวงอาทิตย์ทั่วประเทศ ส่วนการประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ระดับเมืองมีโครงการ Oslo Solar Map ใช้ข้อมูล LiDAR โดยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ในซอฟต์แวร์ ArcGIS โครงการ Stockholm Solar Map ใช้ข้อมูลอุณหภูมิและค่าการแผ่รังสีแสงอาทิตย์แบบเรียลไทม์ในการคำนวณเพื่อติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา และโครงการ Google project sunroof จัดทำแผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ ใช้การสร้างแบบจำลอง 3 มิติของหลังคาอาคาร และภาพถ่ายทางอากาศจาก Google's database

เครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation Analysis) ในซอฟต์แวร์ ArcGIS ได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 2000 (Fu & Rich, 2000) ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา แบบจำลองนี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ต่าง ๆ รวมถึงบนหลังคาอาคารทั้งในเขตเมืองและชนบท เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์คือแบบจำลองความสูงดิจิทัล จึงมีการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์จำนวนมากที่ใช้แบบจำลองความสูงดิจิทัลที่สร้างขึ้นจากอากาศยานไร้คนขับ LiDAR หรือแบบจำลอง 3 มิติ (3D Models) เป็นต้น ผู้วิจัยได้สรุปมาบางส่วนดังตารางที่ 2-2 มีการศึกษาที่นำเสนอวิธีการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ เช่นการศึกษาของ Cioban et al. (2013) ได้วิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ในเมือง Stowe รัฐ Vermont สหรัฐอเมริกา ด้วยข้อมูลแบบจำลองความสูงดิจิทัล (DEM) ผลการศึกษาพบว่า เครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์สามารถใช้วิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนพื้นผิวโลกได้ สร้างแผนที่รังสีแสงอาทิตย์ในพื้นที่ และพยากรณ์ค่ารังสีดวงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำ การศึกษาของ Kodysh et al. (2013) ได้นำเสนอวิธีการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร 212,000 หลัง ใน Knox County รัฐเทนเนสซี สหรัฐอเมริกา ด้วยข้อมูล DSM จากการสำรวจด้วย LiDAR พบว่า วิธีการนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีเพียงพอสำหรับการประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารจำนวนมากในเขตเมือง และยังช่วยระบุอาคารที่มีศักยภาพสูงสำหรับระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งบนหลังคาได้ และการศึกษาของ Kazak and Swiader (2018) พบว่า วิธีนี้ดีพอสำหรับการประมาณค่าการแผ่รังสีแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารจำนวนมากในเขตเมือง ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยให้เมืองหรือภูมิภาคอื่นสามารถนำไปใช้ระบุอาคารที่มีศักยภาพสูงสำหรับติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาได้

ตารางที่ 2-2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์

พื้นที่ศึกษา	เครื่องมือ/ข้อมูล	อ้างอิง
โคลอมเบีย	GIS / DSM, UAV	Fuentes et al. (2020a)
อาร์เจนตินา	GIS / DEM by NASA	Nilsa et al. (2019)
สเปน	GIS / DSM, LiDAR	Quirós et al. (2018)
อิตาลี	GIS / DSM, LiDAR	Pili et al. (2018)
โปรตุเกส	GIS / DTM - contour lines	Machete et al. (2018)
Data samples	GIS / DSM, LiDAR	Kazak and Swiader (2018)
นอร์เวย์	GIS / DEM, 3D Models	Falklev (2017)
ฮ่องกง	GIS / DSM, LiDAR	Wong et al. (2016)
นิวซีแลนด์	GIS / DSM, LiDAR	Suomalainen et al. (2016)
สหรัฐอเมริกา	GIS / DSM, LiDAR	Kodysh et al. (2013)
สหรัฐอเมริกา	GIS / DEM, 3D Models	Cioban et al. (2013)

ความละเอียดของข้อมูล (Resolution) และชนิดของเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้วิเคราะห์ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล ดังการศึกษาของ Wong et al. (2016) ที่ประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของฮ่องกงโดยใช้ข้อมูล DSM ที่ได้จากการสำรวจด้วย LiDAR ความละเอียด 0.5 เมตร ในการวิเคราะห์ แต่เนื่องจากข้อมูลมีขนาดใหญ่ส่งผลต่อการประมวลผลข้อมูล จึงต้องลดความละเอียดข้อมูลลงเหลือ 3 เมตร และการศึกษาของ Falklev (2017) ที่ศึกษาการทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อประเมินศักยภาพรังสีดวงอาทิตย์บริเวณเกาะ Tromsøya ประเทศนอร์เวย์ ด้วยข้อมูล DEM ความละเอียด 10 เมตร โดยใช้เครื่องมือ Point Solar Radiation พบว่าใช้เวลาในการคำนวณที่ต่ำมาก เนื่องจากการคำนวณเฉพาะจุดหรือเฉพาะพิกเซลที่เลือกในข้อมูล DEM สำหรับการวิเคราะห์พื้นที่ขนาดใหญ่ควรใช้เครื่องมือ Area Solar Radiation ที่จะคำนวณค่ารังสีให้กับพิกเซลทั้งหมดของ DEM

สภาพแวดล้อมโดยรอบอาคารส่งผลต่อศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของอาคาร ดังการศึกษาของ Machete et al. (2018) ที่วิเคราะห์อิทธิพลของสภาพแวดล้อมของเมืองที่มีต่อศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของอาคาร โดยใช้การสร้างแบบจำลองสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกันสองวิธีคือวิธี 2.5D และ 3D พบว่า การศึกษาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของอาคารในเมืองควรวิเคราะห์พื้นที่ผิวอาคารทั้งหมดรวมถึงพื้นผิวนาดิ่งหรือด้านข้างอาคาร (3D) ไม่ใช่วิเคราะห์เฉพาะส่วนหลังคา

(2.5D) ส่วนการศึกษาของ Nilsa et al. (2019) ใช้ข้อมูลดาวเทียมในการวิเคราะห์และทำแผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ในจังหวัดซัลตา ประเทศอาร์เจนตินา แผนที่ที่ได้แสดงให้เห็นว่าพลังงานแสงอาทิตย์มีศักยภาพสูงในจังหวัดซัลตา และค่าการรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้นตามระดับความสูงของพื้นที่

ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ได้รับการประเมินโดยการเปรียบเทียบการประเมินศักยภาพของรังสีอาทิตย์บนหลังคาบกับค่าการวัดรังสีดวงอาทิตย์จริงที่ได้รับจากเครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ ดึงการศึกษาของ Suomalainen et al. (2016) ได้ประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาใน Auckland ด้วยการใช้ข้อมูล LiDAR ในการสร้าง DSM ผลลัพธ์ของการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาแสดงเป็นระดับของรังสีดวงอาทิตย์ประจำปีและตำแหน่งที่มีรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุดบนหลังคา เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการประเมินกับค่าจากเครื่องมือวัดการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด 3-5% และการศึกษาของ Pili et al. (2018) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ พบว่า วิธีการคำนวณรังสีดวงอาทิตย์นี้สอดคล้องกับมาตรฐานการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานมาตรฐานในระดับเมือง

### 3. การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

การประมาณการพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ปัจจุบันมีซอฟต์แวร์ที่พัฒนาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการประมาณการพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ การใช้งานมีทั้งรูปแบบการใช้งานที่ต้องติดตั้งลงบนเครื่องคอมพิวเตอร์และบนเว็บไซต์ ที่นิยมใช้ในการศึกษาต่าง ๆ ได้แก่ PVWatts ซอฟต์แวร์ของกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา เป็นระบบประมาณการค่าการผลิตกระแสไฟฟ้าและประมาณ PVSYS ซอฟต์แวร์สำหรับนักออกแบบระบบโซลาร์เซลล์มีอาชีพที่ทั่วโลกยอมรับ โดยเฉพาะสถาบันการเงินบางแห่งจะให้เงินกู้สำหรับติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ระบุว่าต้องใช้ซอฟต์แวร์ PVSYS ในการออกแบบระบบโซลาร์เซลล์เท่านั้น และ SAM (System Advisor Model) เป็นระบบหนึ่งในซอฟต์แวร์ PVWATTs การใช้งานต้องดาวน์โหลด ซอฟต์แวร์มาติดตั้งในคอมพิวเตอร์ จุดเด่นของ SAM คือการวิเคราะห์ทางการเงิน เช่น ประมาณการจุดคุ้มทุน IRR และ NPV ได้ด้วย การศึกษาของ ฉัตร ผลนาค et al. (2560) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายขนาดกำลัง 3 กิโลวัตต์ ที่จะติดตั้งในพื้นที่อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง โดยอาศัยการจำลองแบบด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst ผลจากการจำลองแบบยังแสดงให้เห็นอีกว่า เมื่อหันแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ และติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มุมเอียง 20 องศา จะได้รับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดและระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด และการศึกษาของ Chaianong and Pharino (2015) ได้ทำการวิเคราะห์การส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ของภาคครัวเรือนหรือที่อยู่อาศัยในกรุงเทพมหานคร โดยใช้แบบจำลอง PVWatts ในซอฟต์แวร์ System Advisor Model (SAM) ข้อมูลนำเข้า คือ สภาพอากาศ (ข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์, อุณหภูมิและความเร็วลม) และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ขนาดและประเภทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อัตราส่วนการแปลง DC เป็น AC ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า มุมในการวางแผงแสงอาทิตย์ อัตราการการสูญเสียของระบบ เป็นต้น

ศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารได้รับการประเมินก่อนการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่บันทึกไว้หลังการติดตั้งแผงเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของวิธีการประมาณที่ใช้ ดังการศึกษาของ Fuentes et al. (2020a) ที่นำเสนอวิธีการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารในมหาวิทยาลัย Santiago de Cali โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์และใช้ข้อมูล DSM ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ทำการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารก่อนการวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์และนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้หลังการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และผลการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวิธีการที่ใช้มีความคล้อยคลึงกับประสิทธิภาพจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการนี้ช่วยให้สามารถประมาณศักยภาพไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ รวมถึงการปรับตำแหน่งและทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสม และการใช้ข้อมูล DSM ที่ได้จาก UAV มีความสะดวก มีรายละเอียดสูงและราคาถูก แต่ควรคำนึงถึงความถูกต้องของภูมิประเทศต่าง ๆ ใน DSM โดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ได้จากอุปกรณ์ GPS ที่มีความแม่นยำสูงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในแง่ของความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

#### 4. ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

ความคุ้มค่าในการลงทุนเป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งโดยทั่วไปผลตอบแทนการลงทุนมี 2 รูปแบบ คือ ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์และผลตอบแทนทางการเงิน ภาคเอกชนจะใช้เกณฑ์ผลตอบแทนทางการเงินเป็นหลักในการตัดสินใจลงทุนเนื่องจากเป็นการประกอบธุรกิจเชิงพาณิชย์ ส่วนภาครัฐจะใช้ทั้งผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์และผลตอบแทนทางการเงินประกอบกัน เนื่องจากบางโครงการที่รัฐลงทุนผลตอบแทนอาจไม่สูงในระดับจูงใจ แต่ผลตอบแทน

ทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการที่นำเอาผลประโยชน์ทางอ้อมที่มีใช้เป็นเม็ดเงินโดยตรงมาประเมินร่วมด้วย จะทำให้โครงการนั้นมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนตามพันธกิจของภาครัฐที่ไม่ใช่เชิงพาณิชย์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.)

การศึกษาความคุ้มค่าด้านการเงินในการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารใช้ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (PB) ในการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ดังการศึกษาของ สุรกิจ ทองสุก and อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล (2561) ได้วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา โดยการคำนวณระยะเวลาคืนทุนและอัตราผลตอบแทนซึ่งพิจารณาสองปัจจัยหลัก คือ ต้นทุนในการติดตั้งและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาคืนทุน 5 ปี 5 เดือน อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 16.32 และการศึกษาของ ภูมิ บัวตุม and โสภิตสุตา ทองโสภิต (2560) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบความคุ้มค่าของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้ 2 มาตรการ คือ มาตรการการติดตั้งโซลาร์เซลล์บนหลังคาเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เองอย่างเสรีหรือที่เรียกว่าโครงการนำร่อง (Pilot Project) และมาตรการการติดตั้งโซลาร์เซลล์บนหลังคาเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เองและขายไฟฟ้าส่วนที่เหลือจากการใช้ในอาคาร (Net Metering) ผลการเปรียบเทียบมูลค่า NPV และ PB พบว่า มาตรการ Net Metering จะให้ความคุ้มค่าทางการเงินมากกว่า

การศึกษาของ สุรกิจ ทองสุก and อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล (2561) พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจริงมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย ซึ่งค่าที่แตกต่างกันมีค่าเพียงเล็กน้อยนี้อาจไม่มีผลต่อการตัดสินใจที่ลงทุนในโครงการ เนื่องจากปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อต้นทุนในการติดตั้งและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นมาก และที่สำคัญต้นทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่ลดลงทำให้เห็นผลทางด้านเศรษฐศาสตร์หรือจุดคุ้มทุนที่เร็วมากขึ้น สำหรับต้นทุนของโครงการที่นำมาใช้วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงิน ในการศึกษาของ ธนาพล ตันติสัตยกุล et al. (2560) ใช้ต้นทุนรวมค่าติดตั้งทั้งหมดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากบริษัทที่รับติดตั้งจำนวน 7 บริษัท พบว่ามีต้นทุน 30-50 บาทต่อหน่วย โดยมีค่าเฉลี่ย 38.14 บาทต่อหน่วย

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ตามวัตถุประสงค์ ได้แก่ การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

#### ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

1. ภาพถ่ายทางอากาศจากการบินถ่ายภาพด้วย UAV วันที่ 10-11 ธันวาคม พ.ศ. 2563 ครอบคลุมพื้นที่ของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง โดยภาพที่ได้มีรายละเอียด 0.1 เมตร การซ้อนทับ (Forward and side overlap) ร้อยละ 80 มีจุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศ GCPs (Ground control points) เพื่อใช้ทำ Geo-referencing image เพื่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศ
2. ข้อมูลเวลาดวงอาทิตย์ขึ้น-ตก บริเวณจังหวัดลำปาง พ.ศ. 2563 รวบรวมได้จากสมาคมดาราศาสตร์ไทย (2562)
3. ข้อมูลผลการตรวจวัดข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย พ.ศ. 2563 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
4. รายงานอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด และฝน สถานีตรวจอากาศลำปาง พ.ศ. 2563 – 2564 ของศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ
5. ความต้องการหรือปริมาณการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง พ.ศ. 2560 - 2564 จากระบบอ่านหน่วยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ หรือระบบ AMR ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
6. ประเภทและขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เป็นข้อมูลจำเพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันไปตามผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์
7. ข้อมูลเงินลงทุนโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ภายใต้โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐ และข้อมูลปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ พ.ศ. 2563 - 2564

## เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

### 1. ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ที่ใช้ ประกอบด้วย

1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)

1.2 อากาศยานไร้คนขับ รุ่น DJI Phantom 3 professional

1.3 เครื่องหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียมแบบ GNSS (Global Navigation Satellite System)

### 2. ซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ ประกอบด้วย

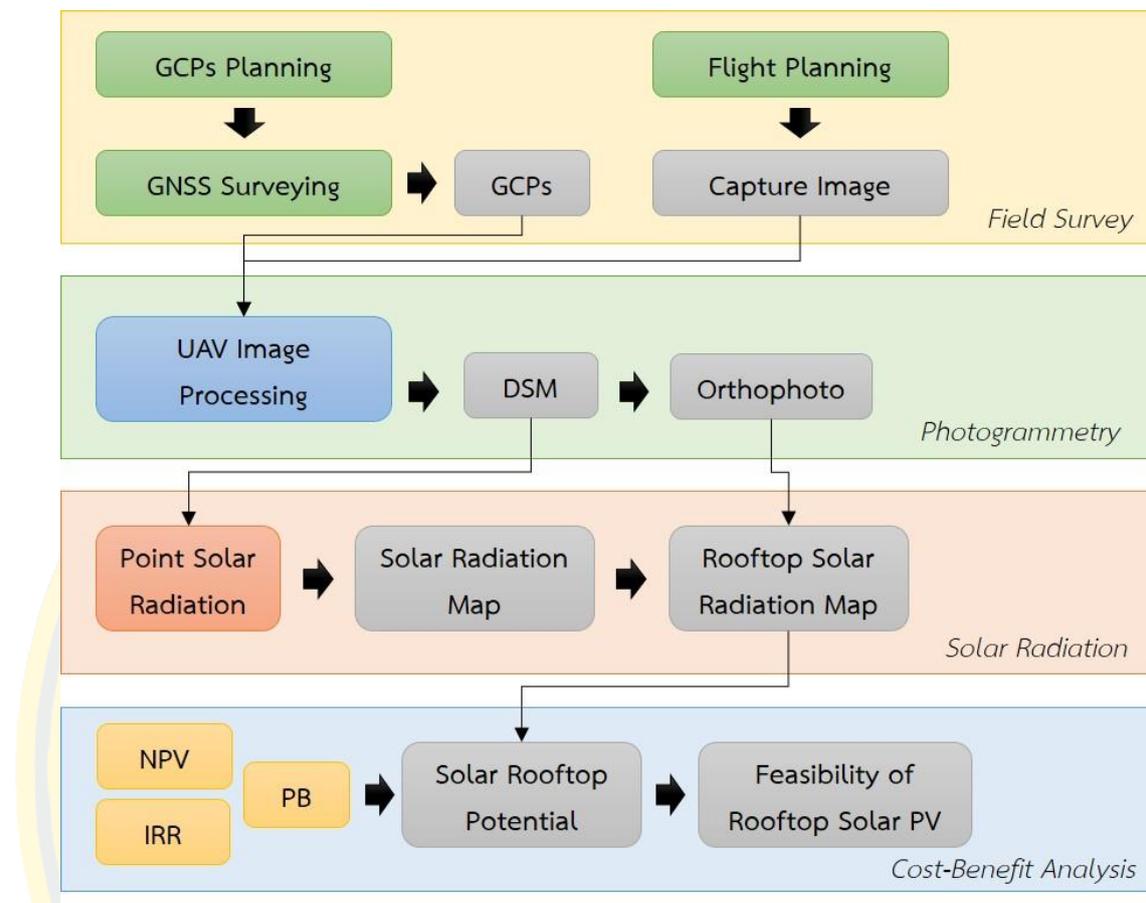
2.1 ซอฟต์แวร์ Application Pix4D Capture ใช้ในการวางแผนการบิน

2.2 ซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan Professional ใช้ประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV

2.3 ซอฟต์แวร์ ArcGIS Desktop 10.3.1 ใช้ในการวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์ ประมวลผลข้อมูล raster คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและจัดทำแผนที่

## ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้ (ภาพที่ 3-1)



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

## 1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

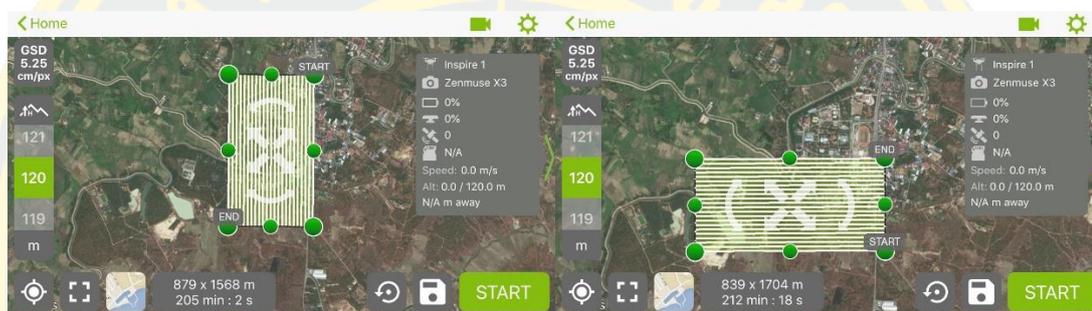
ข้อมูลสำหรับการวิจัยรวบรวมได้จากเอกสารงานวิจัยและเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เวลาดวงอาทิตย์ขึ้น-ตก ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของจังหวัดลำปาง ประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศและฝนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีผลต่อปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นโลก และข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากการตรวจวัดของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

## 2. การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

การศึกษานี้ทำการบินถ่ายภาพทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน (Multirotor) ขนาดเล็กยี่ห้อ DJI Phantom 3 Professional ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ รุ่น FC300X ที่มี

ความยาวโฟกัส 3.61 มม. ประเภทเซ็นเซอร์แบบ Global มีความละเอียดของจุดภาพของภาพ 12 ล้านจุดภาพ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 วางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ทำการสำรวจสภาพพื้นที่เบื้องต้นบริเวณพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัย เพื่อทำการวางแผนการบินด้วยแอปพลิเคชัน Pix4D Capture จากสมาร์ทโฟนที่ใช้เชื่อมต่อกับอากาศยานไร้คนขับ กำหนดขอบเขตการบินให้อยู่ภายในเวลา 15 นาที ใช้วิธีการบินแบบทั่วไป กำหนดส่วนซ้อนด้านหน้าร้อยละ 80 ส่วนซ้อนด้านข้างร้อยละ 80 ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 แผนการบินถ่ายภาพทางอากาศบริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

2.2 วางแผนงานสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS เพื่อสร้างจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน หรือ GCPs ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยรังวัดด้วยวิธี RTK กำหนดตำแหน่งเบื้องต้นบนโปรแกรม Google Earth ตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายเป็นแบบ Consumer grade คือ ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายอย่างน้อย 9 จุดต่อบล็อกการประมวลผลภาพถ่าย และจุดควบคุมภาพถ่ายให้กระจายอย่างสม่ำเสมอ มีระยะห่างโดยประมาณไม่เกิน 200 เมตร

2.3 บินถ่ายภาพตามแผนการบินด้วยอากาศยานไร้คนขับ ใช้แผ่นไวโรลีสสีขาว-แดงขนาด 1 x 1 เมตร วางจุดตัดของเป้าให้ตรงหัวหมุดของจุดควบคุมภาคพื้นดิน ทำการบินโดยใช้แอปพลิเคชัน Pix4D Capture ที่ใช้วางแผนการบินเพื่อควบคุมการบิน ทำการบินที่ความสูงบินประมาณ 120 เมตร ทำให้ได้ขนาดจุดภาพบนพื้นดินหรือ GSD ประมาณ 5.25 เซนติเมตร ส่วนซ้อนด้านหน้าร้อยละ 80 และส่วนซ้อนด้านข้างร้อยละ 80

2.4 ประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ใช้ซอฟต์แวร์ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบอัตโนมัติ คือ Agisoft PhotoScan Professional โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.4.1 นำภาพถ่ายทั้งหมดเข้าสู่โปรแกรมและเชื่อมโยงภาพแต่ละภาพในโครงการด้วยจุดโยงยึด (Tie point หรือ Key points) ที่สร้างขึ้นโดยอัตโนมัติในพื้นที่ซ้อนกันแต่ละภาพ

2.4.2 นำเข้าค่าพิกัดและรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินลงในภาพถ่ายที่สามารถถ่ายภาพเห็นจุดควบคุมนั้น ๆ แล้วปรับแก้โครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ จะได้ข้อมูลภาพที่มีระบบพิกัดเดียวกับจุดควบคุมภาคพื้นดิน

2.4.3 สร้างพอยท์คลาวด์ และ TIN หรือ Mesh model พอยท์คลาวด์เป็นตัวแทนของพิกัดสามมิติในภูมิประเทศมีการสร้างโครงข่ายเชื่อมโยงกันแต่ละจุดทำให้สามารถสร้าง Mesh หรือในงานรังวัดภาพเชิงเลขเรียกว่าโครงข่ายสามเหลี่ยมไม่ปกติหรือ TIN เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองระดับสูงดิจิทัลหรือ DEM

2.4.4 สร้างข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ (Orthophoto) และข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศหรือ DSM ที่มีความละเอียดจุดภาพ 10 เซนติเมตร กำหนดให้โปรแกรมนำออกข้อมูลตามการตั้งค่าข้อมูลเชิงพื้นที่ให้มีความละเอียดที่กำหนด เพื่อนำข้อมูล DSM ไปใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่อไป

### 3. การประมวลผลข้อมูลด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์

ชุดเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation toolset) เป็นเครื่องมือในกล่องเครื่องมือการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ (Spatial analyst toolbox) ของซอฟต์แวร์ ArcGIS Desktop 10.3.1 สำหรับวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่ในช่วงเวลาที่กำหนดและจัดทำแผนที่รังสีดวงอาทิตย์ สำหรับเครื่องมือ Point solar radiation เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉพาะพื้นที่ที่สนใจในแบบจำลองพื้นที่ผิวภูมิประเทศ (ภาพที่ 3-3) โดยใช้ข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดในการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 ข้อมูล DSM ซึ่งอยู่ในรูปข้อมูลแรสเตอร์ที่มีค่าความละเอียดจุดภาพ 10 เซนติเมตร ได้จากการประมวลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

3.2 ข้อมูลความลาดชัน (Slope) และทิศทางความลาดเอียง (Aspect) อยู่ในรูปข้อมูลแรสเตอร์ สร้างจากข้อมูล DSM ด้วยเครื่องมือ Slope และ Aspect ในชุดเครื่องมือ Surface ค่าความลาดชันมีหน่วยเป็นองศา ส่วนทิศทางความลาดเอียงของพื้นที่ คือ ทิศทางการหันของพื้นผิวภูมิประเทศเขาหาดวงอาทิตย์ โดยคำนวณจากทิศเหนือที่ 0 องศา เป็นหลัก ตามเข็มนาฬิกามาทางทิศตะวันออกคือ 90 องศา ลงมาทางทิศใต้คือ 180 องศา และทางตะวันตก 270 องศา

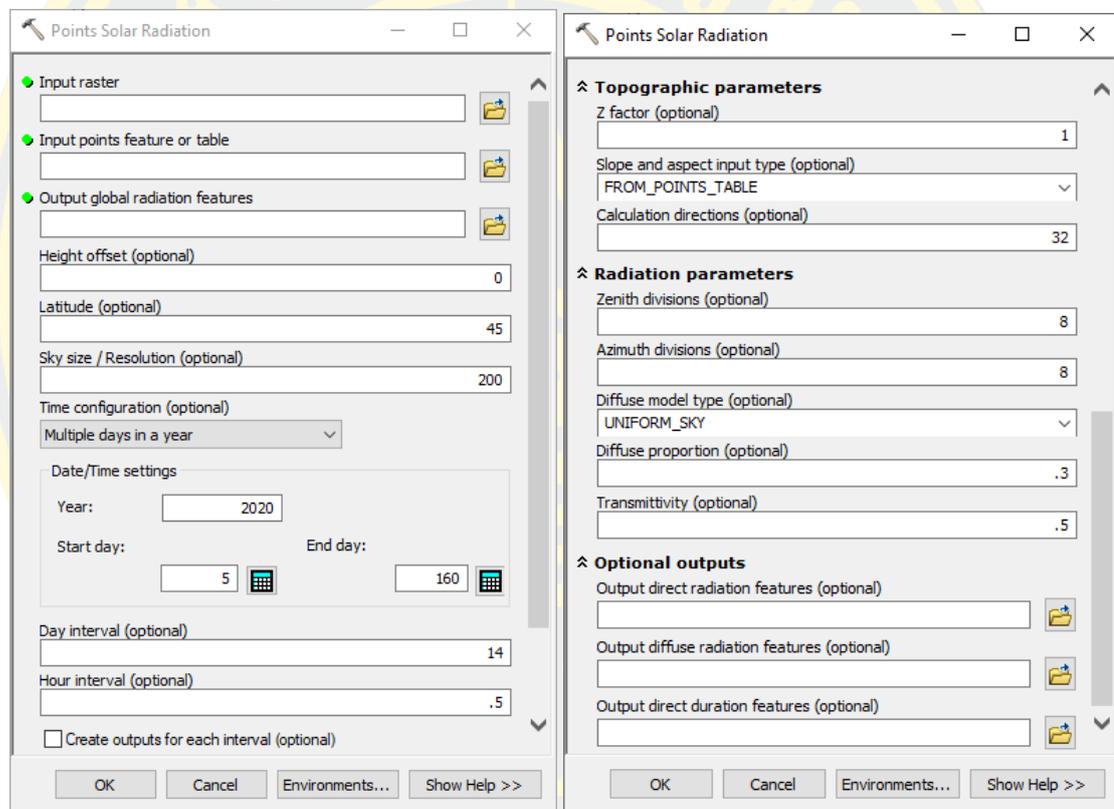
3.3 ข้อมูล Points feature คือข้อมูลเวกเตอร์ที่แสดงจุดตำแหน่ง (Point) ที่ได้จากการแปลงข้อมูล DSM ด้วยเครื่องมือ Raster to point ตำแหน่งของแต่ละจุดคือตำแหน่งกึ่งกลางของ

แต่ละพิกเซล ทั้งนี้ข้อมูลคุณลักษณะ (Attribute table) ของแต่ละจุดประกอบด้วยค่าพิกัด x, y ค่าความลาดชัน (องศา) จากข้อมูล Slope และทิศทางความลาดเอียงจากข้อมูล Aspect

3.4 ค่าพารามิเตอร์ ที่ต้องกำหนดในเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ ประกอบด้วย

3.4.1 Height offset ค่าความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (เมตร) พื้นที่บริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางสูงจากระดับทะเลปานกลางประมาณ 260 เมตร

3.4.2 Latitude ค่าละติจูด หน่วยเป็นองศาทศนิยม ถูกคำนวณโดยอัตโนมัติจากข้อมูล DSM ที่นำเข้ามาใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 3-3 เครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ (Point Solar Radiation)

3.4.3 Sky size ขนาดของท้องฟ้าเป็นค่าความละเอียดของภาพมุมมองแผนที่ท้องฟ้าและแผนที่ดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณรังสี (หน่วย: พิกเซลต่อด้าน) เป็นตัวแทนของท้องฟ้าที่มีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมและไม่มีระบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ การเพิ่มขนาดของท้องฟ้าจะเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ แต่จะเพิ่มเวลาในการคำนวณมากตามไปด้วยเมื่อการตั้งค่าช่วงวันมีขนาดเล็ก (เช่น น้อยกว่า 14 วัน) ควรใช้ขนาดของท้องฟ้าที่ใหญ่ขึ้น หากความละเอียดของขนาด

ท้องฟ้าไม่ใหญ่พอแนวการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์อาจซ้อนทับกันทำให้ค่ารังสีเป็นศูนย์หรือต่ำกว่า ค่าขนาดสูงสุดของท้องฟ้าคือ 10,000 ค่า 200 เป็นค่าเริ่มต้น การเพิ่มความละเอียดจะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น การคำนวณครั้งนี้ใช้ค่าขนาดท้องฟ้า 512

3.4.4 Time configuration การกำหนดค่าเวลา เป็นการระบุช่วงเวลาของผลลัพธ์ จากการคำนวณโดยเลือกแบบหลายวันในหนึ่งปี (Multiple days in a year) เป็นการคำนวณสำหรับ ช่วงเวลาแบบหลายวันที่เฉพาะเจาะจงภายในหนึ่งปี โดยระบุปีที่จะคำนวณ วันเริ่มต้นและวันสิ้นสุด เช่นกำหนดค่าเวลาของสัปดาห์แรกของปี 2020 คือ start day: 1 end day: 7..... และสัปดาห์ สดท้ายของปี คือ start day: 259 end day: 365

3.4.5 Day interval ช่วงเวลาตลอดทั้งปี (หน่วย: วัน) ที่ใช้สำหรับการคำนวณ ส่วนของท้องฟ้าสำหรับแผนที่ดวงอาทิตย์ ในการคำนวณครั้งนี้กำหนดช่วงเวลา 7 วัน

3.4.6 Hour interval ช่วงเวลาตลอดทั้งวัน (หน่วย: ชั่วโมง) ที่ใช้สำหรับการคำนวณ ส่วนของท้องฟ้าสำหรับแผนที่ดวงอาทิตย์ ในการคำนวณครั้งนี้ใช้จำนวนชั่วโมงตั้งแต่เวลาที่ดวง อาทิตย์ขึ้น-ตก บริเวณจังหวัดลำปางเฉลี่ยรายสัปดาห์ ในปี พ.ศ.2563

### 3.4.7 ค่าพารามิเตอร์ด้านลักษณะภูมิประเทศ (Topographic Parameters)

3.4.7.1 Z factor การปรับหน่วยการวัดสำหรับค่า z เมื่อแตกต่างจากหน่วยวัด x, y ที่เป็นพื้นผิวภูมิประเทศ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำหน่วย z ควรเหมือนกับ x, y หากหน่วยไม่ เหมือนกันใช้ z-factor เพื่อแปลงหน่วย z เป็น x, y หน่วย ตัวอย่างเช่น หากหน่วย x, y เป็นหน่วย เมตรและหน่วย z ของข้อมูลเป็นฟุต สามารถระบุค่า z-factor 0.3048 เพื่อแปลงหน่วยฟุตเป็นเมตร หากหน่วย x, y และหน่วย z อยู่ในหน่วยการวัดเดียวกัน z-factor คือ 1 ซึ่งคือค่าเริ่มต้น

3.4.7.2 Slope and aspect input type เลือกแหล่งข้อมูลความลาดชัน (Slope) และทิศทางการลาดเอียง (Aspect) โดยเลือก FROM\_POINTS\_TABLE - สามารถระบุค่า ความชันและมุมมองพร้อมกับพิกัด x, y ในไฟล์ประเภทตารางตามข้อ 3.3

### 3.4.8 ค่าพารามิเตอร์ด้านการแผ่รังสี (Radiation Parameters)

3.4.8.1 Calculation directions จำนวนทิศทางแอสิมัทที่ใช้เมื่อคำนวณมุมมอง วัตถุบนท้องฟ้าในแนวราบ ค่าที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นทวีคูณของ 8 (8, 16, 24, 32 และอื่น ๆ) ค่าเริ่มต้นคือ 32 ทิศทาง ซึ่งเพียงพอสำหรับภูมิประเทศที่ซับซ้อน

3.4.8.2 Zenith divisions ค่ามุมจากจุดใต้เท้า (Nadir) จนถึงจุดเหนือศีรษะ (Zenith) เป็นตำแหน่งสูงสุดของทรงกลมท้องฟ้า ค่าต้องมากกว่าศูนย์และน้อยกว่าค่าครึ่งหนึ่งของ ขนาดท้องฟ้า หรือ 90 นั่นเอง ส่วนค่าเริ่มต้นในการคำนวณ คือ 8

3.4.8.3 Azimuth divisions มุมแอสิมัท คือมุมที่ใช้บอกตำแหน่งของวัตถุบนท้องฟ้า มุมแอสิมัทจะมีค่าเริ่มที่ 0 องศาที่ทิศเหนือ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามเข็มนาฬิกา มีค่า 90 องศาที่ทิศตะวันออก 180 องศาที่ทิศใต้ และ 270 องศาที่ทิศตะวันตก สำหรับค่ามุมแอสิมัทที่ใช้ในการคำนวณครั้งนี้จะต้องเป็นค่าทวิคูณของ 8 ค่าต้องมากกว่าศูนย์และน้อยกว่า 160

3.4.8.4 Diffuse model type ประเภทของแบบจำลองการกระจายรังสี มี 2 แบบ คือ UNIFORM\_SKY เป็นรูปแบบการกระจายที่สม่ำเสมอ รังสีมีการกระจายเข้ามาเหมือนกันจากทุกทิศทางของท้องฟ้า และแบบไม่สม่ำเสมอ STANDARD\_OVERCAST\_SKY การแผ่รังสีที่เข้ามาจะแตกต่างกันไปตามมุม Zenith

3.4.8.5 Diffuse proportion สัดส่วนการกระจาย ปกติสัดส่วนการกระจายของรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ค่าสัดส่วนการกระจายนี้ควรถูกกำหนดตามสภาพบรรยากาศ แต่สำหรับสภาพท้องฟ้าโดยทั่วไป ค่าเริ่มต้นคือ 0.3

3.4.8.6 Transmittivity การส่งผ่านของรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศ (เฉลี่ยในทุกช่วงความยาวคลื่น) ค่าตั้งแต่ 0 (ไม่มีการส่งผ่าน) ถึง 1 (การส่งผ่านทั้งหมด) สำหรับค่าเริ่มต้นคือ 0.5 สำหรับท้องฟ้าโปร่งโดยทั่วไป

#### 3.4.9 ผลลัพธ์หลังจากการประมวลผล

3.4.9.1 Output global radiation features กำหนดที่อยู่และชื่อของข้อมูลที่จะได้หลังจากการประมวลผล เป็นข้อมูลค่ารังสีจากดวงอาทิตย์รวม (รังสีตรง + รังสีกระจาย) มีหน่วยวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ) โดยค่าที่ได้จากการคำนวณนี้จะนำไปคำนวณศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

3.4.9.2 Output direct radiation features กำหนดที่อยู่และชื่อของข้อมูลที่จะได้หลังจากการประมวลผล เป็นข้อมูลค่ารังสีโดยตรง มีหน่วยเป็นวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ )

3.4.9.3 Output diffuse radiation features กำหนดที่อยู่และชื่อของข้อมูลที่จะได้หลังจากการประมวลผล เป็นข้อมูลค่ารังสีกระจาย มีหน่วยวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ )

3.4.9.4 Output direct duration features กำหนดที่อยู่และชื่อของข้อมูลที่จะได้หลังจากการประมวลผล เป็นข้อมูลระยะเวลาการแผ่รังสีโดยตรง มีหน่วยเป็นชั่วโมง

### 4. ค่ารังสีดวงอาทิตย์

ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลแรสเตอร์ ด้วยเครื่องมือ Solar Radiation Analysis แต่ละพิกเซลแสดงค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่มีหน่วยเป็นวัตต์ชั่วโมงต่อตาราง

เมตร (Wh/m<sup>2</sup>) ผลลัพธ์ที่ได้เป็นข้อมูลแรสเตอร์นำไปจัดทำแผนที่รังสีดวงอาทิตย์และคำนวณค่ารังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่หลังคา ดังนี้

4.1 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร แสดงระดับค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรายเดือน ปีและฤดูกาล เนื่องจากช่วงระยะเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่เหนือขอบฟ้า หรือความยาวของกลางวันจะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี

4.2 คำนวณค่ารังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ส่วนต่าง ๆ ของหลังคาอาคาร ด้วยเครื่องมือ Zonal Statistics ใน ArcGIS โดยแบ่งเป็น 1) พื้นที่ทั้งหมดของหลังคา 2) พื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว และ 3) พื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.3 เปรียบเทียบค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเฉพาะพื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วที่คำนวณได้จากข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน เพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากคำนวณ

## 5. การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

นำแผนที่รังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร (raster) มาวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร โดยใช้เครื่องมือ raster calculator ใน ArcGIS ตามสมการที่ 2-1 (Pop & Grama, 2021)

$$E = A \times R \times H \times PR \quad (2-6)$$

โดยกำหนดให้

$A$  คือ ขนาดของพิกเซล = 0.01 ตารางเมตร (0.1 เมตร x 0.1 เมตร)

$H$  คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ของแต่ละพิกเซล (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร: kWh/m<sup>2</sup>)

$PR$  (Performance ratio) สมรรถนะของระบบเป็นค่าที่แสดงถึงศักยภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ การที่สมรรถนะของระบบที่ไม่เต็ม 100% เนื่องจากเกิดความสูญเสียของระบบ เช่น ความสูญเสียของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ความสูญเสียจากแสงเงา ความสูญเสียในจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ เป็นต้น หากมีการติดตั้งระบบที่ออกแบบมาเป็นอย่างดี ค่าสมรรถนะของระบบโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงร้อยละ 80 – 90 ตามมาตรฐาน IEC (2014) สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะกำหนดให้ค่าสมรรถนะของระบบเท่ากับค่าสมรรถนะระบบโดยเฉลี่ย 85% หรือ 0.85

$R$  คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Conversion efficiency) หรืออัตราการแปลงผัน หมายถึงจำนวนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ามาจะถูกแปลงผันเป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพโดยรวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกวัดภายใต้สภาวะการทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) โดยอิงจากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ 25 °C การฉายรังสีแสงอาทิตย์เท่ากับ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) มวลอากาศ (Air mass) 1.5 และความเร็วลม 1 m/s โดย ประสิทธิภาพ (%) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คำนวณจากขนาดกำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{max}$ ) หน่วยเป็นวัตต์ ที่ STC ทหารด้วยขนาดพื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หน่วยเป็นตารางเมตร การคำนวณประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงาน ดังสมการที่ 3-1

$$Efficiency (\%) = \left( \frac{P_{max}}{Area \times 1000} \right) \times 100\% \quad (3-1)$$

สำหรับค่าขนาดกำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{max}$ ) และขนาดพื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Area) ได้จากข้อมูลคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ Solartron SP320 ซึ่งเป็นแผงยี่ห้อและรุ่นเดียวกับที่ได้ติดตั้งไว้แล้ว โดยค่า  $P_{max} = 320$  Watts และ Area = 1.958  $m^2$  (ขนาดแผงกว้าง 0.9927 เมตร x ยาว 1.9727 เมตร) ดังนั้น ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 16.34%

ทั้งนี้ ในสมการการหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรืออัตราการแปลงผันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้คำนึงถึงผลกระทบจากชั้นบรรยากาศที่มีต่อรังสีดวงอาทิตย์ โดยกำหนดให้ค่ามวลอากาศ (Air mass) เท่ากับ 1.5 โดยค่ามวลอากาศช่วยประมาณการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การดูดกลืน การกระเจิงและการสะท้อนจากองค์ประกอบในชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซ ละอองลอย และเมฆ มวลอากาศแสดงถึงระยะทางที่แสงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกไปยังผู้สังเกตการณ์บนพื้นโลก มวลอากาศได้รับผลกระทบจากมุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ (Sun' declination angle) ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงเหนือศีรษะ (จุดซีกินิท) มวลอากาศจะน้อยเนื่องจากแสงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศด้วยเส้นทางที่สั้นกว่า มวลอากาศมีค่าเป็น 1 เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนออกจากจุดซีกินิท มุมเดคลิเนชันเพิ่มขึ้นมวลอากาศก็จะเพิ่มขึ้น เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม 60 องศาจากจุดซีกินิทค่ามวลอากาศจะอยู่ที่ประมาณ 2 โดยค่ามวลอากาศสูงเท่าใด ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศก็จะยิ่งยาวนานขึ้นเท่านั้น และแสงจะถูกลดทอนด้วยชั้นบรรยากาศก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ค่ามวลอากาศ 1.5 จึงถูกใช้

เป็นมาตรฐานในการประมาณค่าการสูญเสียพลังงานแสงอาทิตย์และผลกระทบจากชั้นบรรยากาศต่อการแผ่รังสีดวงอาทิตย์

5.1 แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังอาคาร แสดงระดับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล raster ด้วยเครื่องมือ Raster calculator แต่ละพิกเซลแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh)

5.2 ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังอาคาร คำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยเครื่องมือ Zonal Statistics ในการรวมค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละพิกเซลในแต่ละพื้นที่

1) พื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ผลรวมของค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละพิกเซลในแต่ละพื้นที่นี้ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ในพื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว นำไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงที่วัดได้จากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Meter) ที่ติดตั้งไว้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของมหาวิทยาลัย ความผิดพลาด (Error) คือ ค่าความแตกต่างของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ ระบุค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกัน โดยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหรือค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (%Error) หาได้จากสมการที่ 3-2 โดยมีค่าเป็นบวกเสมอ

$$\%Error = \left| \frac{\text{estimated value} - \text{actual value}}{\text{actual value}} \right| \times 100\% \quad (3-2)$$

เมื่อ actual value คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง

estimated value คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้

2) พื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลรวมของค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละพิกเซลในแต่ละพื้นที่นี้ คือ ศักยภาพพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัย

## 6. ความต้องการใช้ไฟฟ้า

เนื่องจากอาคารแต่ละหลังไม่ได้ติดตั้งเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (meter) ความต้องการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ใช้ข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากระบบอ่านหน่วยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ หรือระบบ AMR ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเข้าถึงได้ที่เว็บไซต์ <https://www.amr.pea.co.th/AMRWEB/Index.aspx> ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ระบบอ่านหน่วยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ (AMR) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

## 7. ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

7.1 ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า เป็นการเปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่นำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงต่อปีของมหาวิทยาลัย เพื่อหาสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 3-3

$$E_{save} = \frac{E_p \times 100}{E_c} \quad (3-3)$$

เมื่อ  $E_{save}$  คือ ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่อปี (%)

$E_b$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (kWh)

$E_c$  คือ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าตลอดทั้งปี (kWh)

## 7.2 ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการ เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการในรูปตัวเงิน เพื่อประเมินว่าโครงการมีความคุ้มค่าที่จะลงทุนหรือไม่ โดยนำ

ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการมาจัดทำตารางกระแสเงินสดตลอดอายุโครงการ และนำผลประโยชน์สุทธิที่ได้มาคำนวณตามหลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (PB) เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการ สำหรับลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะนำมาคำนวณตามหลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุนนั้นประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

7.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาครั้งนี้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ (Poly crystalline silicon) เป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมและคุ้มค่าที่สุดในปัจจุบัน และทำงานได้ดีในสภาวะที่อุณหภูมิสูง มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผง (Maximum Power:  $P_{max}$ ) 320 วัตต์ ขนาดแผงกว้าง 992.7 มิลลิเมตร ยาว 1,972.7 มิลลิเมตร อายุการใช้งาน 25 ปี ใช้เป็นอายุของโครงการด้วย ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะค่อย ๆ ลดลงตามอายุการใช้งาน โดยทั่วไปแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 0.5 ทุก ๆ ปี

7.2.2 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้มาตรฐานเพื่อนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า ระยะการรับประกัน 10 ปี ดังนั้น ตลอดอายุโครงการต้องเปลี่ยนเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ในปีที่ 11 และ 21

7.2.3 อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก สำหรับการใช้ไฟฟ้าของส่วนราชการ สำนักงานหรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ อยู่ในประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) มีค่าไฟฟ้า Peak คือ เป็นช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามาก มีอัตราการจัดเก็บค่าไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการใช้ตั้งแต่เวลา 09.00-22.00 น. ของวันจันทร์-ศุกร์ เท่ากับ 4.2097 บาท/หน่วย และค่าไฟฟ้า Off peak คือ เป็นช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย โดยมีอัตราการจัดเก็บค่าไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการใช้ตั้งแต่เวลา 22.00-09.00 น. ของวันจันทร์-ศุกร์ และวันเสาร์ วันอาทิตย์ วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย) ทั้งวัน เท่ากับ 2.6295 บาท/หน่วย อัตราค่าไฟฟ้านี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเริ่มประกาศใช้ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 และกำหนดให้อัตราค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.25 ต่อปี คำนวณจากอัตราค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นของอัตราค่าไฟฟ้าย้อนหลังปี 2555 – 2558 ส่วนค่า Ft คำนวณจากค่า Ft เฉลี่ยของปี 2555 -2558 เท่ากับ 0.2325 และกำหนดให้มีอัตราคงที่ตลอดอายุโครงการ

7.2.4 ผลประโยชน์ของโครงการ พิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เท่ากับปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ซื้อลดลง นำปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คูณกับอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกจะได้เป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี

$$\begin{aligned} \text{ผลประหยัด (บาท)} &= (\text{สัดส่วนวัน Peak} \times \text{พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้} \times \\ &\quad \text{อัตราค่าไฟฟ้า Peak}) + (\text{สัดส่วนวัน Off Peak} \times \\ &\quad \text{พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้} \times \text{อัตราค่าไฟฟ้า Off Peak}) \\ &\quad + (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้} \times \text{ค่า Ft}) \end{aligned}$$

โดยที่ สัดส่วนจำนวนวัน Peak : Off Peak เท่ากับร้อยละ 68 : 32 อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแตกต่างกันตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางจัดเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) ค่าพลังงานไฟฟ้า Peak เท่ากับ 4.2097 บาท/หน่วย ค่าพลังงานไฟฟ้า Off Peak เท่ากับ 2.6295 บาท/หน่วย การเพิ่มขึ้นของอัตราค่าไฟฟ้าร้อยละ 2.25 ต่อปี คำนวณจากอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราค่าไฟฟ้าย้อนหลังปี 2555 – 2558 ส่วนค่า Ft คำนวณจากค่า Ft เฉลี่ยของปี 2555 -2558 เท่ากับ 0.2325 และกำหนดให้มีอัตราคงที่ตลอดอายุโครงการ

7.2.5 ต้นทุนของโครงการ การลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เงินลงทุนเริ่มต้นแบบเหมารวมทั้งอุปกรณ์ระบบและค่าแรงงานติดตั้งจะแตกต่างกันในแต่ละขนาด กำลังการผลิตติดตั้ง จากข้อมูลการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา อาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ภายใต้โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐที่ดำเนินการติดตั้งไปแล้ว ต้นทุนในการติดตั้งประกอบด้วย 1) ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา 2) งาน Monitoring System (PLC Panel) และเครื่องมือวัด 3) งานระบบป้องกันไฟฟ้าไหล (Reverse Power System) 4) ค่าปรับปรุงสภาพหลังคา 5) ค่าตรวจเช็คระบบและฝึกอบรม และ 6) งานออกแบบและวิศวกรรม นอกจากนี้ยังมีเงินลงทุนเพิ่มเติมระหว่างโครงการ ซึ่งก็คือค่าเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่มีอายุการใช้งาน 10 ปี ต้องเปลี่ยนในปีที่ 11 และ 21 ของโครงการ รายละเอียดดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลในการศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ข้อมูล	รายละเอียด	แหล่งอ้างอิง
<b>แผงเซลล์แสงอาทิตย์</b>		
ประเภทของแผง	Poly crystalline silicon	ข้อมูลจากผู้ผลิต
กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้	320 วัตต์ต่อแผง	ข้อมูลจากผู้ผลิต
ขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์	1.94 ตารางเมตร	ข้อมูลจากผู้ผลิต
อัตราการเสื่อมสภาพของแผง	0.5% ต่อปี	อ้างอิงผลจากการศึกษา

ข้อมูล	รายละเอียด	แหล่งอ้างอิง
อายุการใช้งาน	25 ปี	ข้อมูลการรับประกัน
<b>เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า</b>		
อายุการใช้งาน	10 ปี	ข้อมูลการรับประกัน
<b>อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก</b>		
Peak	4.2097 (บาท/หน่วย)	ข้อมูลจากการไฟฟ้าส่วน
Off Peak	2.6295 (บาท/หน่วย)	ภูมิภาค
ค่า Ft เฉลี่ยของปี 2555 -2558	0.2325 สตางค์ต่อหน่วย	
สัดส่วนจำนวนวัน Peak : Off Peak	68% : 32%	
การเพิ่มขึ้นของอัตราค่าไฟฟ้า	2.25% ต่อปี	อัตราการเติบโตย้อนหลัง 3 ปี
<b>ผลประโยชน์ของโครงการ</b>		
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งปี	- กิโลวัตต์-ชั่วโมง/หน่วยไฟฟ้า	จากการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้า
<b>ต้นทุนของโครงการ</b>		
ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา	-	อ้างอิงจากงานติดตั้งระบบ
งาน Monitoring System (PLC Panel) และเครื่องมือวัด	-	ผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์
งานระบบป้องกันไฟฟ้าไหล	-	แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบน
ค่าปรับปรุงสภาพหลังคา	-	หลังคาอาคารใน
ค่าตรวจเช็คระบบและฝึกอบรม	-	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
งานออกแบบและวิศวกรรม	-	(ต้นทุนเฉลี่ย 35.16 บาทต่อหน่วย)

## บทที่ 4

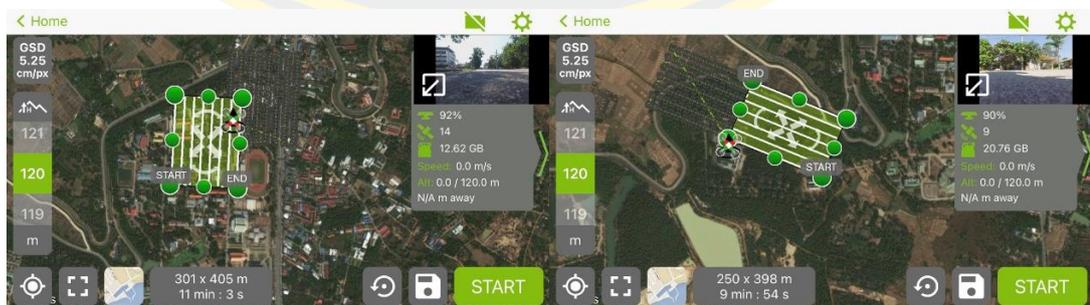
### ผลการวิจัย

จากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล การสำรวจด้วยการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ
2. การวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์
3. การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร
4. ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

#### การบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

จากการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) บริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ตำบลชมพู อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง พิกัด  $18^{\circ}14'03.5''\text{N}$ ,  $99^{\circ}29'14.7''\text{E}$  กำหนดค่า GSD (Ground Sample Distance) ความละเอียดเท่ากับ 5.06 เซนติเมตรต่อพิกเซล ความสูงการบินเหนือจุดขึ้นบิน 135 เมตร ส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) ร้อยละ 80 รูปแบบการบินแบบทั่วไป (ภาพที่ 4-1) ทำการบินจำนวน 20 เที่ยวบิน จำนวนภาพถ่ายทั้งหมด 2,253 ภาพ ครอบคลุมพื้นที่ในการสำรวจ 2.35 ตารางกิโลเมตร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้





ภาพที่ 4-1 การบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

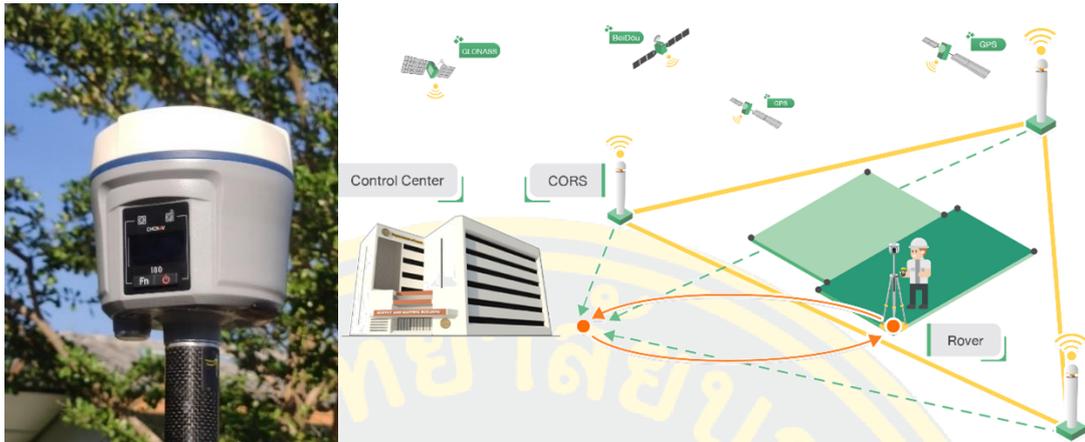
### 1. การกำหนดและการหาค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบภาพถ่าย

การกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายหรือจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points: GCP) และจุดตรวจสอบภาพถ่าย (Check Points: CP) กระจายครอบคลุมพื้นที่ โดยกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน 12 จุด เพื่อใช้ในการตรึงและปรับแก้ภาพถ่าย และกำหนดจุดตรวจสอบ 26 จุด เพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าพิกัดของภาพถ่ายทางอากาศหลังจากการประมวลผลแล้ว ตำแหน่งของจุดควบคุมภาคพื้นดินใช้สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมขนาด 1.50x 1.50 เมตร และจุดตรวจสอบภาพถ่ายใช้ตำแหน่งต่าง ๆ บนที่เป็ดโล่ง ให้สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนจากภาพถ่ายทางอากาศ ดังภาพ 4-2

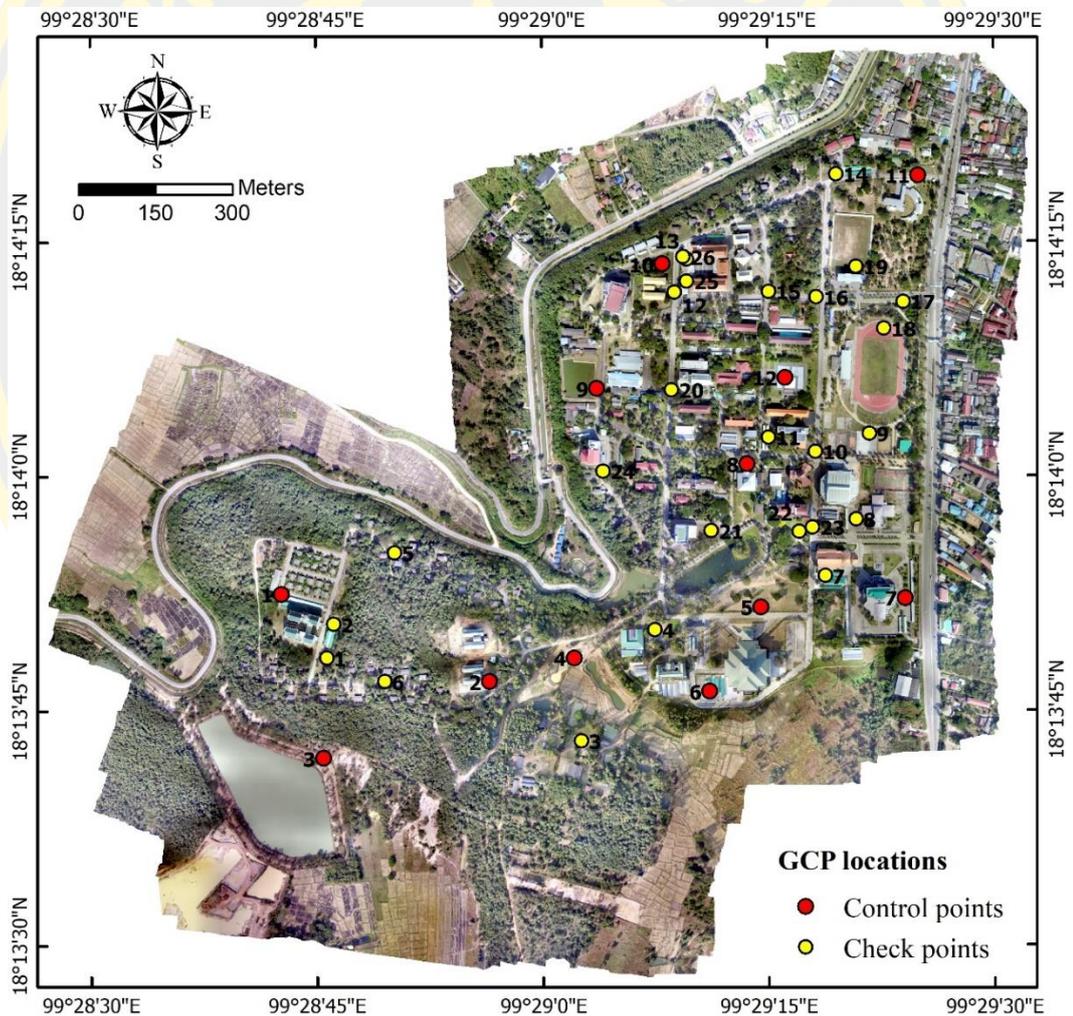


ภาพที่ 4-2 การกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบภาพถ่าย

การหาค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS รุ่น CHC i80 ทำการประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดโดยใช้โครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS NETWORK) ของกรมที่ดิน (ภาพที่ 4-3) ค่าพิกัดที่ได้อยู่ในระบบพิกัด UTM อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน WGS1984 ตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบแสดงดังภาพ 4-4



ภาพที่ 4-3 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และหลักการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์



ภาพที่ 4-4 ตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Control points) และจุดตรวจสอบ (Check points)

## 2. การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ เป็นกระบวนการที่สำคัญต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งและคุณภาพของข้อมูล จำเป็นต้องมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลข้อมูลให้เหมาะสม และตรวจสอบรายงานผลการประมวลผลทุกขั้นตอนให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับประกอบด้วย 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 การจัดเรียงภาพถ่ายตามแนวนอน (Align photo) ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการนำภาพมาจัดเรียงแล้วเลือกเอาจุดของภาพที่เหมือนกันมาสร้างโมเดล กำหนดความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพ (Accuracy) เป็น highest ซึ่งจะมีความถูกต้องของจุดข้อมูลสูงสุดแต่ทำให้ใช้เวลาประมวลผลนาน วิธีการจับคู่ของภาพ (Pair preselection) แบบ Generic จะคำนวณพื้นที่ทับซ้อนกันของภาพที่ความละเอียดต่ำที่สุดที่สามารถนำภาพมาคัดเลือกจุดได้โดยไม่ต้องมีค่าพิกัดของภาพที่นำมาจัดเรียงได้ทั้งหมดจำนวน 2,253 ภาพ

2.2 การกำหนดจุดควบคุมภาพ เป็นการปรับความถูกต้องเชิงตำแหน่งของโมเดลให้มีความถูกต้องมากขึ้นด้วยการทำจุดควบคุมภาพ กำหนดระบบพิกัด WGS84/UTM zone 47N (EPSG:32647) แล้วระบุตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบที่ปรากฏในภาพถ่ายและระบุค่าพิกัด X และ Y ของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบที่ได้จากการรังวัดแบบ RTK GNSS NETWORK ทั้งหมด 38 จุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าความคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
Control points RMSE						
12	1.19498	1.4352	0.378067	1.86755	1.90544	0.132
Check points RMSE						
26	6.7107	7.35172	13.0484	9.95396	16.4116	0.229

2.3 การสร้างโมเดล Dense Point Cloud เป็นการสร้างกลุ่มของพอยท์คลาวด์แบบพิเศษที่มีพื้นฐานมาจากการคำนวณจากตำแหน่งของกล้องที่ทำการถ่ายภาพทีละภาพ กำหนดความ

ละเอียดของจุดที่ต้องการเพิ่มขึ้น (Quality) ที่ระดับสูง (High) และกำหนด Depth filtering แบบ Moderate จะเป็นการเพิ่มจำนวนจุดให้พอดีสม่ำเสมอทำให้ข้อมูลไม่ขรุขระจนเกินไป

2.4 สร้าง Mesh เป็นการนำข้อมูลพอยท์คลาวด์ทั้งหมด มาสร้างพื้นผิวของวัตถุในภาพ การสร้างพื้นผิวขึ้นอยู่กับข้อมูลและวิธีการสร้างพื้นผิวใช้วิธี Height field ที่จะคำนวณภาพพื้นผิวแบบ ระนาบตั้งฉากภูมิประเทศ มองจาก Top view เหมาะสำหรับการทำแผนที่ภูมิประเทศ ใช้ RAM ในการประมวลผลน้อยและคำนวณเสร็จไวกว่าแบบ Arbitrary ข้อมูลที่นำมาสร้างพื้นผิว คือ Dense Cloud จากขั้นตอนก่อนหน้า สำหรับ Interpolation เป็นการปรับแก้พื้นผิวข้อมูลโดยการประมาณค่า กำหนด Enabled เป็นการปรับให้เหมาะสม หากพื้นที่ตรงไหนมีจุดเพียงพอก็จะไม่สร้างเพิ่ม

2.5 สร้าง Texture เป็นการนำพื้นสีของภาพมาใส่ในโมเดล ทำให้โมเดลมีสีสันสวยงาม มีความละเอียดของเม็ดสีเพิ่มขึ้น กำหนด Mapping mode แบบ Generic ทำให้ภาพมีสีทั่วไป การปรับสี (Blending mode) แบบ Mosaic ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้น ส่วนค่าพิกเซลของโมเดล (Texture size/count) ค่ายิ่งมากยิ่งละเอียด โดยปกติใช้ค่าเริ่มต้น คือ 4,096

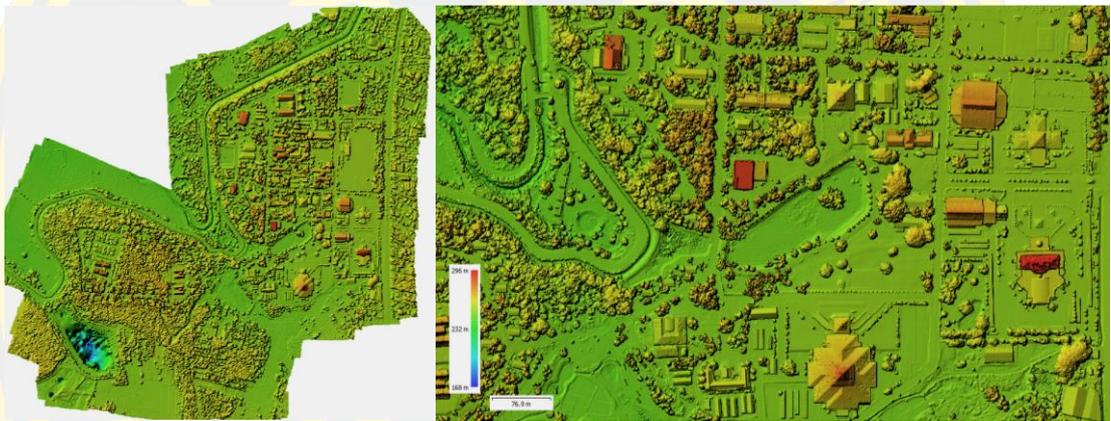
2.6 สร้าง DEM การสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลข DEM หรือ DSM จากข้อมูล Dense cloud กำหนด Projection เลือกระบบพิกัดให้อยู่ในรูปแบบ WGS84/UTM zone 47N (EPSG: 32647) และความละเอียดของแบบจำลอง (Resolution) 0.1 เมตร/พิกเซล

2.7 สร้างภาพออร์โธ (Ortho mosaic) จากข้อมูล DEM กำหนด Projection เลือก ระบบพิกัดให้อยู่ในรูปแบบ WGS84/UTM zone 47N (EPSG: 32647) ส่วนพารามิเตอร์ Blendine เลือกแบบ Mosaic คือ การต่อขอบของภาพแต่ละภาพให้มีความสมดุลกัน และกำหนดขนาดของ Pixel เท่ากับ 0.1 เมตร

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional บนเครื่องคอมพิวเตอร์ CPU รุ่น AMD Ryzen 9 3950X ขนาด 16 Core ความจุ RAM 64 กิกะไบต์ (GB) การ์ดจอ NVIDIA Quadro P2000 หน่วยความจำ 5 กิกะไบต์ ระบบปฏิบัติการ Windows 10 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบอัตโนมัติ ประกอบด้วย ข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ ดังภาพที่ 4-5 และข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศหรือ DSM ที่มีความละเอียดจุดภาพ 10 เซนติเมตร/พิกเซล ใช้เวลาในการประมวลผล 29 ชั่วโมง 10 นาที ผลลัพธ์ดังภาพที่ 4-6 สำหรับนำไปวิเคราะห์ค่ารังสีดวงอาทิตย์ต่อไป



ภาพที่ 4-5 ภาพถ่ายทางอากาศ (Orthophoto)



ภาพที่ 4-6 แบบจำลองพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model: DSM)

### การวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์

แสงจากดวงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermonuclear reaction) หรือปฏิกิริยาหลอมตัวทางนิวเคลียร์ในดวงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงนอกชั้นบรรยากาศของโลกจะมีความเข้มแสงโดยเฉลี่ยประมาณ 1,367 วัตต์ต่อตารางเมตร แต่กว่าจะลงมาถึงพื้นโลกพลังงานบางส่วนต้องสูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ที่ห่อหุ้มโลก เช่น ชั้นโอโซน ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงเหลือประมาณ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร หรือประมาณร้อยละ 70 รังสีดวงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ารังสีในรูปความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar irradiance) หน่วยเป็นวัตต์/ตารางเมตร และพลังงานแสงอาทิตย์ (solar radiation หรือ solar insolation) หน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร ขึ้นอยู่กับวันที่และเวลา รวมถึงตำแหน่งบนพื้นโลก ความแตกต่างของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์กับพลังงาน

แสงอาทิตย์ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นปริมาณความเข้มของกำลังงานที่ได้จากรังสีอาทิตย์ แต่พลังงานแสงอาทิตย์เป็นความเข้มรังสีอาทิตย์รวมตลอดช่วงเวลาที่ทำการวัด

สำหรับการวิเคราะห์รังสีอาทิตย์ เป็นการวิเคราะห์ปริมาณรังสีของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่ในช่วงเวลาที่กำหนด โดยใช้เครื่องมือ Point Solar Radiation ในชุดเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation toolset) ของซอฟต์แวร์ ArcGIS Desktop 10.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย 1) ข้อมูล DSM เฉพาะส่วนที่เป็นหลังคาอาคาร (ภาพที่ 4-7)



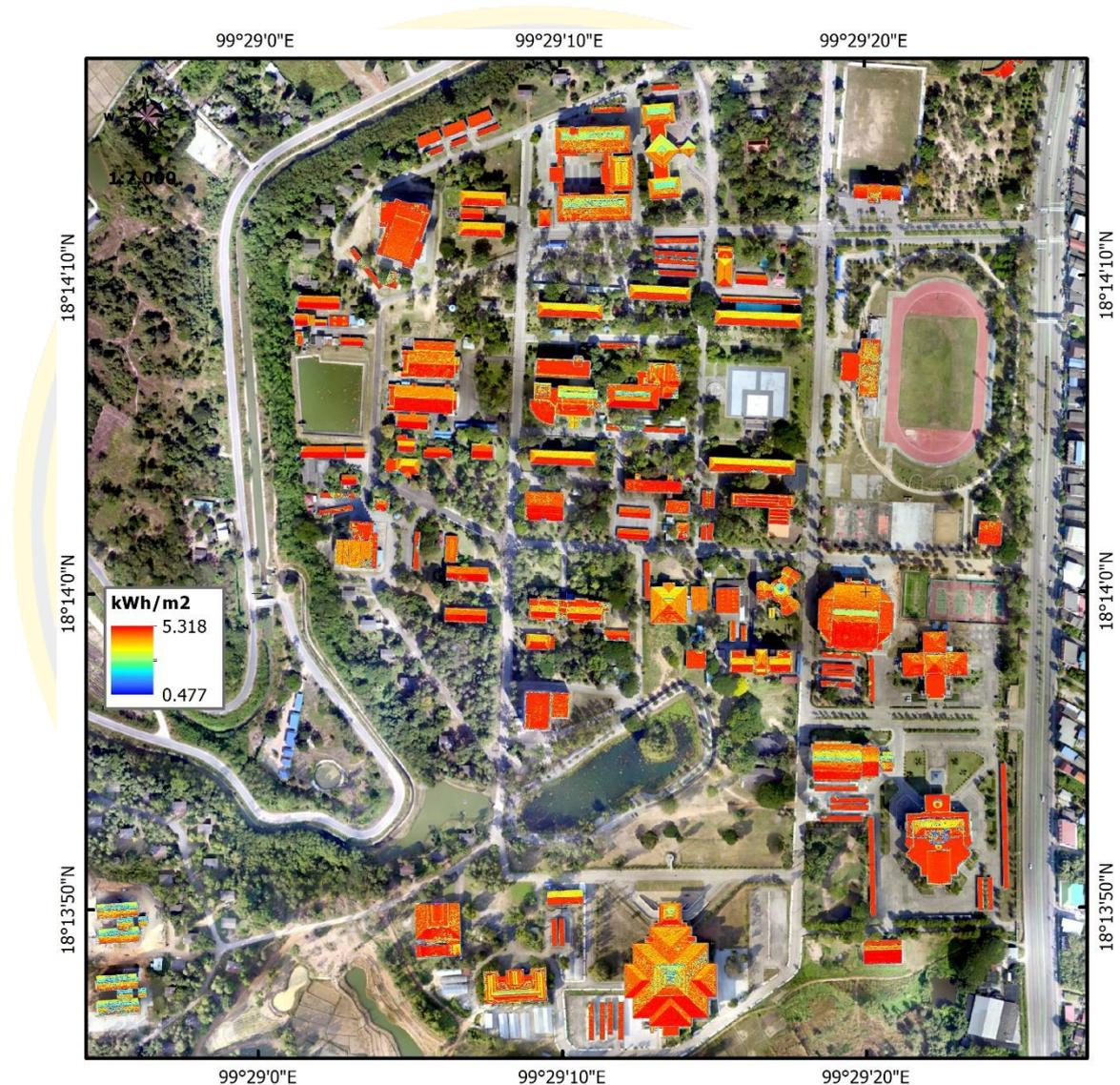
ภาพที่ 4-7 ข้อมูล DSM เฉพาะส่วนของหลังคาอาคาร

และ 2) ข้อมูล Points feature คือ ข้อมูลเวกเตอร์ที่แสดงจุดตำแหน่ง (Point) ที่ได้จากการแปลงข้อมูล DSM ในข้อ 1) ด้วยเครื่องมือ Raster to point ตำแหน่งของแต่ละจุดคือตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละพิกเซล ทั้งนี้ ยังประกอบด้วยข้อมูลคุณลักษณะ (Attribute table) ของแต่ละจุดประกอบด้วยค่าระดับความสูงของหลังคาอาคาร ค่าความลาดชัน (Slope) และทิศทางความลาดเอียง (Aspect) โดยกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Time configuration) รังสีดวงอาทิตย์ในแต่ละฤดูกาล (Special days) รายสัปดาห์ (Multiple days in a year) และรายเดือน (Whole year with monthly interval) พ.ศ. 2563 ผลการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ดังต่อไปนี้

### 1. รังสีดวงอาทิตย์ในแต่ละฤดูกาล

ช่วงวิษุวัต เป็นช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์โคจรตัดกับเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า ซึ่งมีอยู่ 2 จุดตรงข้ามกัน เมื่อดวงอาทิตย์โคจรผ่านจุดใดจุดหนึ่งทำให้เกิดเวลากลางวันและกลางคืนเท่ากันทั่วโลก

ดังนั้นในรอบปีหนึ่ง ๆ ดวงอาทิตย์จึงโคจรผ่านจุดวิษุวัต 2 ครั้ง ครั้งหนึ่งจะผ่านวันที่ 21 มีนาคม เรียกว่า วสันตวิษุวัต (Vernal equinox) และอีกครั้งหนึ่งจะผ่านในวันที่ 21 กันยายน เรียกว่า ศารทวิษุวัต (Autumnal equinox) แผนที่รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงวิษุวัตดังภาพที่ 4-8

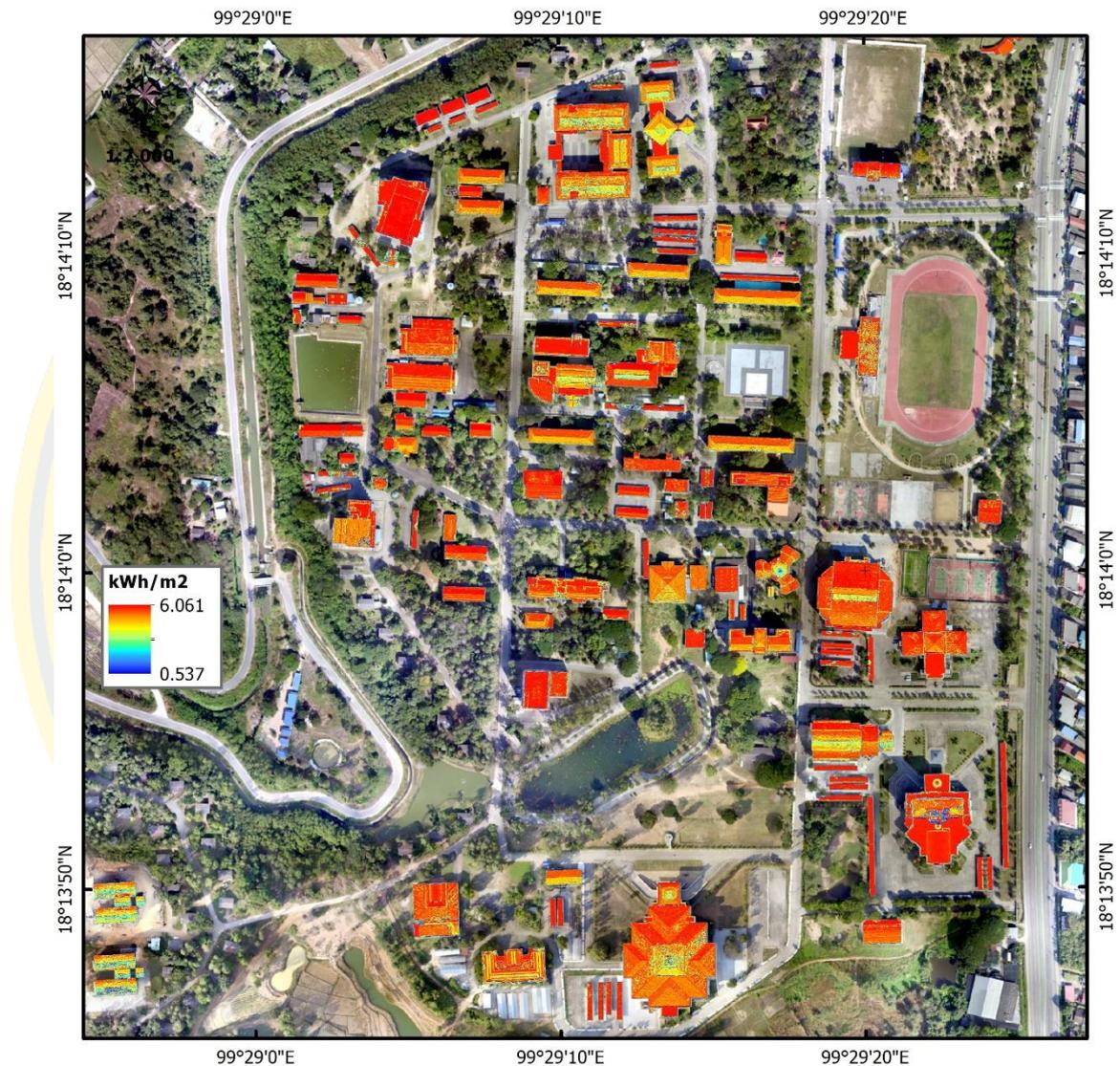


ภาพที่ 4-8 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์รายวันในช่วงวิษุวัต (21 มี.ค.-20 มิ.ย. และ 22 ก.ย.-20 ธ.ค.)

จากภาพที่ 4-8 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงวิษุวัต ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งวันอยู่ระหว่าง 0.477 – 5.318 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ส่วนของหลังคาอาคารที่ลาดเอียงไปทางทิศใต้จะได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่าส่วนอื่นของหลังคา

ฤดูร้อน ในซีกโลกเหนือจุดที่เห็นดวงอาทิตย์อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรมากที่สุดเรียกว่า อุดรายนหรือครีษมายัน (Summer solstice) ตรงกับประมาณวันที่ 21-22 มิถุนายน ซีกโลกเหนือ

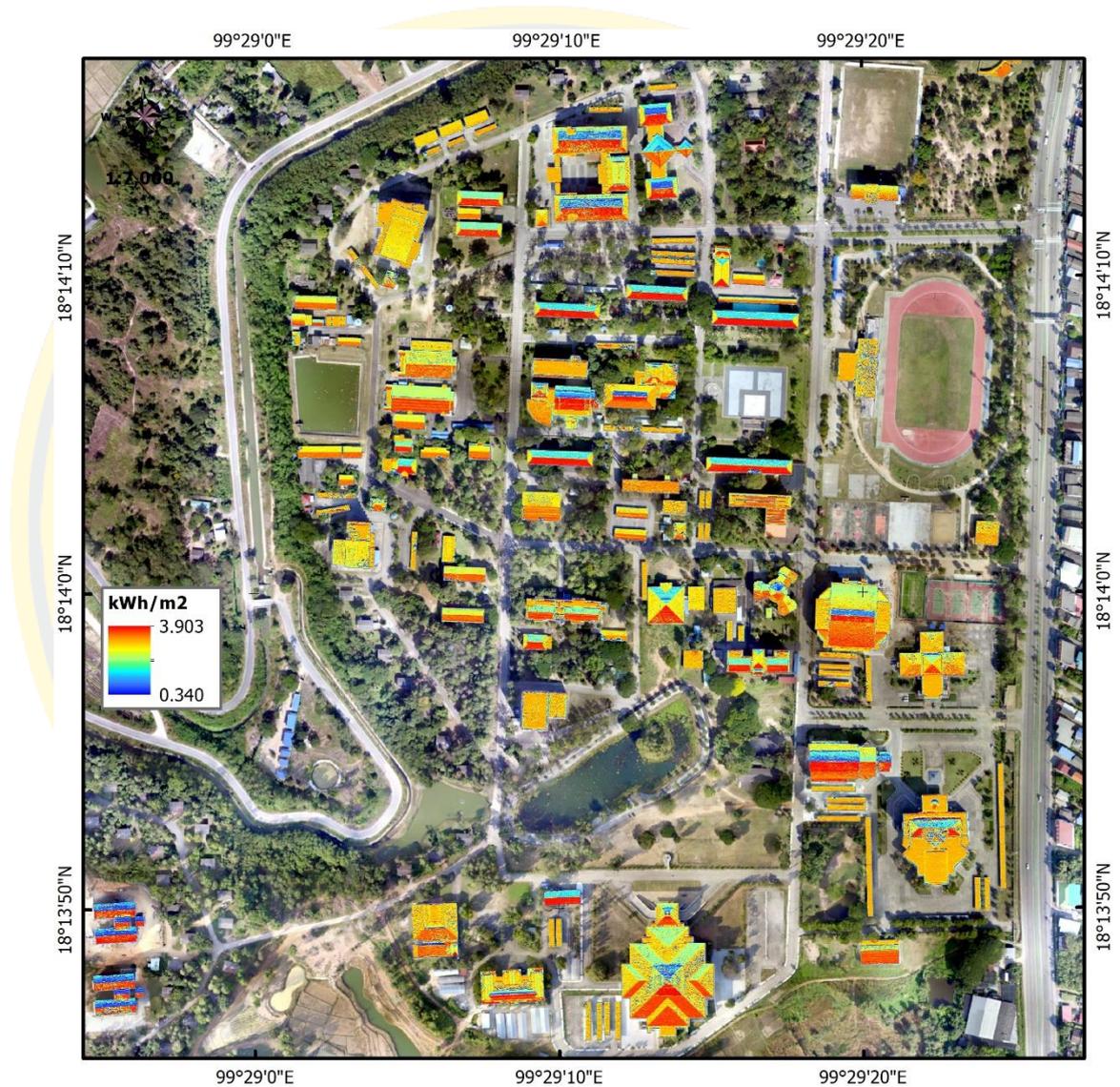
ได้รับแสงอาทิตย์มากที่สุดและส่องลงมายังพื้นโลกเกือบตรงดิ่ง ระยะเวลากลางวันยาวกว่ากลางคืน  
แผนที่รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงศรีษมายัน ดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 รังสีดวงอาทิตย์รายวันในช่วงศรีษมายัน (21 มิ.ย.-21 ก.ย.)

จากภาพที่ 4-9 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงศรีษมายัน ช่วงนี้เป็นช่วงที่รังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าช่วงอื่นของปี ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งวันอยู่ระหว่าง 0.537 – 6.061 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ส่วนของหลังคาอาคารที่มีลักษณะราบเรียบ (ดาดฟ้า) หรือลาดชันน้อย จะได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่าส่วนอื่นของหลังคา

ฤดูหนาว ดวงอาทิตย์อยู่ใต้เส้นศูนย์สูตรมากที่สุดเรียกว่า ทักษิณายันหรือเหมายัน (Winter solstice) ตรงกับประมาณวันที่ 21-22 ธันวาคม แผนที่รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงเหมายัน ดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 รังสีดวงอาทิตย์รายวันในช่วงเหมายัน (21 ธ.ค.-20 มี.ค.)

จากภาพที่ 4-10 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงเหมายัน ช่วงนี้เป็นช่วงที่รังสีดวงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าช่วงอื่นของปี ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งวันอยู่ระหว่าง 0.34 – 3.903 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ส่วนของหลังคาอาคารที่ลาดเอียงไปทางทิศใต้จะได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่าส่วนอื่นของหลังคา

จากการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏ ลำปางแต่ละฤดูกาล พบว่าช่วงเวลาที่รังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูง คือ ช่วงครีษมายันหรือฤดูร้อน ที่โลกจะหันซีกเหนือเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด กลางวันของซีกโลกเหนือจะยาวที่สุด ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 5.30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ส่วนช่วงเวลาที่รังสีดวงอาทิตย์มีค่าต่ำ คือ เหมายนหรือฤดูหนาว ที่โลกจะหันซีกใต้เข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 2.79 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ส่วนช่วงวิษุวัต ที่กลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งวันมีค่าเท่ากับ 4.55 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ดังตารางที่ 4-2 ทั้งนี้ ส่วนของหลังคาอาคารที่ลาดเอียงไปทางทิศใต้ และหลังคาที่มีลักษณะราบเรียบ (ดาดฟ้า) หรือ ลาดชันน้อย จึงเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าส่วนอื่นของหลังคา

ตารางที่ 4-2 รังสีดวงอาทิตย์รายวันในแต่ละฤดูกาล

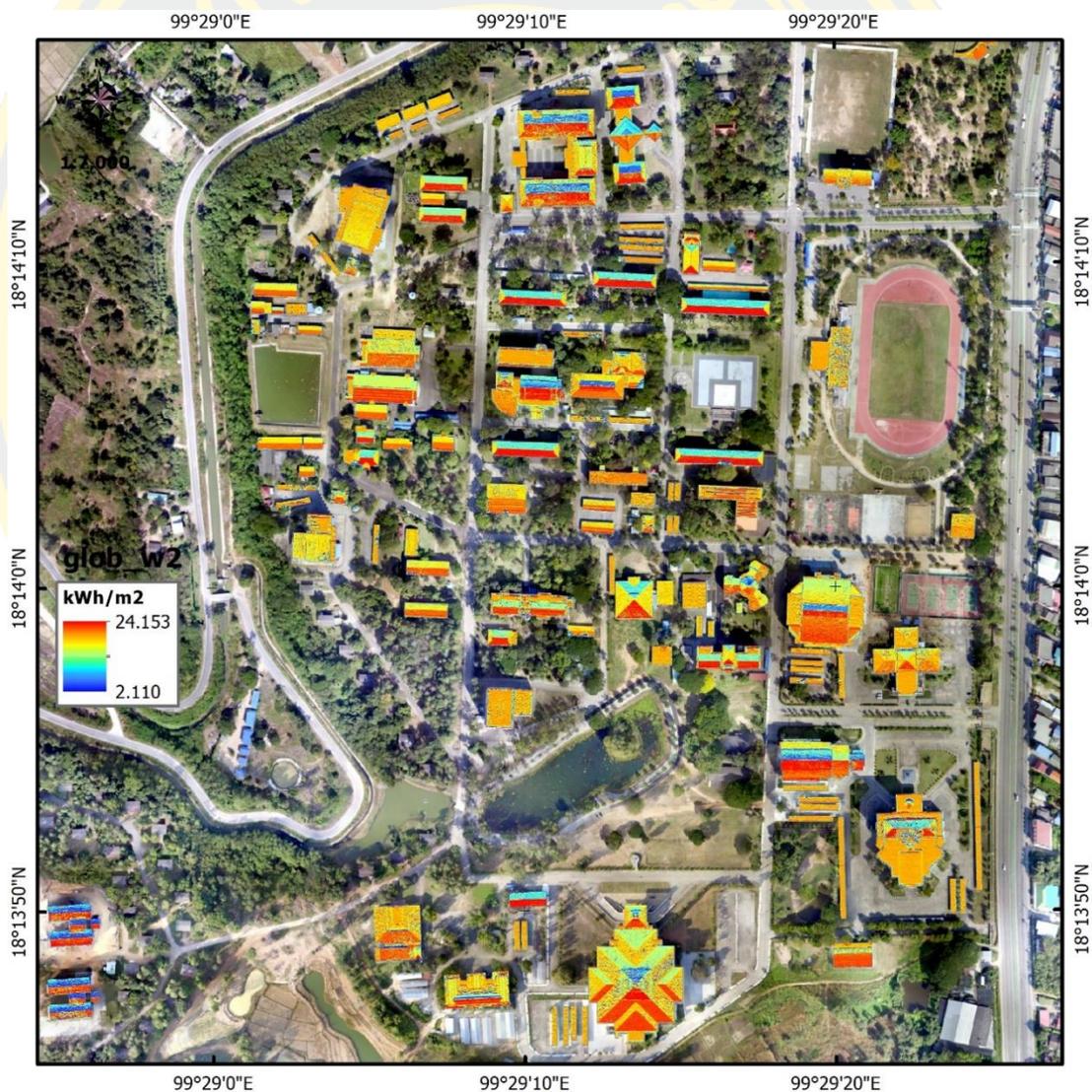
ฤดูกาล	รังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งวัน (kWh/m <sup>2</sup> )		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
วิษุวัต (Equinox)	0.48	5.32	4.55
ครีษมายัน (Summer solstice)	0.54	6.06	5.30
เหมายน (Winter solstice)	0.34	3.90	2.79

## 2. รังสีดวงอาทิตย์รายสัปดาห์

จากการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ (รังสีรวม) ที่ตกกระทบบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางแต่ละสัปดาห์ใน พ.ศ. 2563 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึง 31 ธันวาคม จำนวน 52 สัปดาห์ พบว่า ค่ารังสีดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบปี ในช่วงสัปดาห์ที่ 48-51 ของปี (25 พ.ย.-22 ธ.ค.) และช่วงสัปดาห์ที่ 1-2 ของปี (1 ม.ค.-14 ม.ค.) รังสีดวงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าช่วงเวลาอื่นของปี คือ 17.55-19.35 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ส่วนในช่วงสัปดาห์ที่ 18-32 ของปี (29 เม.ย.-11 ส.ค.) รังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นของปี คือ 31.13-31.78 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งสัปดาห์เท่ากับ 27.23 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งวันเท่ากับ 3.89

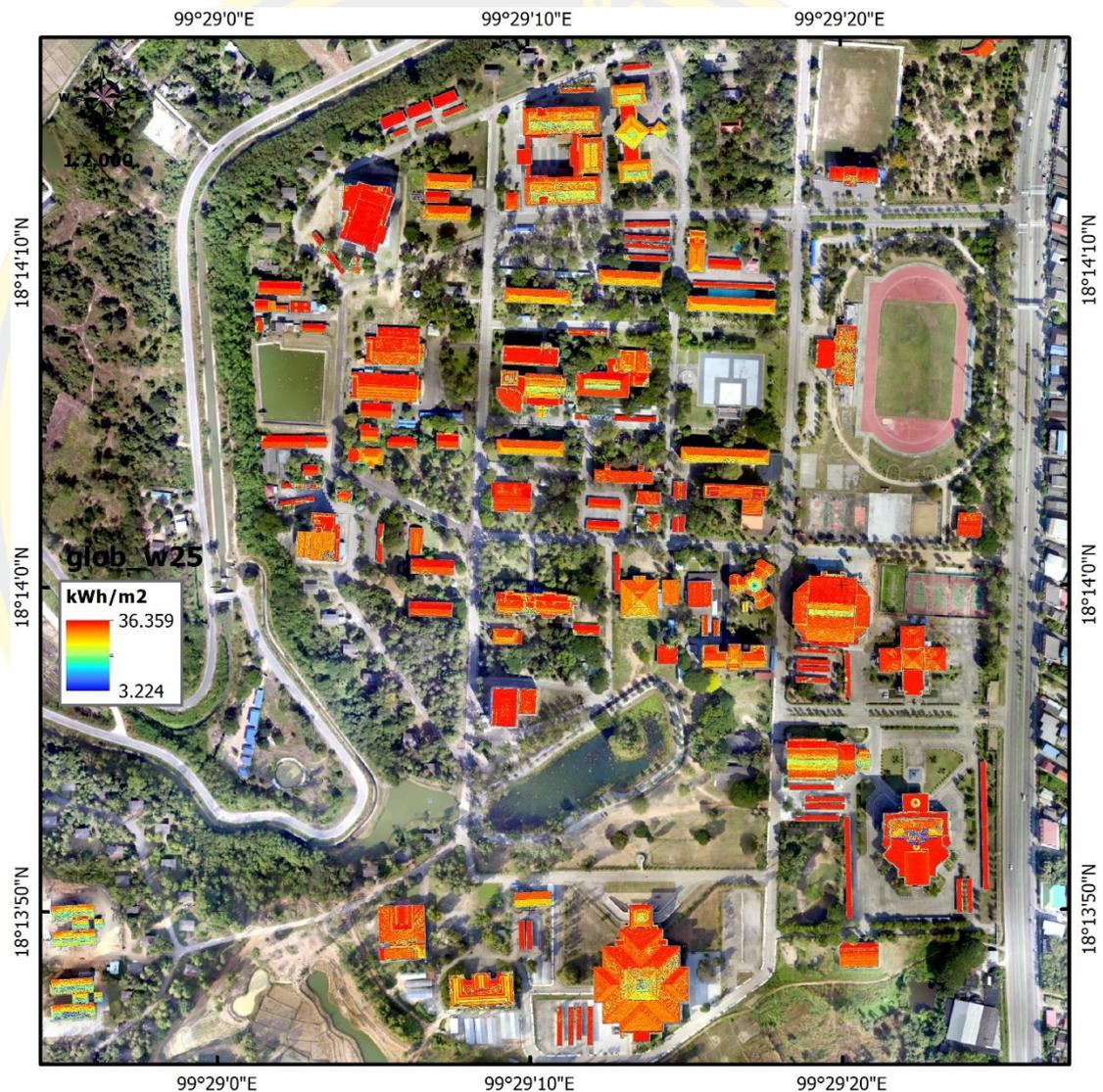
กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร โดยผลรวมตลอดทั้งปีของค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเท่ากับ 1,415.8 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร

จากภาพที่ 4-11 แสดงค่ารังสีดวงอาทิตย์ในสัปดาห์ที่ 2 ของปี (8-14 ม.ค. 2563) ซึ่งเป็นสัปดาห์ที่หลังคาอาคารได้รับรังสีดวงอาทิตย์ต่ำที่สุดในรอบปี ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารตลอดสัปดาห์สูงสุดเท่ากับ 24.153 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ลักษณะหลังคาที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูง คือ ส่วนของหลังคาที่ลาดเอียงไปทางทิศใต้ รองลงมาคือหลังคาที่มีลักษณะราบเรียบหรือลาดฟ้า ส่วนหลังคาที่ลาดเอียงไปทางทิศเหนือจะได้รับรังสีดวงอาทิตย์ต่ำ



ภาพที่ 4-11 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์สัปดาห์ที่ 2 (8-14 ม.ค. 2563)

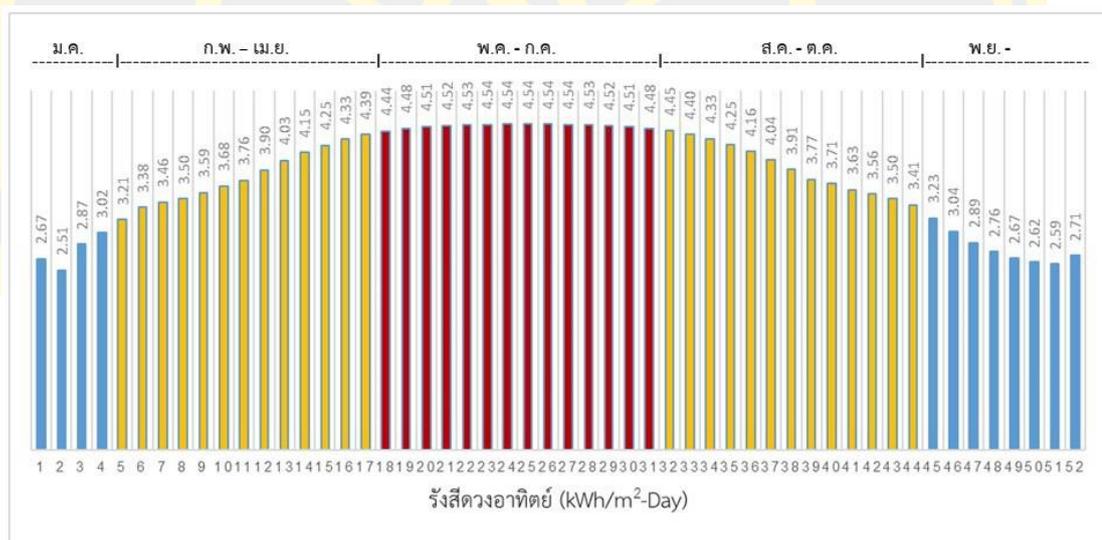
จากภาพที่ 4-12 แสดงค่ารังสีดวงอาทิตย์ในสัปดาห์ที่ 25 (17-23 มิ.ย. 2563) เป็นสัปดาห์ที่หลังคาอาคารได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงที่สุดในรอบปี ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารตลอดสัปดาห์สูงสุดเท่ากับ 36.359 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ลักษณะหลังคาที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูง คือ หลังคาที่มีลักษณะราบเรียบหรือลาดฟ้า ร่องลงมาคือ หลังคาที่ลาดเอียงไปทางทิศเหนือและทิศใต้



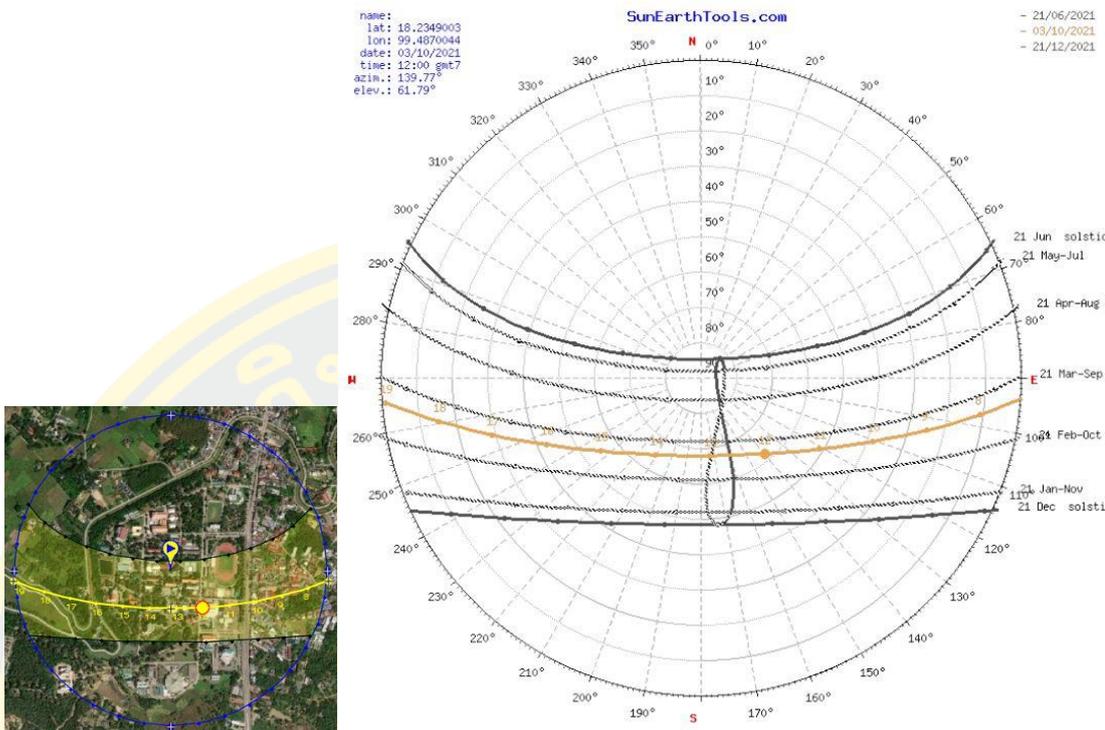
ภาพที่ 4-12 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์สัปดาห์ที่ 25 (17-23 มิ.ย. 2563)

ผลการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงปี พ.ศ.2563 ดังภาพที่ 4-13 สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าในแต่ละวันในช่วงเวลาหนึ่งปี โดยในแต่ละวันที่เวลาเดียวกันดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อย ๆ เมื่อครบรอบ 1 ปี ดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนตำแหน่ง

กลับมาที่เดิม ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในรอบปีนี้มีรูปคล้ายเลข 8 ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าปรากฏการณ์แอนะเลมมา (Analemma) ที่ตำแหน่งที่ตั้งของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำปางปรากฏตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี ดังภาพที่ 4-12 ที่ในเดือนเมษายนดวงอาทิตย์อยู่ตำแหน่งที่ไขว้กันของเลข 8 แล้วเคลื่อนไปทางเหนือโดยดวงอาทิตย์อยู่ตำแหน่งเหนือสุดเรียกว่า Summer solstice (21 มิถุนายน) ก่อนจะเคลื่อนลงมาทางใต้ถึงตำแหน่งที่ไขว้กันของเลข 8 อีกครั้งในเดือนสิงหาคม ก่อนจะเคลื่อนที่ไปทางใต้ โดยดวงอาทิตย์อยู่ตำแหน่งใต้สุดเรียกว่า Winter solstice (21 ธันวาคม) แล้วเคลื่อนที่วกกลับขึ้นมาทางเหนืออีกครั้ง ในช่วงโค้งด้านบนของเลข 8 (เดือนพฤษภาคมถึงกรกฎาคม) ตรงกับช่วงที่ขั้วโลกเหนือหันเข้าหาดวงอาทิตย์หรือฤดูร้อน รังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุดในรอบปี ส่วนช่วงโค้งด้านล่างของเลข 8 (เดือนพฤศจิกายนถึงมกราคม) ตรงกับช่วงที่ขั้วโลกเหนือหันออกจากดวงอาทิตย์ หรือฤดูหนาว รังสีดวงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดในรอบปี



ภาพที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์รายสัปดาห์ในช่วง ปี 2563



ภาพที่ 4-14 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในรอบปี 2563 บริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

ที่มา: [www.sunearthtools.com](http://www.sunearthtools.com)

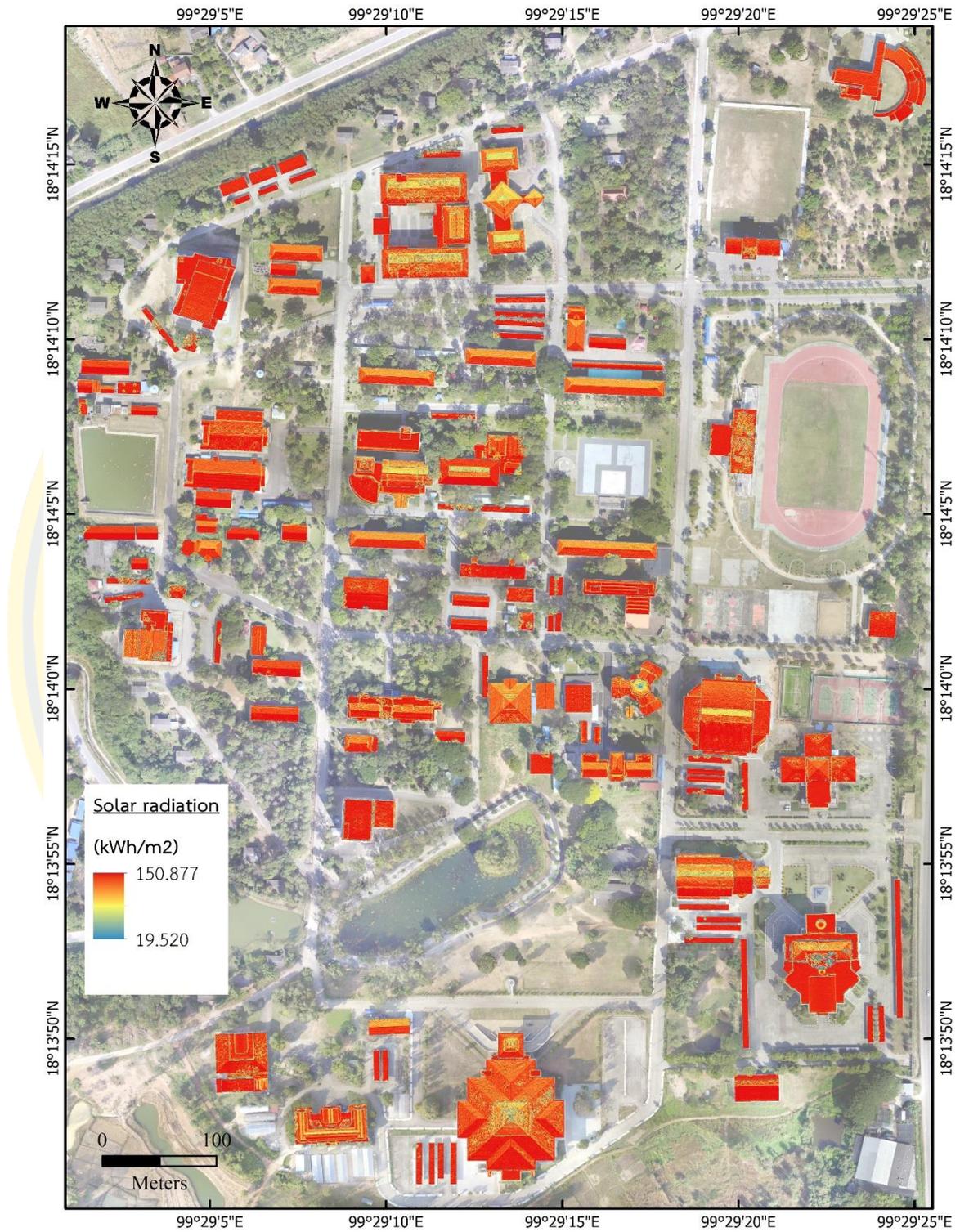
### 3. รังสีดวงอาทิตย์รายเดือน

จากการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางในแต่ละเดือน พบว่า เดือนมิถุนายนเป็นเดือนที่หลังคาอาคารได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงที่สุดในรอบปี มีค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งเดือนเท่ากับ 163.7 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ลักษณะหลังคาที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูง คือ ส่วนของหลังคาที่มีลักษณะราบเรียบหรือลาดฟ้า ส่วนเดือนธันวาคมเป็นเดือนที่หลังคาอาคารได้รับรังสีดวงอาทิตย์ต่ำสุดในรอบปี โดยมีค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งเดือนเท่ากับ 87.10 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ลักษณะหลังคาที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูง คือ ส่วนของหลังคาที่มีลักษณะลาดเอียงไปทางทิศใต้ ในปี 2563 รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหลังคาอาคารเฉลี่ยต่อเดือนอยู่ระหว่าง 19.52 – 150.877 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ดังภาพที่ 4-15

ตารางที่ 4-3 ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบรายเดือนใน พ.ศ. 2563

เดือน	รังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งเดือน จาก	รังสีดวงอาทิตย์รายวัน (kWh/m <sup>2</sup> )		
		จากการ	การตรวจวัดความ	ฐานข้อมูลความเข้ม

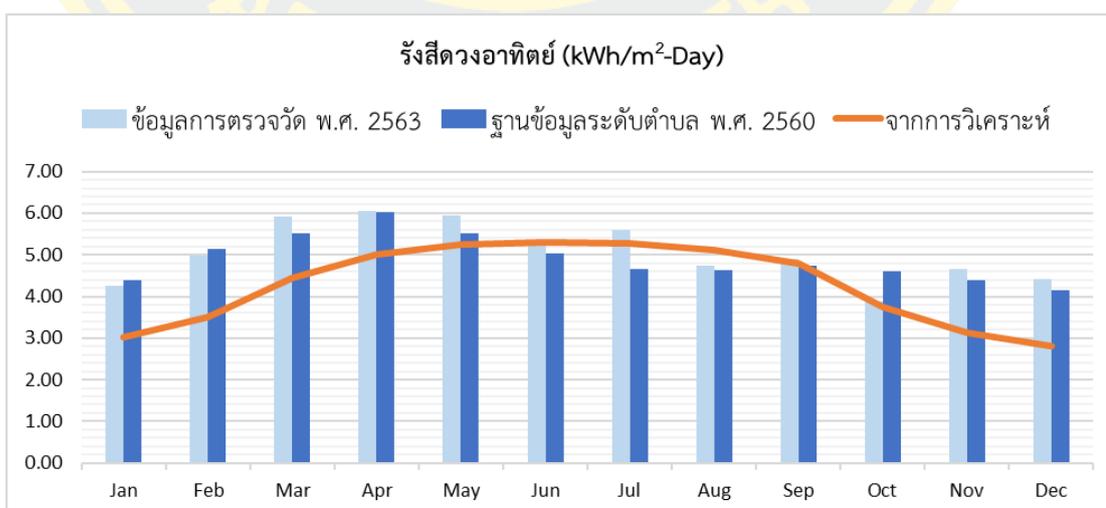
	การวิเคราะห์ (kWh/m <sup>2</sup> )	วิเคราะห์	เข้มแสงอาทิตย์ ปี 2563	รังสีอาทิตย์ระดับ ตำบล ปี 2560
มกราคม	93.33	3.01	4.25	4.39
กุมภาพันธ์	101.99	3.52	4.97	5.15
มีนาคม	137.44	4.43	5.91	5.52
เมษายน	150.35	5.01	6.06	6.04
พฤษภาคม	162.95	5.26	5.94	5.51
มิถุนายน	158.85	5.29	5.28	5.04
กรกฎาคม	163.70	5.28	5.59	4.65
สิงหาคม	158.76	5.12	4.75	4.62
กันยายน	143.55	4.79	4.89	4.74
ตุลาคม	116.08	3.74	3.87	4.61
พฤศจิกายน	94.25	3.14	4.65	4.38
ธันวาคม	87.10	2.81	4.43	4.15
เฉลี่ยต่อเดือน	130.69	4.28	5.05	4.90
รวมทั้งปี	1,568.34	-	-	-



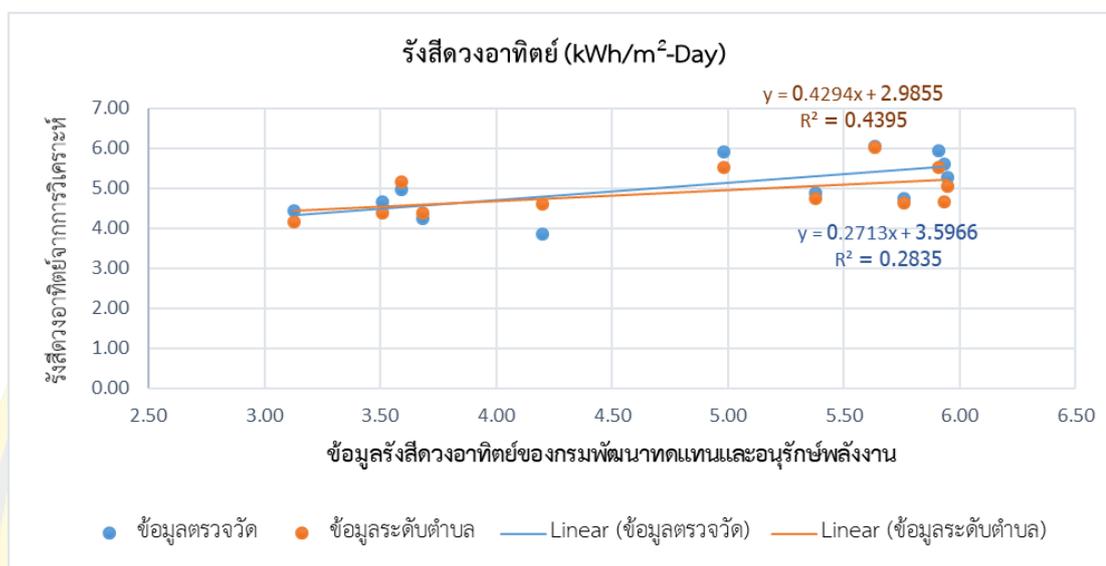
ภาพที่ 4-15 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์เดือนเฉลี่ยต่อเดือนใน พ.ศ. 2563

จากการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏ ลำปาง ในแต่ละเดือน พบว่า ค่ารังสีดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเดือนดังตารางที่ 4-3 โดยในช่วงเดือนธันวาคม-มกราคม รังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งเดือนมีค่าต่ำกว่าช่วงเดือนอื่นของปี คือ 87.10-93.33 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ส่วนในช่วงเดือนพฤษภาคม-กรกฎาคม รังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นของปี คือ 158.85-163.70 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร โดยเฉลี่ยแล้วในแต่ละเดือนหลังคาอาคารได้รับรังสีดวงอาทิตย์ 130.69 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร และเมื่อรวมค่ารังสีดวงอาทิตย์ทุกเดือนจะได้ค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งปี เท่ากับ 1,568.34 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร

เมื่อหาค่าเฉลี่ยจากรังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งเดือนเป็นค่ารังสีดวงอาทิตย์รายวัน ซึ่งเท่ากับ 4.28 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร เมื่อนำค่ารังสีดวงอาทิตย์รายวันที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย พ.ศ. 2563 บริเวณสถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง กรมอุตุนิยมวิทยา ตำบลพระบาท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง และฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ระดับตำบล พ.ศ. 2560 จากโครงการพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ฉบับใหม่สำหรับประเทศไทย ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน บริเวณตำบลชมพู อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นที่ตั้งของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง พบว่า รังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากข้อมูลการตรวจวัด และฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ดังภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบรังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์กับข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน



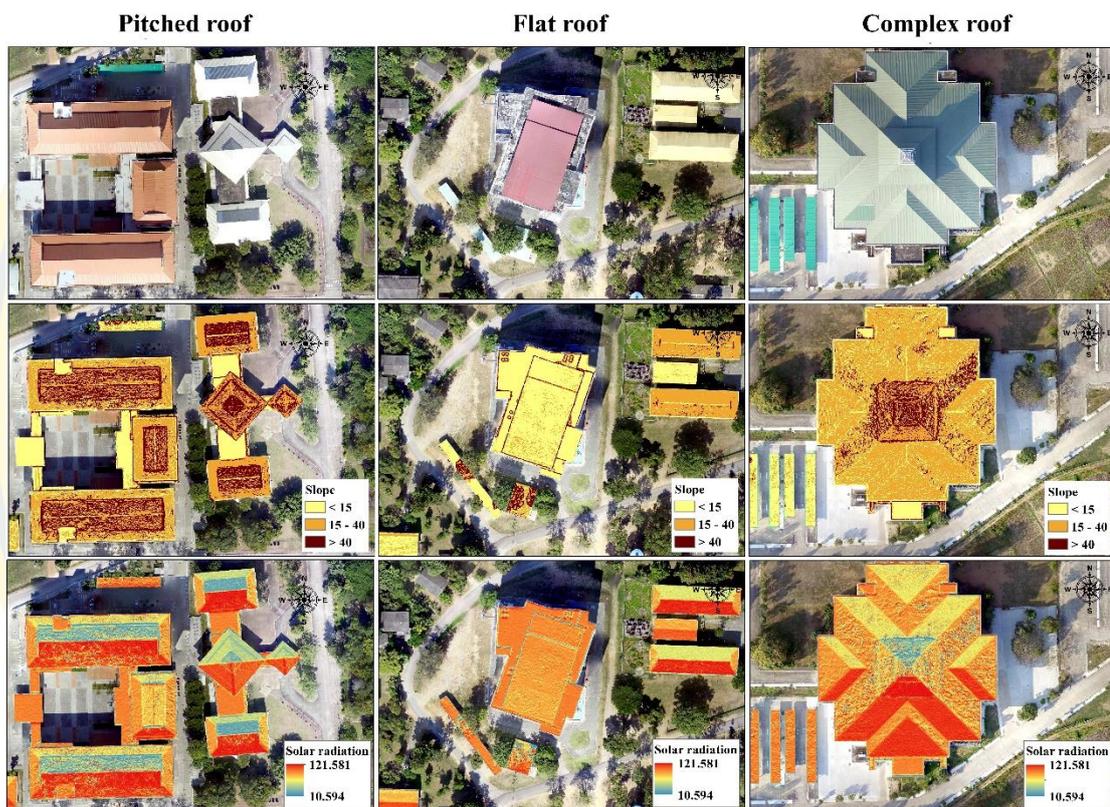
ภาพที่ 4-17 แผนภาพการกระจายของค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์กับข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

จากภาพที่ 4-17 ค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เชิงบวกหรือความสัมพันธ์แบบแปรตามกันกับข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โดยที่ค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ระดับตำบลจากโครงการพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ฉบับใหม่สำหรับประเทศไทยมากกว่า ข้อมูลจากการตรวจวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์บริเวณสถานีอุตุวิทยาลำปาง

#### 4. พื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับประเทศไทย ทิศที่เหมาะสมกับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้า ควรหันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ เพราะจะได้รับแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน จากดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก โดยเคลื่อนที่อ้อมไปทางทิศใต้ ในการติดตั้งสามารถเอียงแผงเซลล์แสงอาทิตย์เล็กน้อยประมาณ 15 องศา เพื่อให้แผงสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ ทิศเหนือเป็นทิศที่ได้รับแสงอาทิตย์น้อยที่สุด ทิศตะวันออกและทิศตะวันตกจะได้รับแสงอาทิตย์ระดับกลาง โดยได้รับแสงในช่วงเช้าถึงเที่ยงเท่านั้น ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้ไม่เต็มที่ ข้อมูลข้างต้นสอดคล้องกับแผนที่รังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์รังสี

ดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของปี ที่บ่งชี้ว่าส่วนของหลังคาที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงกว่าหลังคาในส่วนอื่น ๆ ได้แก่ หลังคาที่ลาดเอียงไปทางทิศใต้ ส่วนหลังคาอาคารที่มีความลาดชันสูง ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้รับก็จะลดลงด้วยจึงไม่เหมาะในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนหลังคาที่ราบเรียบหรือมีลักษณะเป็นดาดฟ้าหรือลาดเอียงเพียงเล็กน้อยได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงเช่นกัน แต่การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องวางแผงให้ลาดเอียงไปทางทิศใต้ประมาณ 15 องศา เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รับแสงอาทิตย์ได้เต็มประสิทธิภาพ

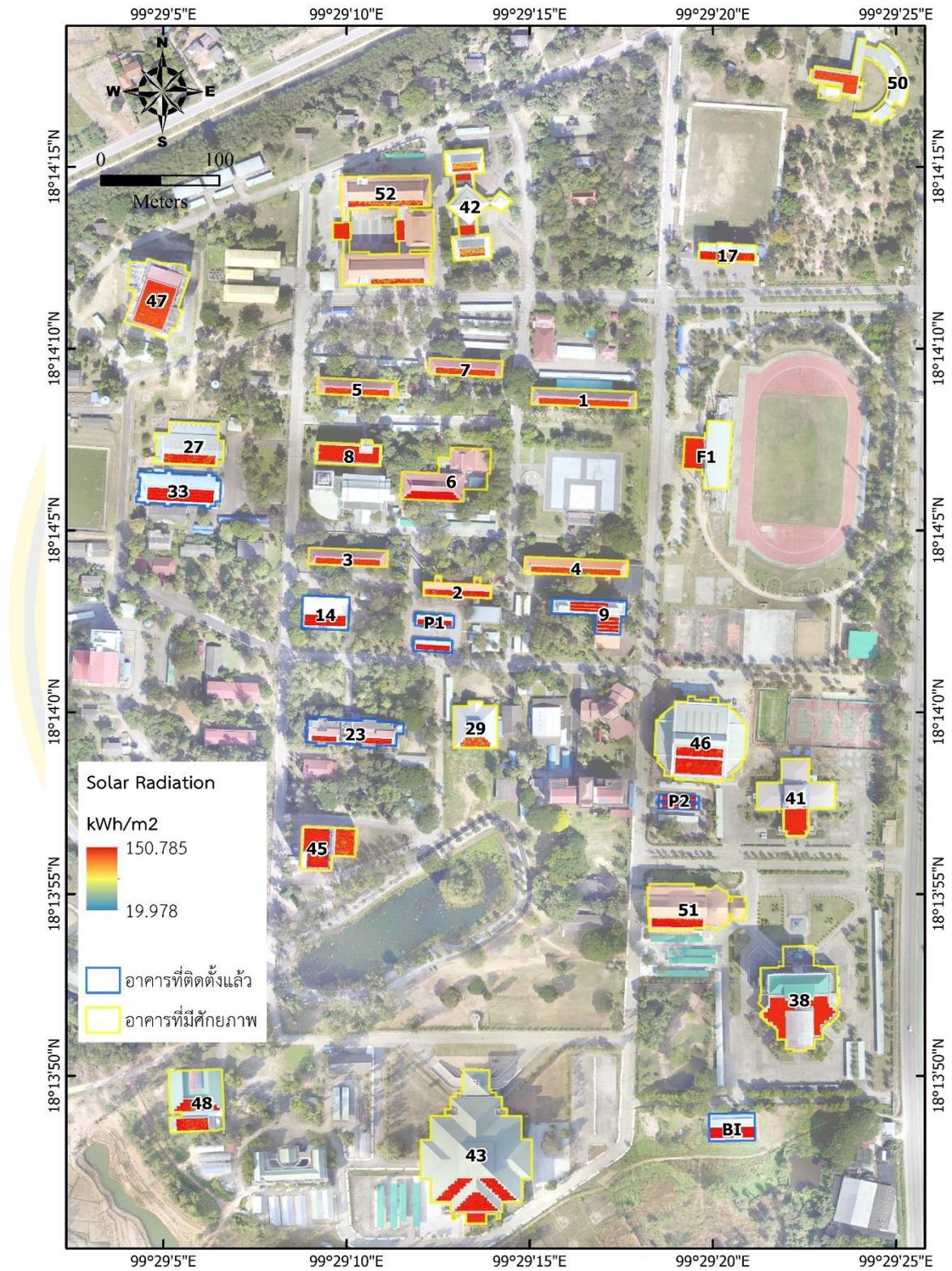


ภาพที่ 4-18 ความลาดชันและรังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารลักษณะต่าง ๆ

จากภาพที่ 4-18 แสดงตัวอย่างอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง แบ่งตามลักษณะโครงสร้างหลังคา (Roof structures) 3 รูปแบบ ได้แก่ หลังคาที่มีความลาดเอียง (Pitched roof) หลังคาเรียบหรือดาดฟ้า (Flat roof) และหลังคาที่ซับซ้อน (Complex roof) การระบุพื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์พิจารณาจากระดับรังสีดวงอาทิตย์และลักษณะโครงสร้างหลังคาพร้อมด้วยดังต่อไปนี้ 1) หลังคาแบบดาดฟ้า ถึงแม้ว่าค่ารังสีดวงอาทิตย์จะไม่สูงมากนักแต่สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เอียงประมาณ 15 องศา เพื่อให้แผงสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ 2) หลังคาที่มีความลาดเอียง พื้นที่ที่ค่ารังสีดวงอาทิตย์สูงคือ ส่วนของหลังคาที่ลาด

เอียงไปทางทิศใต้หรือตะวันออกเฉียงใต้ ทั้งนี้ความลาดชันของหลังคาต้องไม่เกิน 40 องศา 3) หลังคาที่มีลักษณะซับซ้อน พื้นที่ที่เหมาะสมคือพื้นที่ลักษณะเดียวกับข้อ 2 แต่เนื่องจากโครงสร้างหลังคาที่ซับซ้อนจึงมีพื้นที่สำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากนัก เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าควรมีพื้นที่ที่สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จำนวนไม่น้อยกว่า 80 แผง หรือกำลังผลิตติดตั้งไม่น้อยกว่า 25 กิโลวัตต์ ทั้งนี้ พื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ควรมีต้นไม้หรือตึกบังการรับแสงอาทิตย์ จากข้อสรุปข้างต้นทำให้สามารถระบุพื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีได้จำนวน 23 อาคาร ดังภาพที่ 4-19 จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งได้ 4,106 แผง คิดเป็นพื้นที่ 7,977 ตารางเมตร กำลังผลิตติดตั้งรวมไม่ต่ำกว่า 1,300 กิโลวัตต์ รายละเอียดดังตารางที่ 4-4





ภาพที่ 4-19 พื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

ตารางที่ 4-4 อาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

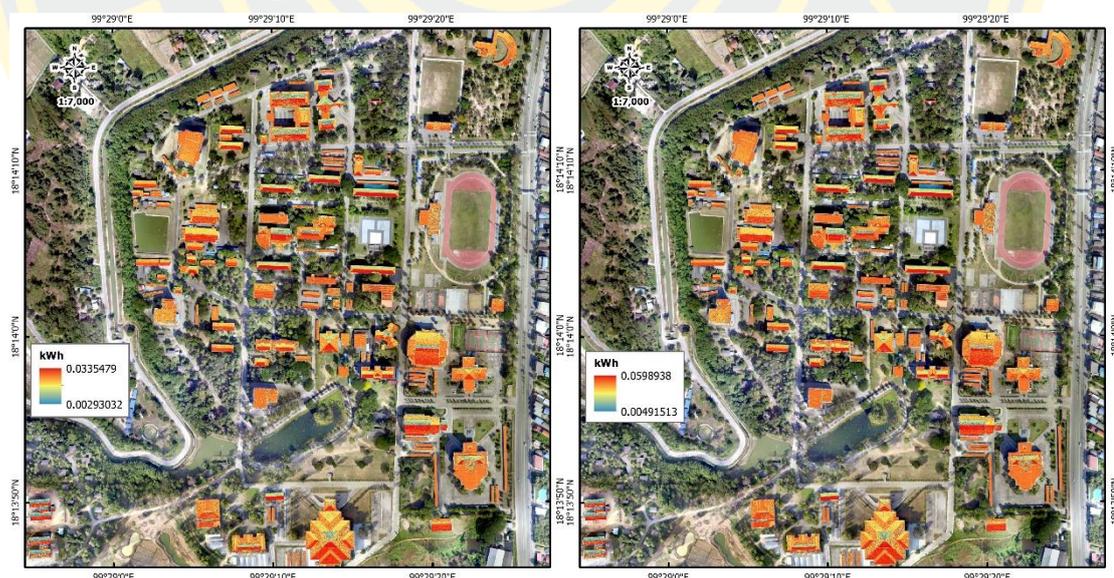
รหัส	ชื่ออาคาร	รังสีดวงอาทิตย์ ต่อเดือน	จำนวน แผง	พื้นที่ (m <sup>2</sup> )	กำลังผลิต ติดตั้ง (KW)
1	อาคาร 1 คณะครุศาสตร์	143.46	140	272.5	45
2	อาคาร 2 คณะมนุษยศาสตร์ฯ	145.73	100	194.4	32
3	อาคาร 3 คณะวิทยาศาสตร์	144.76	100	194.4	32
4	อาคาร 4 คณะมนุษยศาสตร์ฯ	137.69	140	272.5	45
5	อาคาร 5 คณะวิทยาศาสตร์	143.39	100	194.3	32
6	อาคาร 6 ห้องประชุมบัวตอง	149.29	116	225.7	37
7	อาคาร 7 คณะครุศาสตร์	143.28	92	178.8	29
8	อาคาร 8 หอสมุด	146.49	218	422.6	70
17	อาคาร 17 โรงแรมออลิมปิก	141.86	133	258.5	43
29	อาคาร 29 อาคารเทคโนโลยีเซรามิก	134.42	84	164.2	27
33	อาคาร 33 โรงอาหารทิพย์ธัญญา	144.50	120	232.9	38
38	อาคาร 38 อาคารไอพาร์ โรจน์หิรัญ	146.69	277	535.8	89
41	อาคาร 41 กองพัฒนานักศึกษา	146.98	116	225.0	37
42	อาคาร 42 สำนักศิลปะและวัฒนธรรม	135.63	180	349.5	58
43	อาคาร 43 อาคารหอประชุมใหญ่	147.56	384	747.3	123
45	อาคาร 45 อาคารเรียนรวม	143.96	293	568.3	94
46	อาคาร 46 อาคารกีฬาเอนกประสงค์	144.92	288	558.6	92
47	อาคาร 47 อาคารบริการวิชาการ	142.29	312	606.1	100
48	อาคาร 48 คณะเทคโนโลยีการเกษตร	142.02	215	420.5	69
50	อาคาร 50 โรงเรียนสาธิต	141.72	138	267.5	44
51	อาคาร 51 สำนักงานอธิการบดี	145.74	120	233.6	38
52	อาคาร 52 คณะครุศาสตร์และมนุษยฯ	139.21	307	596.2	98
F1	อาคารสนามกีฬา	146.64	133	257.8	43
รวม		-	4,106	7,977.1	1,314

## การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร เป็นการคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการ 2-6 โดยนำแผนที่รังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบรายสัปดาห์และรายเดือนมาใช้ในการคำนวณ ด้วยเครื่องมือ Raster calculator ผลลัพธ์ที่ได้เป็นแผนที่ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในแต่ละสัปดาห์และแต่ละเดือน โดยมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือหน่วยไฟฟ้า

### 1. แผนที่ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

แผนที่ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร แสดงค่าระดับพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ในแต่ละสัปดาห์ ดังภาพที่ 4-20 แสดงแผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ในสัปดาห์ที่ 2 (วันที่ 8-14 ม.ค.) เป็นสัปดาห์ที่หลังคาอาคารมีศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำที่สุดในรอบปี มีค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละฟิสิกเซลอยู่ระหว่าง 0.003-0.034 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ส่วนสัปดาห์ที่ 40 (วันที่ 30 ก.ย.-6 ต.ค.) เป็นสัปดาห์ที่หลังคาอาคารมีศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูงที่สุดในรอบปี มีค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละฟิสิกเซลอยู่ระหว่าง 0.005-0.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

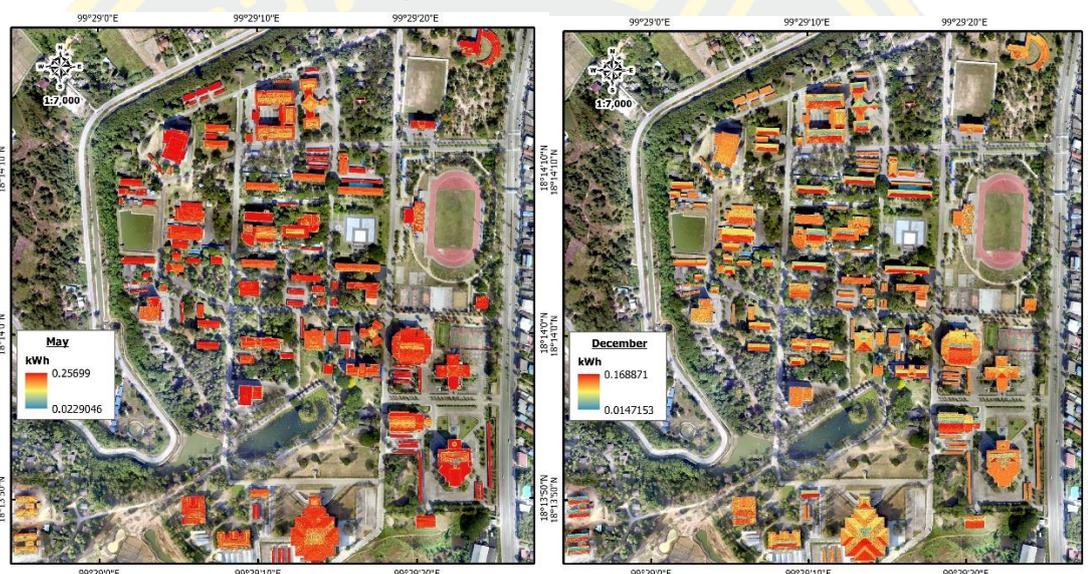


ภาพที่ 4-20 แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ในสัปดาห์ที่ 2 และ 40

ภาพที่ 4-20 แสดงแผนที่ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร แสดงค่าระดับพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้แต่ละเดือน เดือนที่หลังคาอาคารมีศักยภาพการผลิต

ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูงที่สุดในรอบปี ได้แก่ เดือนพฤษภาคม มีค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละฟีกเซลอยู่ระหว่าง 0.023-0.257 กิโลวัตต์-ชั่วโมง รองลงมาคือเดือนกรกฎาคมและสิงหาคม ตามลำดับ ส่วนเดือนที่หลังคาอาคารมีศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำที่สุดในรอบปี คือ เดือนธันวาคม มีค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละฟีกเซลอยู่ระหว่าง 0.015-0.169 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

เมื่อรวมแผนที่ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารทุกเดือน (มกราคม-ธันวาคม) เข้าด้วยกันได้แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งปี มีค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละฟีกเซลอยู่ระหว่าง 0.325-2.525 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังภาพที่ 4-21



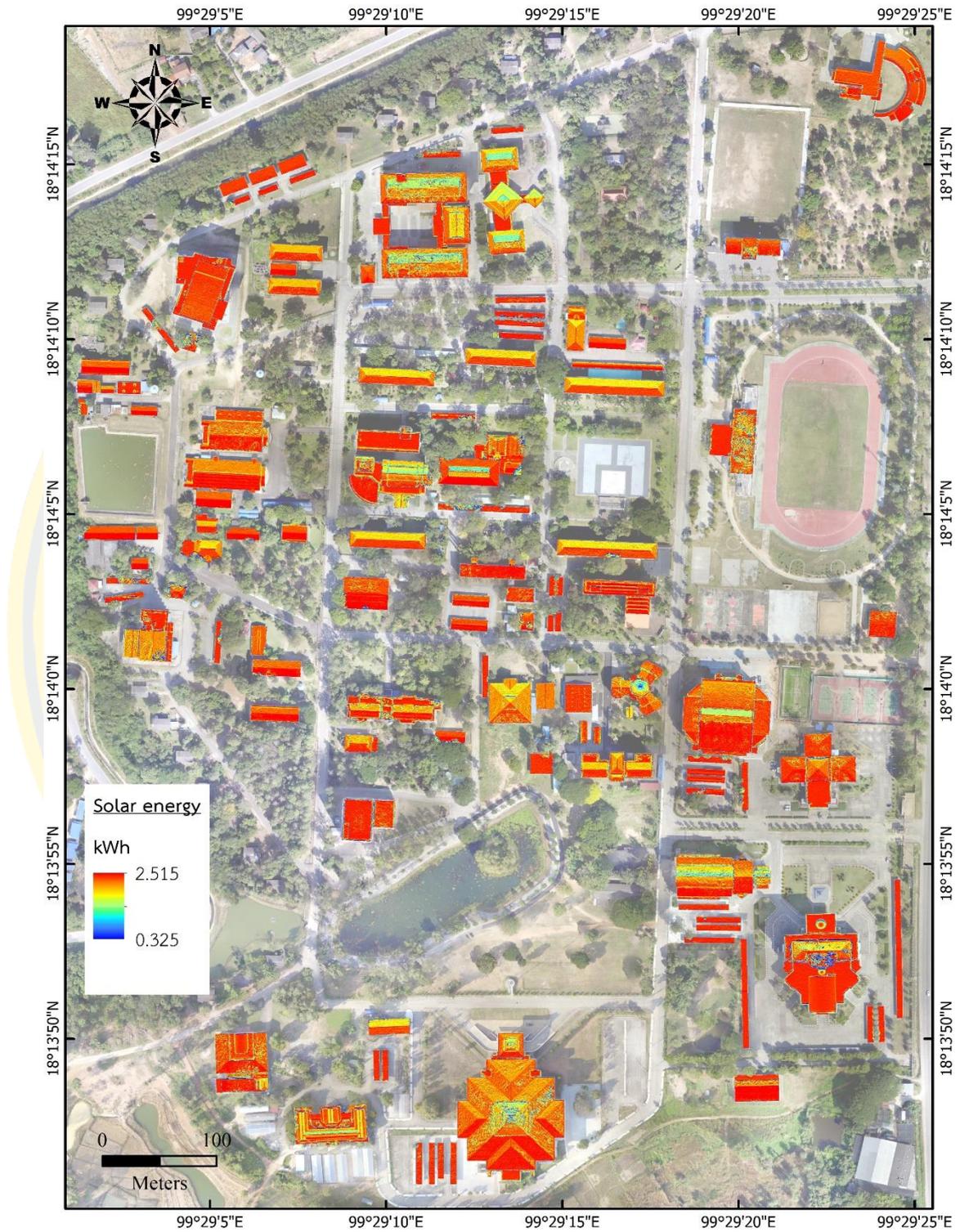
ภาพที่ 4-21 แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเดือน พ.ค. และ ธ.ค.

## 2. พื้นที่หลังคาอาคารสำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าจากแผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเป็นการหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้หากมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในพื้นที่ที่กำหนดจากพื้นที่หลังคาอาคารทั้งหมดประมาณ 96,186 ตารางเมตร โดยคำนวณจากผลรวมค่าพลังงานไฟฟ้าของแต่ละฟีกเซลในพื้นที่ด้วยเครื่องมือ Zonal statistics พื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วย 1) พื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้แล้ว (PV installed area) และ 2) พื้นที่หลังคาที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานอาทิตย์ (PV-potential area) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 พื้นที่หลังคาอาคารที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้แล้ว

ปัจจุบันมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาไว้แล้วจำนวน 7 อาคาร (ภาพที่ 4-23) ขนาดกำลังผลิตติดตั้งรวมไม่น้อยกว่า 300 กิโลวัตต์ โดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ (Poly Crystalline) ขนาด 320 วัตต์ มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Maximum Power:  $P_{max}$ ) 320 วัตต์ ขนาดแผงกว้าง 992.7 มิลลิเมตร ยาว 1,972.7 มิลลิเมตร จำนวน 944 แผง คิดเป็นพื้นที่ติดตั้งแผงทั้งหมด 1,836.61 ตารางเมตร ค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์ที่แผงได้รับรวมทั้งเดือนประมาณ 147.71 kWh/m<sup>2</sup> จากข้อมูลรายงานการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง พบว่าระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้รวมทั้งปี 380,789.18 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้เท่ากับ 452,656.10 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง รายละเอียดดังตารางที่ 4-5



ภาพที่ 4-22 แผนที่ศักยภาพไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารรวมทั้งปี



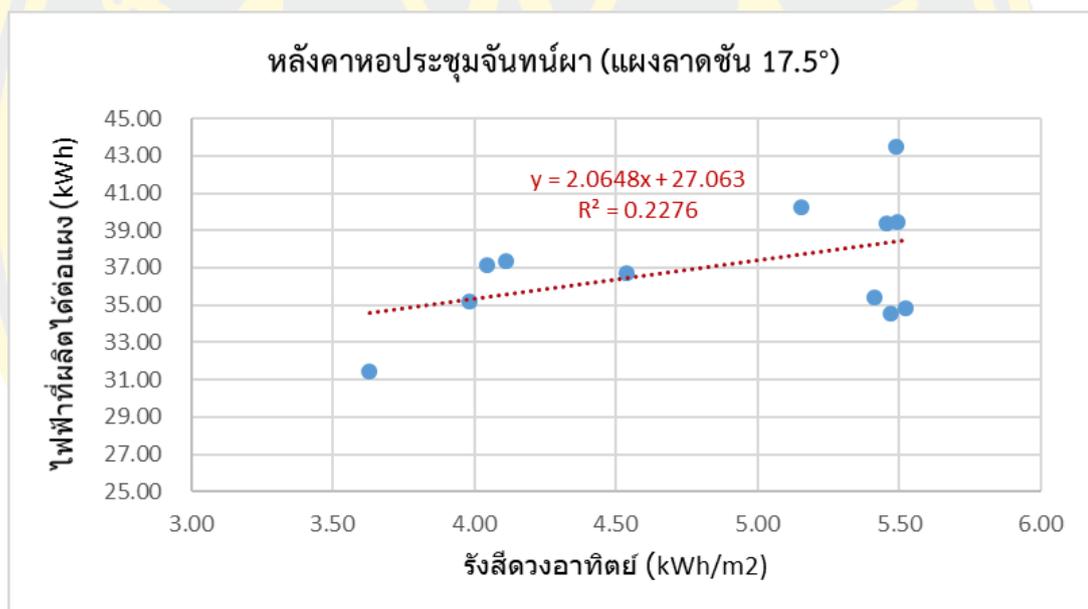
ภาพที่ 4-23 อาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

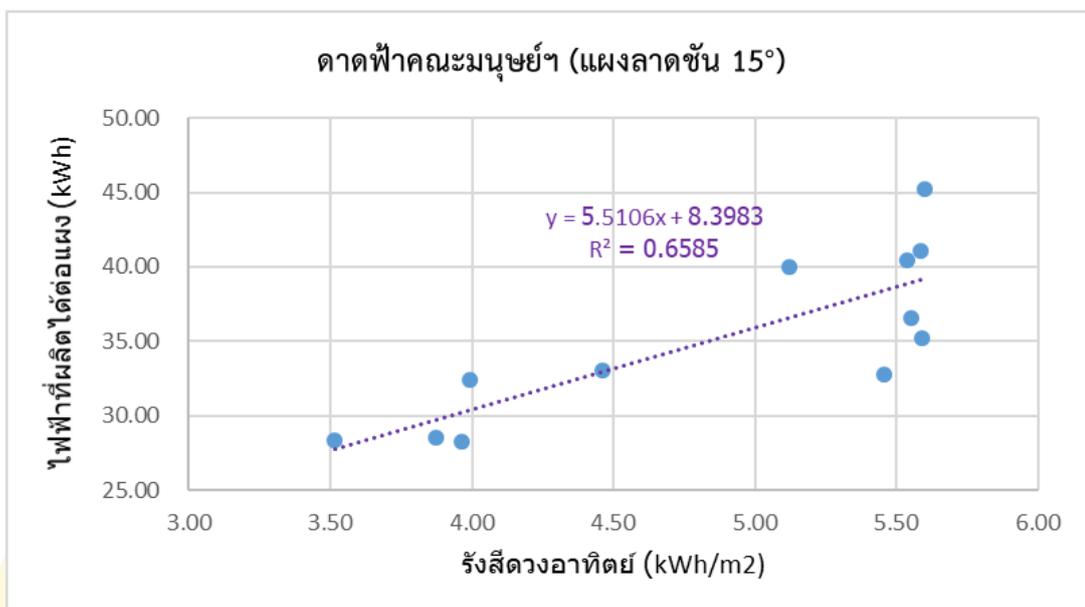
ตารางที่ 4-5 การผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้แล้ว ใน พ.ศ. 2563

รหัส	อาคาร	รังสีดวงอาทิตย์	จำนวนแผง	ไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง	ไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้
B9	อาคาร 9 คณะมนุษยศาสตร์ฯ	148.14	158	66,649.15	75,719.25
B14	อาคาร 14 วิทยาลัยนเรศวร	148.41	128	43,434.09	61,799.27
B23	อาคาร 23 คณะวิทยาศาสตร์	145.01	94	38,681.24	44,078.19
B27	อาคาร 27 หอประชุมจันทร์ผา	148.23	208	92,586.72	99,825.39
Bin	อาคารฝ่ายพัสดุกลาง	149.39	140	55,550.54	68,116.97
P1	ที่จอดรถอาคารคณะมนุษยศาสตร์ฯ	148.11	108	43,106.04	51,811.64

P2	ที่จอดรถอาคารกีฬาเอนกประสงค์	146.66	108	40,781.39	51,305.39
รวม		-	944	380,789.18	452,656.10

ในพื้นที่หลังคาอาคารที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้แล้ว ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ต่อเดือนจากการวิเคราะห์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาแบบลาดชันและแบบดาดฟ้าได้รับกับไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงต่อเดือนต่อแผง (ภาพที่ 4-24) พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงเส้นไปในทางบวกหรือแปรผันตามกัน (Positive correlation) กล่าวคือไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้แปรผันตามรังสีดวงอาทิตย์ที่แผงได้รับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีดวงอาทิตย์กับไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาแบบดาดฟ้าเป็นเส้นตรงมากกว่า ( $R^2 = 0.6585$ ) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาแบบลาดชัน





ภาพที่ 4-24 แผนภาพการกระจายของรังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์กับไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง

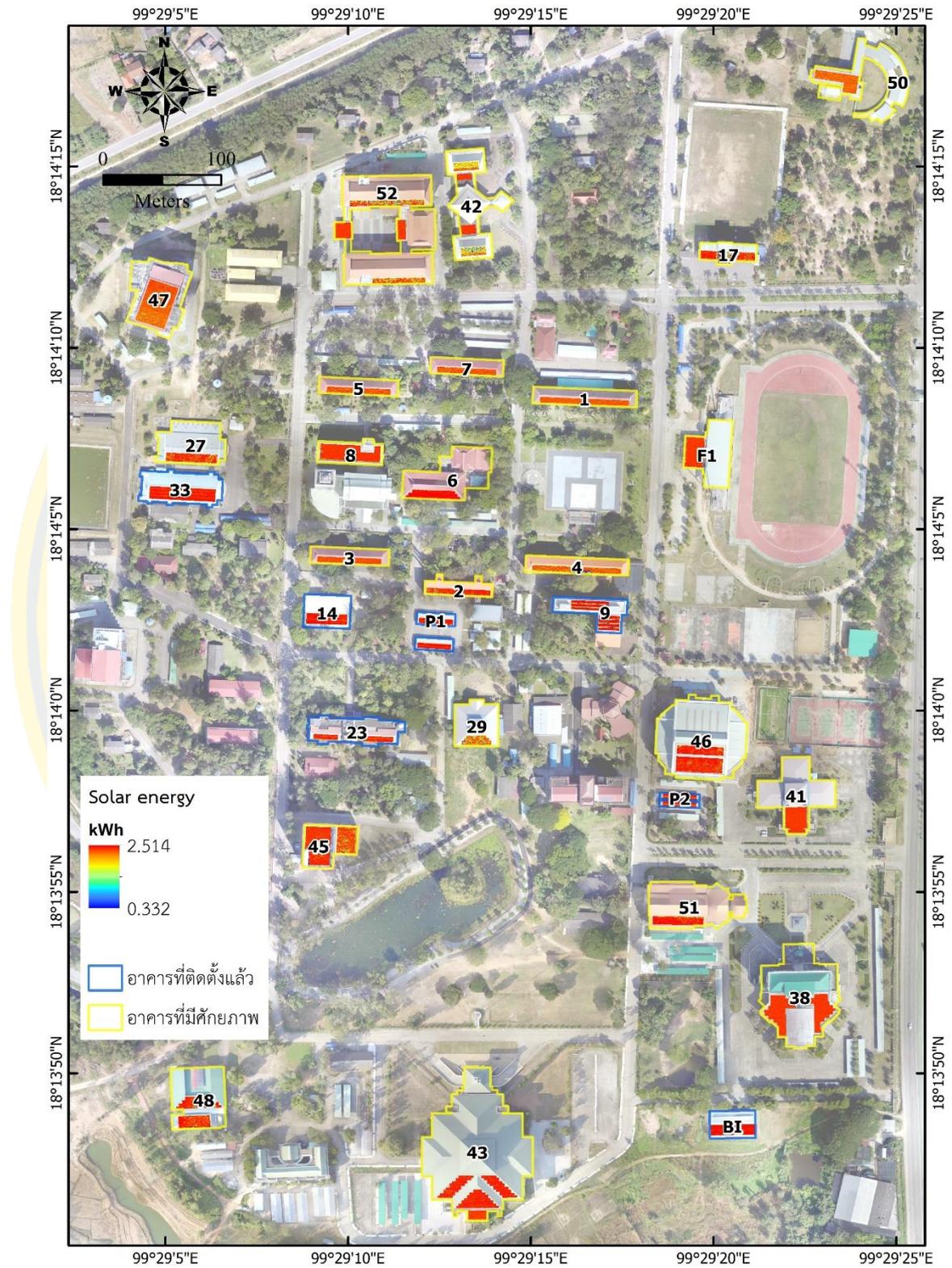
## 2.2 พื้นที่หลังคาอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานอาทิตย์

พื้นที่หลังคาอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ ค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งเดือนจากการวิเคราะห์เฉพาะพื้นที่นี้ประมาณ 143.40 kWh/m<sup>2</sup> เมื่อคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ต่อเดือนเท่ากับ 158,941.05 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ต่อปีเท่ากับ 1,907,292.63 กิโลวัตต์-ชั่วโมง รายละเอียดไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ของแต่ละอาคารดังตาราง 4-6

ตารางที่ 4-6 ไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ของแต่ละอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า

รหัส	อาคาร	ไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ เฉลี่ยต่อเดือน	ไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ รวมทั้งปี
B43	อาคาร 43 อาคารหอประชุมใหญ่	15,326.00	183,911.95
B47	อาคาร 47 อาคารบริการวิชาการ	11,978.59	143,743.14
B52	อาคาร 52 คณะครุศาสตร์และมนุษยฯ	11,522.24	138,266.89
B46	อาคาร 46 อาคารกีฬาเอนกประสงค์	11,410.27	136,923.22
B45	อาคาร 45 อาคารเรียนรวม	11,366.24	136,394.88
B38	อาคาร 38 อาคารโอฟาร โรจน์ศิริ	10,924.24	131,090.93
B8	อาคาร 8 หอสมุด	8,602.23	103,226.72

B48	อาคาร 48 คณะเทคโนโลยีการเกษตร	8,304.33	99,651.91
B42	อาคาร 42 สำนักศิลปะและวัฒนธรรม	6,533.22	78,398.63
B1	อาคาร 1 คณะครุศาสตร์	5,429.49	65,153.86
B50	อาคาร 50 โรงเรียนสาธิต	5,265.47	63,185.59
BF1	อาคารสนามกีฬา	5,247.48	62,969.78
B4	อาคาร 4 คณะมนุษยศาสตร์ฯ	5,211.59	62,539.06
B17	อาคาร 17 โรงแรมออลัมพาง	4,817.13	57,805.59
B51	อาคาร 51 สำนักงานอธิการบดี	4,717.82	56,613.88
B6	อาคาร 6 ห้องประชุมบัวตอง	4,677.25	56,126.99
B33	อาคาร 33 โรงอาหารทิพย์ธัญญา	4,676.04	56,112.52
B41	อาคาร 41 กองพัฒนานักศึกษา	4,593.02	55,116.23
B2	อาคาร 2 คณะมนุษยศาสตร์ฯ	3,935.45	47,225.39
B3	อาคาร 3 คณะวิทยาศาสตร์	3,908.42	46,901.07
B5	อาคาร 5 คณะวิทยาศาสตร์	3,871.23	46,454.77
B7	อาคาร 7 คณะครุศาสตร์	3,558.36	42,700.32
B29	อาคาร 29 อาคารเทคโนโลยีเซรามิก	3,064.94	36,779.32
<b>รวม</b>		<b>158,941.05</b>	<b>1,907,292.63</b>



ภาพที่ 4-25 แผนที่อาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

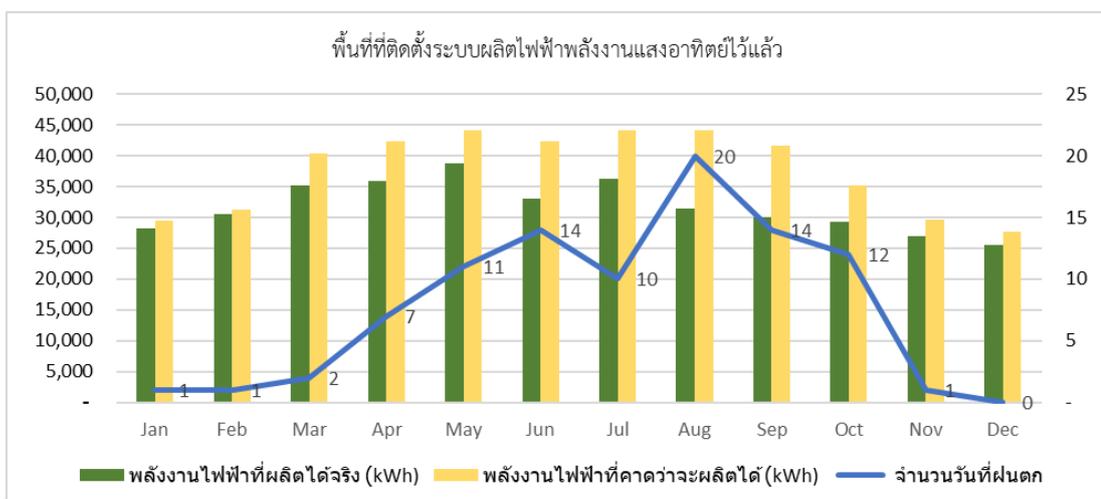
### 3. ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

ในพื้นที่ที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไว้แล้ว เมื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงกับพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ พบว่า ผลลัพธ์จากการคำนวณศักยภาพการผลิตไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริง ความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%Error) หมายถึง ค่าที่แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าที่คำนวณได้ (Estimated value) กับค่าที่แท้จริง (Actual value) โดยคำนวณจากสมการ 3-2

ความคลาดเคลื่อน (%Error) ของศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริงเท่ากับ 0.19 เดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคมมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าเดือนอื่น ๆ ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแล้ว ปี 2563

เดือน	รังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )	พลังงานไฟฟ้าที่ ผลิตได้จริง (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่คาด ว่าจะผลิตได้ (kWh)	%Error
มกราคม	115.14	28,212.00	29,490.56	0.05
กุมภาพันธ์	122.34	30,480.60	31,310.24	0.03
มีนาคม	158.23	35,150.44	40,444.38	0.15
เมษายน	165.78	35,826.80	42,321.72	0.18
พฤษภาคม	173.37	38,705.12	44,211.50	0.14
มิถุนายน	166.45	32,990.20	42,425.78	<b>0.29</b>
กรกฎาคม	172.87	36,240.00	44,074.26	<b>0.22</b>
สิงหาคม	172.90	31,386.31	44,122.00	<b>0.41</b>
กันยายน	163.21	29,974.20	41,703.51	<b>0.39</b>
ตุลาคม	137.75	29,217.05	35,241.58	<b>0.21</b>
พฤศจิกายน	115.62	27,001.66	29,609.70	0.10
ธันวาคม	108.36	25,604.80	27,761.13	0.08
<b>เฉลี่ยต่อเดือน</b>	<b>147.67</b>	<b>31,732.43</b>	<b>37,726.37</b>	<b>0.19</b>
<b>รวมทั้งปี</b>	<b>1,772.03</b>	<b>380,789.18</b>	<b>452,716.38</b>	-



ภาพที่ 4-26 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงกับจำนวนวันที่ฝนตก

ความคลาดเคลื่อนในเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคมที่มีค่าสูง เนื่องจากช่วงเวลานี้เป็นช่วงฤดูฝน มีปริมาณเมฆบนท้องฟ้าจำนวนมากทำให้บดบังรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องมาบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง สอดคล้องกับข้อมูลจำนวนวันที่ฝนตกปี 2563 ของศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือที่ในช่วงเดือนมิถุนายนถึงตุลาคมมีจำนวนวันที่ฝนตกและปริมาณฝนสูงกว่าเดือนอื่น (ภาพที่ 4-26) สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้คำนวณจากค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะท้องฟ้าโปร่ง (Clear sky) ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้สูงกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง

ด้วยเหตุนี้ พื้นที่หลังคาอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ 4,106 แผงที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ที่ได้จากการคำนวณต้องทำการปรับค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ด้วยการหักลบ %error เพื่อให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ใกล้เคียงกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงมากที่สุด ดังนั้น ศักยภาพพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร เฉลี่ยเดือนละ 127,003.68 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และคิดเป็นปีละ 1,524,044.15 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อรวมกับพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้แล้วผลิตได้ ศักยภาพพลังงานไฟฟ้ารวมเท่ากับ 158,736.11 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน และ 1,904,833.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี รายละเอียดดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ศักยภาพพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

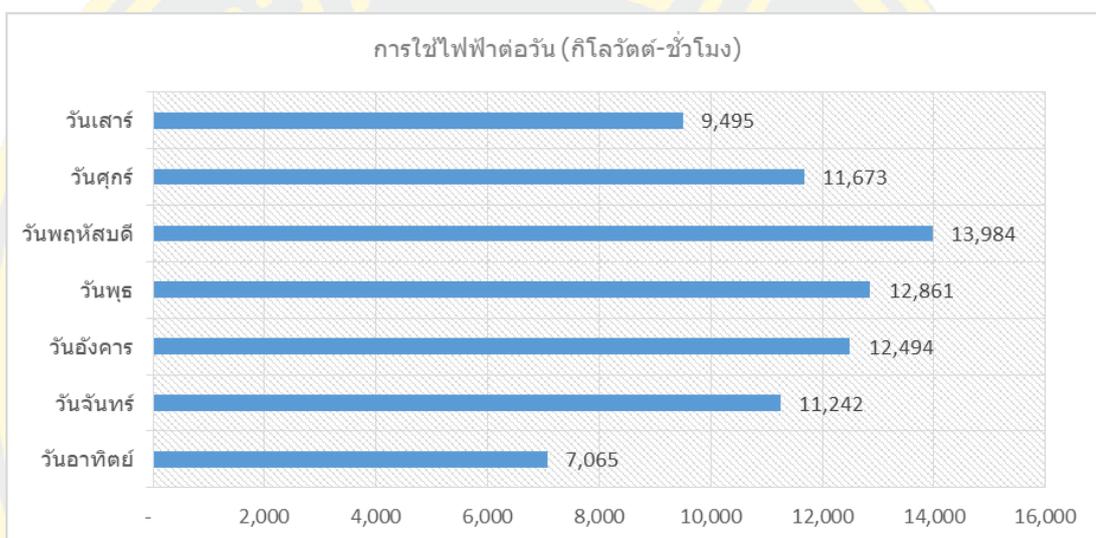
เดือน	รังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )	พลังงานไฟฟ้าที่ คาดว่าจะผลิตได้ (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ หักลบ %error (kWh)	ศักยภาพ พลังงานไฟฟ้า รวม (kWh)
มกราคม	113.38	122,004.37	116,475.14	144,687.14
กุมภาพันธ์	120.31	130,285.10	126,738.90	157,219.50
มีนาคม	155.32	169,726.99	144,164.73	179,315.17
เมษายน	162.47	179,236.15	146,742.99	182,569.78
พฤษภาคม	169.71	188,718.09	161,870.14	200,575.26
มิถุนายน	162.86	181,720.64	129,746.42	162,736.62
กรกฎาคม	169.19	188,448.54	147,710.27	183,950.27
สิงหาคม	169.37	187,365.72	111,337.95	142,724.26
กันยายน	160.13	175,468.30	106,805.17	136,779.37
ตุลาคม	135.39	146,970.69	116,665.45	145,882.50
พฤศจิกายน	113.82	122,641.57	110,795.82	137,797.48
ธันวาคม	106.75	114,646.20	104,991.17	130,595.97
<b>เฉลี่ยต่อเดือน</b>	<b>144.89</b>	<b>158,936.03</b>	<b>127,003.68</b>	<b>158,736.11</b>
<b>รวมทั้งปี</b>	<b>1,738.70</b>	<b>1,907,232.35</b>	<b>1,524,044.15</b>	<b>1,904,833.33</b>

#### 4. ความต้องการใช้ไฟฟ้าหรือปริมาณการใช้ไฟฟ้า

การใช้ไฟฟ้าของสถาบันการศึกษาสอดคล้องกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ คือ มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้สูงสุดเช่นเดียวกัน เนื่องจากอาคารแต่ละหลังไม่ได้ติดตั้งเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (meter) การประเมินความต้องการใช้ไฟฟ้าจึงใช้ข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏ

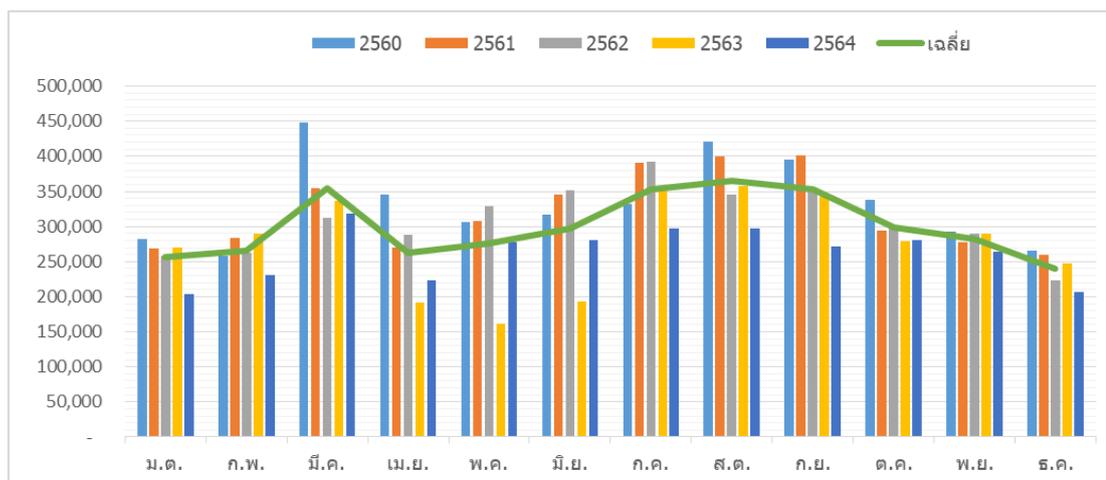
ลำปาง ตามรายงานการใช้ไฟฟ้าจากระบบอ่านหน่วยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ (Automatic Meter Reading: AMR) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ในรอบสัปดาห์การใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางจะสูงในวันธรรมดาหรือวันทำการตั้งแต่วันจันทร์จนถึงวันศุกร์ เนื่องจากมีกิจกรรมการเรียนการสอน โดยใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยวันละ 12,451 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และการใช้ไฟฟ้าจะลดลงในวันหยุดเสาร์อาทิตย์ที่ไม่มีกิจกรรมการเรียนการสอนโดยใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยวันละ 8,280 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ในวันเสาร์และอาทิตย์จะใช้ไฟฟ้าน้อยลงจากวันจันทร์ถึงศุกร์คิดเป็นร้อยละ 33.5 ดังภาพที่ 4-27



ภาพที่ 4-27 การใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางในรอบสัปดาห์

จากรายงานการใช้ไฟฟ้าจากระบบอ่านหน่วยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติรายปีของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ย้อนหลัง 5 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2560-2564 (ตารางที่ 4-9) พบว่า ในแต่ละเดือนใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งเดือน 300,418 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เดือนที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงสุด คือ เดือนสิงหาคม รองลงมาคือ เดือนมีนาคม กันยายน และกรกฎาคม ตามลำดับ ส่วนเดือนที่ใช้ไฟฟ้าต่ำสุดคือ เดือนธันวาคม มกราคม เมษายน กุมภาพันธ์ ตามลำดับ โดยสาเหตุที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเดือนดังกล่าว เนื่องจากเป็นช่วงเปิดภาคเรียนและสภาพอากาศร้อน ในขณะที่เดือนเมษายนเป็นเดือนที่มีอากาศร้อนจัดของจังหวัดลำปางแต่เป็นช่วงปิดภาคเรียนการใช้ไฟฟ้าจึงต่ำ และในช่วงเดือนธันวาคมถึงกุมภาพันธ์ ถึงแม้เป็นช่วงเปิดภาคเรียน แต่การใช้ไฟฟ้าต่ำเนื่องจากเป็นช่วงฤดูหนาว ดังภาพที่ 4-28



ภาพที่ 4-28 การใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางย้อนหลัง 5 ปี (พ.ศ.2560-2564)

ตารางที่ 4-9 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้ารายปีของมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

เดือน	ปี 2560	ปี 2561	ปี 2562	ปี 2563	ปี 2564	เฉลี่ย
ม.ค.	282,363	268,111	258,527	269,755	203,928	256,537
ก.พ.	258,130	283,878	262,694	289,494	231,381	265,115
มี.ค.	448,014	354,517	312,236	336,939	318,924	354,126
เม.ย.	345,060	269,956	287,532	190,977	222,578	263,221
พ.ค.	306,721	307,625	329,614	161,054	277,730	276,549
มิ.ย.	316,513	345,997	351,715	193,620	279,931	297,555
ก.ค.	332,557	390,288	391,980	351,875	297,761	352,892
ส.ค.	421,331	400,332	345,099	358,211	296,834	364,361
ก.ย.	396,000	400,679	354,685	342,377	271,604	353,069
ต.ค.	338,584	294,039	300,346	278,787	280,424	298,436
พ.ย.	292,643	277,834	289,539	289,361	264,618	282,799
ธ.ค.	265,989	258,957	224,006	246,736	206,097	240,357
รวม	4,003,904	3,852,213	3,707,973	3,309,185	3,151,812	3,605,017

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารที่มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางติดตั้งไปแล้วนั้นเป็นระบบ On grid คือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมกับ

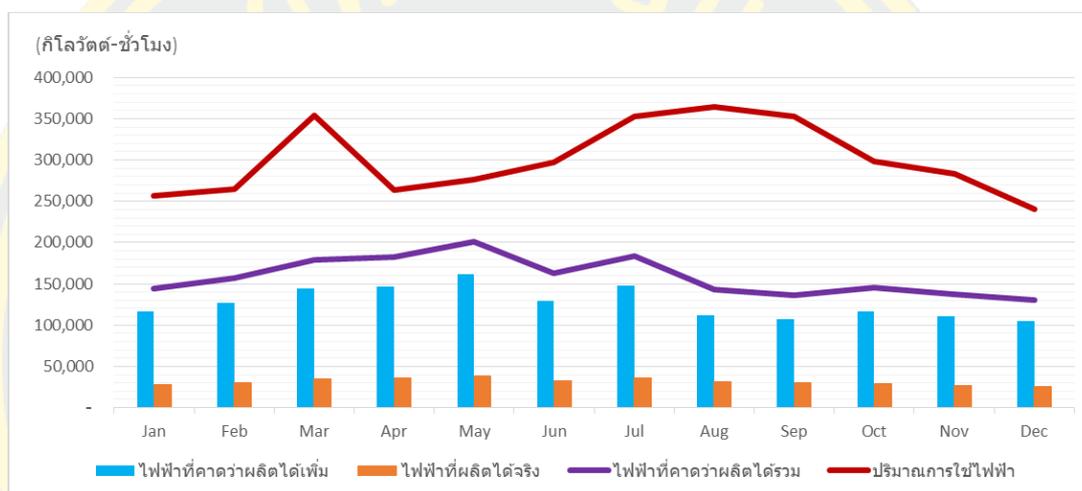
การไฟฟ้า เป็นการผลิตเพื่อใช้เองไม่ขายไฟคืนให้การไฟฟ้า เนื่องจากผลิตได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจากความต้องการใช้ไฟฟ้ากับศักยภาพพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคาร พบว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบที่ได้ติดตั้งไว้แล้ว คิดเป็นร้อยละ 10.56 ของความต้องการใช้ไฟฟ้า หากในอนาคตมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารเพิ่มเติมในพื้นที่ที่มีศักยภาพตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะสามารถผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้เพิ่มอีกร้อยละ 42.28 ของความต้องการใช้ไฟฟ้า เมื่อรวมศักยภาพพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ทั้งหมด คิดเป็นร้อยละ 52.84 ของความต้องการใช้ไฟฟ้า รายละเอียดดังตารางที่ 4-10

อย่างไรก็ตาม หากในอนาคตมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารเพิ่มเติมตามศักยภาพ จะสามารถลดภาระค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าในปัจจุบันหรือมีผลประหยัดพลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัย 1,524,044.15 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี หรือร้อยละ 42.28 ต่อปี แต่การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้งบประมาณในการลงทุนติดตั้งระบบค่อนข้างสูง จึงต้องศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนก่อนตัดสินใจติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

ตารางที่ 4-10 ร้อยละของไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับความต้องการใช้ไฟฟ้า

เดือน	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	พลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งแล้ว (ร้อยละ)	ศักยภาพพลังงานไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ติดตั้ง	ศักยภาพพลังงานไฟฟ้ารวม (ร้อยละ)
มกราคม	256,537.05	11.00	45.40	56.40
กุมภาพันธ์	265,115.43	11.50	47.81	59.30
มีนาคม	354,125.87	9.93	40.71	50.64
เมษายน	263,220.67	13.61	55.75	69.36
พฤษภาคม	276,548.84	14.00	58.53	72.53
มิถุนายน	297,555.15	11.09	43.60	54.69
กรกฎาคม	352,892.15	10.27	41.86	52.13
สิงหาคม	364,361.23	8.61	30.56	39.17
กันยายน	353,069.08	8.49	30.25	38.74

ตุลาคม	298,435.97	9.79	39.09	48.88
พฤศจิกายน	282,798.94	9.55	39.18	48.73
ธันวาคม	240,356.99	10.65	43.68	54.33
เฉลี่ยต่อเดือน	300,418.12	10.56	42.28	52.84
รวมทั้งปี	3,605,017.38	-	-	-



ภาพที่ 4-29 เปรียบเทียบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับความต้องการใช้ไฟฟ้า

#### ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ การเงินและการลงทุนของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการวิเคราะห์หาผลตอบแทนด้านการเงินด้วยการวิเคราะห์ต้นทุนผลได้ (Cost-Benefit Analysis) เพื่อเปรียบเทียบผลประโยชน์ที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับต้นทุนของเงินทุนที่นำไปใช้ในการติดตั้งระบบ มีวิธีที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนของโครงการ ระยะเวลาคืนทุน ผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน งบกระแสเงินสด เป็นต้น

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินด้วยนำต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการมาจัดทำตารางกระแสเงินสดตลอดอายุโครงการ และนำผลประโยชน์สุทธิที่ได้มาคำนวณตามหลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ และระยะเวลาคืนทุน เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**1. สมมติฐานด้านการเงิน** ให้แหล่งที่มาของเงินทุนทั้งหมดของโครงการเป็นเงินงบประมาณเนื่องจากมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางเป็นหน่วยงานภาครัฐ อัตราผลตอบแทนเงินทุนจะใช้หลักการคิดในเรื่องต้นทุนค่าเสียโอกาส คือ หากเจ้าของเงินทุนไม่นำเงินส่วนนี้มาลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และนำเงินไปลงทุนในทางเลือกอื่น เจ้าของเงินทุนจะได้ผลตอบแทนเท่าไร ในการวิเคราะห์ครั้งนี้กำหนดอัตราผลตอบแทนส่วนของผู้ถือหุ้นเท่ากับอัตราผลตอบแทนของพันธบัตรรัฐบาลอายุ 10 ปีเฉลี่ยตั้งแต่ปี 2555-2564 เท่ากับร้อยละ 2.693 เนื่องจากแหล่งที่มาของเงินทุนในโครงการมาจากแหล่งเดียว คือ เงินทุนจากเจ้าของ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่คำนวณจากต้นทุนของเงินทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (WACC) จะเท่ากับอัตราผลตอบแทนส่วนของผู้ถือหุ้น และอายุโครงการเท่ากับ 25 ปี ตามอายุการรับประกันแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

**2. ต้นทุนของโครงการ** ในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร อ้างอิงจากงานติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ภายใต้โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐที่ดำเนินการติดตั้งไปแล้ว โครงการที่จะติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเพิ่มตามศักยภาพ จะต้องดำเนินการติดตั้งเพิ่ม 23 อาคาร ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4,106 แผง ต้นทุนของโครงการคำนวณจากต้นทุนต่อวัตต์ของโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารที่มหาวิทยาลัยได้ดำเนินการติดตั้งไปก่อนหน้านี้ พบว่ามีต้นทุน 35.16 บาทต่อหน่วย และในระหว่างการดำเนินโครงการจะมีอุปกรณ์ที่มีกำหนดอายุการใช้งาน คือ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) กำหนดอายุการใช้งาน 10 ปี และต้องทำการลงทุนเปลี่ยนในปีที่ 11 และ 21

### **3. การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ**

ผลประโยชน์ของโครงการ คือ ผลประหยัดค่าไฟฟ้าที่ต้องซื้อจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เท่ากับปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ซื้อลดลง นำปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์คูณกับอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกจะได้เป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อไป

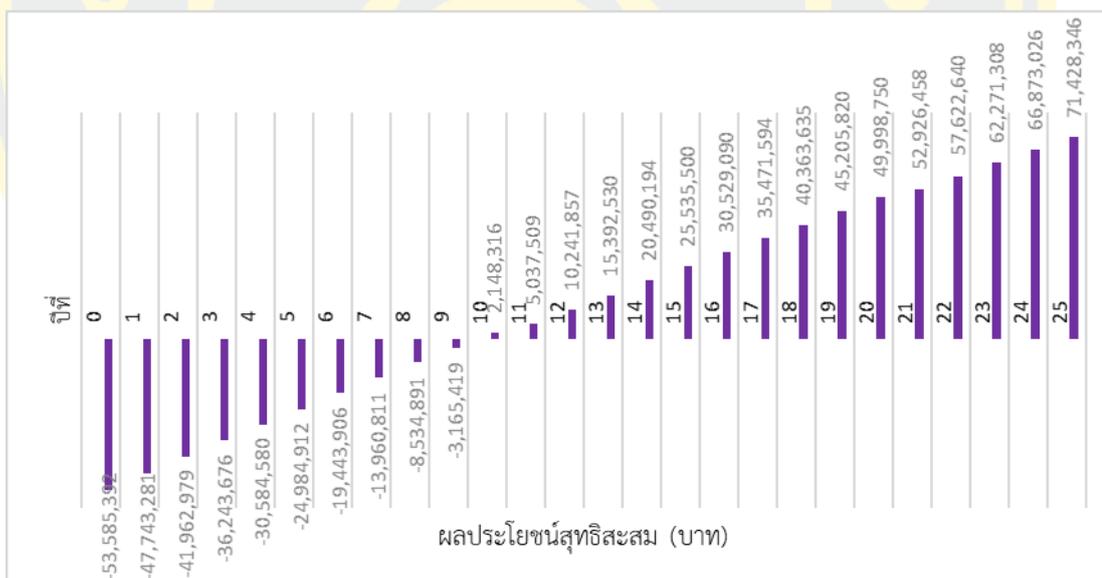
ตารางที่ 4-11 ผลประโยชน์ของโครงการหรือพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้

ปีที่	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ค่าพลังงานไฟฟ้า บาท/หน่วย		ผลประหยัดต่อปี (บาท)
		on-peak	off-peak	
1	1,524,044	4.2097	2.6295	5,999,439
2	1,516,424	4.3044	2.6887	6,095,822
3	1,508,842	4.4013	2.7492	6,193,920
4	1,501,298	4.5003	2.8110	6,293,764
5	1,493,791	4.6016	2.8743	6,395,382
6	1,486,322	4.7051	2.9389	6,498,807
7	1,478,891	4.8110	3.0051	6,604,069
8	1,471,496	4.9192	3.0727	6,711,200
9	1,464,139	5.0299	3.1418	6,820,232
10	1,456,818	5.1431	3.2125	6,931,198
11	1,449,534	5.2588	3.2848	7,044,132
12	1,442,286	5.3771	3.3587	7,159,067
13	1,435,075	5.4981	3.4343	7,276,038
14	1,427,899	5.6218	3.5115	7,395,081
15	1,420,760	5.7483	3.5905	7,516,231
16	1,413,656	5.8776	3.6713	7,639,525
17	1,406,588	6.0099	3.7539	7,764,999
18	1,399,555	6.1451	3.8384	7,892,692
19	1,392,557	6.2833	3.9248	8,022,641
20	1,385,594	6.4247	4.0131	8,154,887
21	1,378,666	6.5693	4.1034	8,289,468
22	1,371,773	6.7171	4.1957	8,426,426
23	1,364,914	6.8682	4.2901	8,565,800
24	1,358,090	7.0228	4.3866	8,707,634
25	1,351,299	7.1808	4.4853	8,851,969

จากตารางที่ 4-11 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปีแรก คือ ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งปี เท่ากับลดการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าได้ 1,524,044 หน่วยต่อปี ส่วนในปีที่ 2-25 ของโครงการ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 0.5 ต่อปี ทำให้ผลิตไฟฟ้าได้

ลดลง จำนวนค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปีด้วยการนำปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้มากคูณกับ อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก สามารถสรุปผลประโยชน์ของโครงการ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4-11

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินจะนำต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการที่ได้ วิเคราะห์ไว้มาจัดทำตารางกระแสเงินสดตลอดอายุโครงการ และนำผลประโยชน์สุทธิที่ได้มาคำนวณ ตามหลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ และ ระยะเวลาคืนทุน เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการ ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทาง การเงินของโครงการ พบว่า หากดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา อาคารที่อายุโครงการ 25 ปี โครงการจะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 71,428,346 บาท มีค่ามากกว่า ศูนย์ (ภาพที่ 4-30) อัตราผลตอบแทนภายในโครงการเท่ากับร้อยละ 11.47 สูงกว่าอัตราต้นทุน เงินทุนถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ใช้เป็นอัตราคิดลดของโครงการนี้ และโครงการมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 9 ปี 6 เดือน น้อยกว่าอายุโครงการ หมายความว่า การดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารมีความคุ้มค่าทางการเงินในการลงทุน รายละเอียดดังตารางที่ 4-12



ภาพที่ 4-30 ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ

ตารางที่ 4-12 ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ปีที่	ต้นทุนรวม	ผลประโยชน์รวม	ผลประโยชน์สุทธิ	มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิ	ผลประโยชน์สุทธิสะสม
0	53,585,392	0	-53,585,392	-53,585,392	-53,585,392
1	0	5,999,439	5,999,439	5,842,111	-47,743,281
2	0	6,095,822	6,095,822	5,780,303	-41,962,979
3	0	6,193,920	6,193,920	5,719,303	-36,243,676
4	0	6,293,764	6,293,764	5,659,096	-30,584,580
5	0	6,395,382	6,395,382	5,599,668	-24,984,912
6	0	6,498,807	6,498,807	5,541,006	-19,443,906
7	0	6,604,069	6,604,069	5,483,094	-13,960,811
8	0	6,711,200	6,711,200	5,425,921	-8,534,891
9	0	6,820,232	6,820,232	5,369,472	-3,165,419
10	0	6,931,198	6,931,198	5,313,735	2,148,316
11	3,174,000	7,044,132	3,870,132	2,889,193	5,037,509
12	0	7,159,067	7,159,067	5,204,348	10,241,857
13	0	7,276,038	7,276,038	5,150,674	15,392,530
14	0	7,395,081	7,395,081	5,097,663	20,490,194
15	0	7,516,231	7,516,231	5,045,306	25,535,500
16	0	7,639,525	7,639,525	4,993,590	30,529,090
17	0	7,764,999	7,764,999	4,942,505	35,471,594
18	0	7,892,692	7,892,692	4,892,040	40,363,635
19	0	8,022,641	8,022,641	4,842,185	45,205,820
20	0	8,154,887	8,154,887	4,792,930	49,998,750
21	3,174,000	8,289,468	5,115,468	2,927,708	52,926,458
22	0	8,426,426	8,426,426	4,696,182	57,622,640
23	0	8,565,800	8,565,800	4,648,669	62,271,308
24	0	8,707,634	8,707,634	4,601,718	66,873,026
25	0	8,851,969	8,851,969	4,555,320	71,428,346

ปีที่	ต้นทุนรวม	ผลประโยชน์รวม	ผลประโยชน์สุทธิ	มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิ	ผลประโยชน์สุทธิสะสม
รวม	59,933,392	183,250,423	123,317,031	71,428,346	
Discount Rate		2.693%	NPV	71,428,346 บาท	
			IRR	11.47%	
			Payback Period	9.457 ปี (9 ปี 6 เดือน)	

### 3. การประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมของโครงการ

การดำเนินนโยบายที่มุ่งสู่การเป็นมหาวิทยาลัยสีเขียว (Green university) ในด้านพลังงานและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Energy and Climate Change) แสดงให้เห็นถึงความใส่ใจของมหาวิทยาลัยในการใช้พลังงานและปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พิจารณาจากอัตราส่วนพลังงานทดแทนที่มหาวิทยาลัยผลิตได้ต่อการใช้พลังงานของมหาวิทยาลัยต่อปี โครงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อัตราส่วนคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) ของมหาวิทยาลัย เป็นต้น ส่วนคาร์บอนเครดิต (Carbon credit) คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดหรือหักเก็บได้ เกิดจากการทำโครงการไม่ว่าจะเป็นการดูดออกจากชั้นบรรยากาศ เช่น ปลูกป่า การดักจับคาร์บอน หรือการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO<sub>2</sub>e) จะยื่นขอการรับรองคาร์บอนเครดิตได้ 1 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

การคำนวณอัตราการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อประเมินผลประโยชน์ที่ได้จากการใช้ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยใช้ข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากโรงไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ระบุว่าปริมาณการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ต่อหนึ่งหน่วยการผลิตกระแสไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) เท่ากับ 0.5193 kgCO<sub>2</sub>/kWh ดังนั้น พลังงานไฟฟ้าจากติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ผลิตไฟฟ้าได้ 380,789 kWh/ปี สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 197.74 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี และหากดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในพื้นที่ที่มีศักยภาพจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 1,524,044 kWh/ปี และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 791.44 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี คิดเป็นคาร์บอนเครดิตได้ 791.44 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี



## บทที่ 5

### อภิปรายและสรุปผล

จากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล การสำรวจด้วยการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์รังสีอาทิตย์เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร สามารถอภิปรายผล สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะได้ดังนี้

#### อภิปรายผล

การวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือ Solar radiation analysis ในซอฟต์แวร์ ArcGIS แบบจำลองความสูงดิจิทัลเป็นข้อมูลนำเข้าที่สำคัญ เนื่องจากข้อมูลการวิเคราะห์พื้นผิว (Surface analysis) ที่สร้างจากแบบจำลองความสูงดิจิทัล ได้แก่ ความลาดชัน (Slope) และทิศทางความลาดเอียง (Aspect) มีผลต่อปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้รับและช่วยให้สามารถประเมินค่ารังสีดวงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Cioban et al., 2013) การศึกษานี้ใช้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ (DSM) ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งได้ DSM ที่มีรายละเอียดสูง (0.1 เมตร) และความถูกต้องทางตำแหน่งสูง สำหรับ DSM สามารถสร้างขึ้นจากเทคโนโลยีการสำรวจภูมิประเทศด้วยเลเซอร์ (LiDAR) หรืออากาศยานไร้คนขับ การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับมีข้อจำกัดในการสำรวจพื้นที่ขนาดใหญ่ เนื่องจากความจุของแบตเตอรี่ที่จำกัดทำให้เวลาทำการบินสั้น (ประมาณ 20 นาที) และระยะเวลาการควบคุมของเครื่องควบคุมระยะไกล (Yalcin, 2018) ในการสำรวจพื้นที่ขนาดเล็กจึงนิยมใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับสร้าง DSM ที่ต้องการความถูกต้องทางตำแหน่งและรายละเอียดสูง (Stefan et al., 2022) อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายต่ำ

เครื่องมือ Solar radiation analysis ในซอฟต์แวร์ ArcGIS ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ในพื้นที่ต่าง ๆ ทั้งในระดับเมืองและภูมิภาค มีการศึกษา Kodysh et al. (2013), Pili et al. (2018) และ Kazak and Swiader (2018) ที่ใช้ DSM ในการวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์บนหลังคา แผนที่รังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารที่ได้แสดงค่ารังสีดวงอาทิตย์แต่ละพิกเซลของ DSM สามารถระบุพื้นที่บนหลังคาอาคารที่มีศักยภาพสูงสำหรับติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา หลังคาที่ลาดเอียงไปทางทิศใต้เป็นพื้นที่ที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงกว่าหลังคาในส่วนอื่น ๆ การศึกษานี้ระบุพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยพิจารณา

จากค่ารังสีดวงอาทิตย์และลักษณะโครงสร้างหลังคา หลังคาแบบลาดฟ้าเหมาะสำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยให้แผงหันไปทางทิศใต้และเอียงประมาณ 15 องศา หลังคาแบบความลาดเอียงต้องลาดเอียงไปทางทิศใต้หรือตะวันออกเอียงใต้และความลาดชันไม่ควรเกิน 40 องศา หลังคาที่ลาดชันมากกว่า 40 องศาจะได้รับรังสีดวงอาทิตย์ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าพลังงานอาทิตย์ลดลงตามไปด้วย (Wong et al., 2016) แผนที่ยังรังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารนอกจากจะช่วยระบุพื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ยังช่วยในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ทิศทางและความลาดชันที่เหมาะสมที่สุด ตำแหน่งที่ติดตั้งไม่มีเงาจากอาคารหรือต้นไม้โดยรอบ (Rodríguez et al., 2017) การศึกษาภาพพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารได้คำนวณเฉพาะพื้นที่หลังคาที่ได้ระบุไว้เท่านั้น หากใช้พื้นที่ทั้งหมดบนหลังคาในการคำนวณอาจนำไปสู่การประเมินค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูงเกินไปจากความเป็นจริง (Zhong et al., 2022)

ผลลัพธ์ของการประเมินรังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาแสดงเป็นระดับของรังสีดวงอาทิตย์และตำแหน่งที่มีรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุดบนหลังคา ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ได้รับการประเมินโดยการเปรียบเทียบผลการประเมินรังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาที่ได้กับรังสีดวงอาทิตย์จริงที่ได้จากเครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ (Suomalainen et al., 2016) เมื่อเปรียบเทียบกับรังสีที่วัดจากเครื่องมือวัดรังสีดวงอาทิตย์พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินค่ารังสีดวงอาทิตย์ประจำปีต่ำกว่าที่ได้จากเครื่องมือวัด 3-5% (Pili et al., 2018) สอดคล้องกับการศึกษาครั้งนี้ที่พบว่า ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาจากการวิเคราะห์ (4.285 kWh/m<sup>2</sup> ต่อวัน) มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการตรวจวัดรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย พ.ศ. 2563 (4.968 kWh/m<sup>2</sup> ต่อวัน) ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โดยรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกรกฎาคม และรังสีดวงอาทิตย์มีค่าต่ำในช่วงเดือนธันวาคมถึงมกราคม เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าในแต่ละวันในช่วงเวลาหนึ่งปี

การประเมินศักยภาพพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงกับพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ในพื้นที่หลังคาอาคารที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไว้แล้ว พบว่า ผลลัพธ์จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริง โดยความคลาดเคลื่อน (%Error) ที่เกิดขึ้นนี้มีค่าสูงในช่วงเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคม ตามปกติแล้วพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แปรผันตามปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่แผงได้รับ (Polo et al., 2015) เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงฤดูฝน มีปริมาณเมฆบนท้องฟ้าจำนวนมากทำให้บังรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องมาบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้คำนวณจากค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้

เงื่อนไขที่ท้องฟ้าโปร่ง (Nilsa et al., 2019) ทั้งนี้ สมการการหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรืออัตราการแปลงผันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้คำนึงถึงผลกระทบจากชั้นบรรยากาศที่มีต่อรังสีดวงอาทิตย์ โดยกำหนดให้มวลอากาศ (Air Mass) เท่ากับ 1.5 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในการประมาณค่าการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และผลกระทบจากชั้นบรรยากาศต่อการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารได้รับการประเมินก่อนการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับพลังงานจริงที่ผลิตได้หลังการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของวิธีการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ (Fuentes et al., 2020b) อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ได้นำพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ไปหักลบด้วย %error เพื่อให้การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ใกล้เคียงกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงมากที่สุด ซึ่งวิธีการนี้ต่างจากการศึกษาที่ผ่านมา

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้านการเงินในการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (PB) ในการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน โดยต้นทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นปัจจัยหลักในการคำนวณระยะเวลาคืนทุนและอัตราผลตอบแทน ต้นทุนของโครงการคำนวณจากโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารที่ได้ดำเนินการไปแล้วเฉลี่ย 35.16 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้านการเงิน พบว่าการดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารมีความคุ้มค่าทางการเงินในการลงทุน มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 9 ปี 6 เดือน ทั้งนี้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจริงมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่าระยะเวลาคืนทุนที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย เนื่องจากปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อต้นทุนในการติดตั้งและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และที่สำคัญต้นทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่ลดลงทำให้จุดคุ้มทุนหรือระยะเวลาคืนทุนที่เร็วมากขึ้น (สุรกิจ ทองสุก & อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล, 2561) นอกจากนี้ การประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมของโครงการสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 791.44 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี

## สรุปผล

มหาวิทยาลัยเป็นกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสูงและมีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ลักษณะการใช้ไฟฟ้า (Load Profile) มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลากลางวัน สอดคล้องกับ

ความสามารถผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะเวลากลางวันเช่นกัน พื้นที่หลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยสามารถใช้ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ โดยคำนึงถึงค่ารังสีดวงอาทิตย์ ทิศและความลาดชันของหลังคา ตลอดจนเงาของต้นไม้หรืออาคารโดยรอบ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุดในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การวิจัยนี้จึงทำการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง และวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของมหาวิทยาลัย และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อน โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (DSM) รายละเอียดสูงจากการบินถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มาวิเคราะห์หาค่ารังสีดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง Solar Radiation Analysis ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) สรุปผลได้ดังนี้

จากแผนที่รังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์ ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ค่าเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 4.28 kWh/m<sup>2</sup> ค่าเฉลี่ยต่อสัปดาห์เท่ากับ 27.23 kWh/m<sup>2</sup> ค่าเฉลี่ยต่อเดือนเท่ากับ 130.69 kWh/m<sup>2</sup> และค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งปีเท่ากับ 1,415.80 kWh/m<sup>2</sup> โดยรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกรกฎาคม และรังสีดวงอาทิตย์มีค่าต่ำในช่วงเดือนธันวาคมถึงมกราคม เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าในแต่ละวันในช่วงเวลาหนึ่งปี การระบุพื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์พิจารณาจากระดับรังสีดวงอาทิตย์และลักษณะโครงสร้างหลังคา โดยหลังคาแบบลาดฟ้าเหมาะสำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยให้แผงหันไปทางทิศใต้และเอียงประมาณ 15 องศา หลังคาแบบความลาดเอียงต้องลาดเอียงไปทางทิศใต้หรือตะวันออกเฉียงใต้และความลาดชันของหลังคาไม่ควรเกิน 40 องศา เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รับแสงอาทิตย์ได้เต็มประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับหลังคาแบบซับซ้อนควรมีพื้นที่สำหรับติดตั้งแผงได้ไม่น้อยกว่า 80 แผงหรือกำลังผลิตติดตั้งไม่น้อยกว่า 25 กิโลวัตต์ จึงจะเกิดความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้ง สรุปแล้วอาคารที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามีจำนวน 23 อาคาร สามารถติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 4,106 แผง คิดเป็นพื้นที่ 7,977 ตารางเมตร กำลังผลิตติดตั้งรวมไม่ต่ำกว่า 1,300 กิโลวัตต์

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในพื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้แล้ว (PV installed area) โดยติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ (Poly Crystalline) ขนาด 320 วัตต์ จำนวน 944 แผง ค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการวิเคราะห์ที่แผง

ได้รับรวมทั้งเดือน 147.71 kWh/m<sup>2</sup> ระบบที่ติดตั้งนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้รวมทั้งปี 380,789.18 กิโลวัตต์-ชั่วโมง คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้เท่ากับ 452,656.10 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง ความคลาดเคลื่อน (%Error) ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคมเป็นช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากช่วงเวลานี้เป็นช่วงฤดูฝนปริมาณเมฆบนท้องฟ้าจำนวนมากทำให้บดบังรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องมาบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลง พลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้คำนวณจากค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะท้องฟ้าโปร่ง (Transmittivity = 0.5) ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้สูงกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง ค่า %Error เฉลี่ยเท่ากับ 0.19 ดังนั้น เพื่อให้การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ใกล้เคียงกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงมากที่สุดจึงนำไปหักลบด้วย %error ศักยภาพพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ในพื้นที่หลังคาที่มีศักยภาพในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานอาทิตย์ (PV-potential area) เฉลี่ยเดือนละ 127,003.68 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และคิดเป็นปีละ 1,524,044.15 กิโลวัตต์-ชั่วโมง สามารถลดภาระค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าในปัจจุบันได้ร้อยละ 42.28 ต่อปี

โครงการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ศักยภาพพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้ 1,524,044.15 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินด้วยการนำต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการมาจัดทำตารางกระแสเงินสดตลอดอายุโครงการ 25 ปี และนำผลประโยชน์สุทธิที่ได้มาคำนวณตามหลักเกณฑ์การตัดสินใจลงทุน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยโครงการจะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 71,428,346 บาท มีค่ามากกว่าศูนย์ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ เท่ากับร้อยละ 11.47 สูงกว่าอัตราต้นทุนเงินลงทุนถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ใช้เป็นอัตราคิดลดของโครงการ และโครงการมีระยะเวลาคืนทุน เท่ากับ 9 ปี 6 เดือน น้อยกว่าอายุโครงการ หมายความว่า การดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารมีความคุ้มค่าทางการเงินในการลงทุน นอกจากนี้ การประเมินผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมของโครงการ โดยประเมินผลประโยชน์ที่ได้จากการใช้ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ติดตั้งแล้วผลิตไฟฟ้าได้ 380,789 kWh/ปี สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 197.74 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี หากดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 1,524,044 kWh/ปี จะสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 791.44 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี การวิจัยนี้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของมหาวิทยาลัย สนับสนุนการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนตามแนวทางบรรลุเป้าหมายความยั่งยืน (SDGs) และมหาวิทยาลัยสีเขียว

การศึกษานี้นำเสนอวิธีการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารด้วยการใช้เทคนิคการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ให้ข้อมูลคุณภาพสูงทั้งความละเอียดและความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ใช้เวลาน้อยและต้นทุนต่ำ วิเคราะห์รังสีดวงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และปรับปรุงผลการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าบนหลังคาอาคารให้ใกล้เคียงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงมากที่สุด ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการประเมินกับค่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากระบบที่ติดตั้งไว้แล้ว ผลการศึกษา นอกจากจะเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์พื้นที่หลังคาอาคารที่มีอยู่ให้เป็นแหล่งผลิตพลังงานสะอาดให้แก่มหาวิทยาลัย เป็นแนวทางสำหรับการก่อสร้างอาคารใหม่ที่ต้องคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างหลังคา ทิศทางความลาดเอียงและความลาดชันของหลังคาที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถใช้พื้นที่หลังคาในการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของมหาวิทยาลัย ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้า และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดภาวะโลกร้อน

## ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลวิจัยไปใช้และการวิจัยครั้งต่อไปดังนี้

### 1. ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลวิจัยไปใช้

1.1 ผลการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง เป็นแนวทางให้มหาวิทยาลัยใช้จัดทำนโยบายหรือวางแผนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานสะอาดที่ผลิตได้เองในมหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่จะมุ่งสู่มหาวิทยาลัยสีเขียว (Green university) และบรรลุเป้าหมายความยั่งยืน (SDGs)

1.2 การประเมินผลประโยชน์ที่ได้จากการใช้ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในรูปของคาร์บอนเครดิตจากการชดเชยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สามารถนำไปชดเชยต้นทุนของโครงการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร ส่งผลให้เกิดความคุ้มค่าด้านการเงินและระยะเวลาคืนทุนของโครงการสั้นลง มหาวิทยาลัยสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจในการดำเนินโครงการได้

### 2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ค่าความคลาดเคลื่อน (% Error) ของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริง นำมาใช้เพื่อปรับให้ค่าพลังงานที่คำนวณได้ให้ใกล้เคียงกับพลังงานที่ผลิตได้จริง ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของการคำนวณในการวิจัยนี้เท่านั้น เนื่องจากใช้ค่าคุณลักษณะเฉพาะยี่ห้อและรุ่นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การวิจัยครั้งต่อไปจำเป็นต้องคำนวณจากค่าเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษา

2.2 เทคโนโลยีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทั้งประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้นและต้นทุนในการติดตั้งระบบที่ลดลง ต้นทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการจึงควรเป็นปัจจุบันที่สุด โดยเฉพาะราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบหลักในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

## บรรณานุกรม

BP. (2019). *BP Energy Outlook 2019 edition*.

<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>

Chaianong, A., & Pharino, C. (2015). Outlook and challenges for promoting solar photovoltaic rooftops in Thailand. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 48, 356-372.

Cioban, A., Criveanu, H., Matei, F., Pop, I., & Rotaru, A. (2013). Aspects of Solar Radiation Analysis using ArcGis. *Bulletin UASVM Horticulture*, 70(2), 437-440.

ESRI. (2016). *Understanding solar radiation analysis*.

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-solar-radiation-analysis.htm>

Falklev, E. H. (2017). *Mapping of Solar Energy Potential on Tromsøya Using Solar Analyst in ArcGIS* [Department of Physics and Technology, Faculty of Science and Technology]. The Arctic University of Norway.

Fu, P., & Rich, P. M. (2000). *The Solar Analyst 1.0 Manual*. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.

Fuentes, J. E., Moya, F. D., & Montoya, O. D. (2020a). Method for Estimating Solar Energy Potential Based on Photogrammetry from Unmanned Aerial Vehicles. *Electronisc*, 9, 2144.

- Fuentes, J. E., Moya, F. D., & Montoya, O. D. (2020b). Method for Estimating Solar Energy Potential Based on Photogrammetry from Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics*, 9(12), 2144. <https://doi.org/10.3390/electronics9122144>
- Kazak, J. K., & Swiader, M. (2018). A Novel Decision Support Tool for the Assessment of Solar Radiation in ArcGIS. *energies*, 11, 1-12.
- Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhaduri, B. L., & Neish, B. S. (2013). Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*, 8, 31-41.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60, 91-110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Machete, R., Falcão, A. P., Gomes, M. G., & Rodrigues, A. M. (2018). The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. *Energy & Buildings*, 177, 290-302.
- Nilsa, S., Silvina, B., Pablo, D., Judith, F., Karina, E., & Joaquín, S. (2019). A solar irradiation GIS as decision support tool for the Province of Salta, Argentina. *Renewable Energy*, 132, 68-80.
- Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (2013). *Solar Radiation Basics*. <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/solar-radiation-basics>
- Pili, S., Desogus, G., & Melis, D. (2018). A GIS tool for the calculation of solar irradiation on buildings at the urban scale, based on Italian standards. *Energy and Buildings*,

158, 629-646.

Polo, J., Bernardos, A., Navarro, A. A., Fernandez-Peruchena, C. M., Ramirez, L., Guisado, M. V., & Martínez, S. (2015). Solar resources and power potential mapping in Vietnam using satellite derived and GIS-based information. *Energy Conversion and Management*, 98, 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.016>

Pop, H., & Grama, A. (2021). Increasing Energy Efficiency Using Photovoltaic Panels. *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering*, 14(1), 6-10. <https://doi.org/10.2478/cjece-2021-0002>

Quirós, E., Pozo, M., & Ceballos, J. (2018). Solar potential of rooftops in Cáceres city, Spain. *Journal of Maps*, 14(1), 44-51. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1456487>

Rich, P. M., Dubayah, R., Hetrick, W. A., & 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.

Rodríguez, L. R., Duminil, E., Ramos, J. S., & Eicker, U. (2017). Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Solar Energy*, 146, 264-275. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.043>

Solargis. (2019). *Long term average of solar radiation yearly totals, period from 2007 to 2018*. Retrieved from <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/thailand>

Stefan, B., Gheorghe-Gavrila, H., Sanda, R., Ana-Maria, P., Iuliu, V., Fodorean, I.,

Alexandra-Camelia, M.-P., & Paul, S. (2022). Flash Flood Risk Assessment and Mitigation in Digital-Era Governance Using Unmanned Aerial Vehicle and GIS Spatial Analyses Case Study: Small River Basins. *Remote Sensing*, 14(10), 2481. <https://doi.org/10.3390/rs14102481>

Suomalainen, A.-K., Wang, V., & Sharp, B. (2016). *Solar potential on Auckland rooftops based on LiDAR data 2016-05-27*. U. o. Auckland. <https://researchspace.auckland.ac.nz/docs/uoa-docs/rights.htm>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Wong, M. S., Zhu, R., Liu, Z., Lu, L., Peng, J., Tang, Z., Lo, C. H., & Chan, W. K. (2016). Estimation of Hong Kong's solar energy potential using GIS and remote sensing technologies. *Renewable Energy*, 99, 325-335.

Yalcin, E. (2018, June 2018). *Generation of high-resolution digital surface models for urban flood modelling using UAV imagery* WIT Transactions on Ecology and the Environment,

Zhong, Q., Nelson, J. R., Tong, D., & Grubestic, T. H. (2022). A spatial optimization approach to increase the accuracy of rooftop solar energy assessments. *Applied Energy*, 316, 119128. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119128>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579. เข้าถึงได้จาก <http://www.dede.go.th>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2560). โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย (ปี 2560). เข้าถึงได้จาก [https://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=47941&filename=index](https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47941&filename=index)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน เดือน ม.ค. 2563. เข้าถึงได้จาก [https://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=53167](https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=53167)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (ม.ป.ป.). การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การถ่ายทอด และการเผยแพร่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์. เข้าถึงได้จาก <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/4535>

ฉัตร ผลนาค, จอมภพ แวศักดิ์, สมพล ชีวมงคลกานต์, & ปราณี หนูทองแก้ว. (2560). การประเมินประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายขนาดกำลัง 3 กิโลวัตต์ โดยอาศัยการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PVsyst. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 20(3), 261-268.

ณัฐพงศ์ สุวรรณสังข์. (2557). การประเมินศักยภาพทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ต่อลาภ การปลื้มจิตร์, สมใจ หมื่นจรรย์, & ชูเกียรติ นาควิโรจน์. (2562). การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลเชิงพื้นที่จากอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการประมวลผลออนไลน์กับโปรแกรมประยุกต์สำหรับรังวัดภาพเชิงเลข. รายงานการประชุม การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ธนาพล ต้นดีสัตยกุล, พีรพล รัศมีธรรมโชติ, & เมฆาพร อู่สกุล. (2560). การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงานสิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 25(6), 1083-1099.

ปิยะณัฐ ปิยะศิลป์, พันทิพย์ ปิยะทัศนานนท์, วิลาวัลย์ ประสมทรัพย์, & วารุณี อ้วนโพธิ์กลาง. (2562). การ

เปรียบเทียบเทคนิคการสร้างแบบจำลองความสูงสิ่งปกคลุมพื้นผิวเชิงเลขที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับที่เหมาะสมกับการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้าง. รายงานการประชุม การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ภมร บัวตุม, & โสภิตสุดา ทองโสภิต. (2560). การศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงานอุตสาหกรรมภายใต้มาตรการสนับสนุนสองประเภท. รายงานการประชุม การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, เชียงใหม่: โรงแรม ดิเอ็มเพรส.

มงคล วงษา, สรวิศ สุขเวทย์, & อนุเผ่า อบแพทย์. (2562). การสำรวจจัดทำภาพถ่ายออร์โธโอฟโตด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กและซอฟต์แวร์รหัสเปิด Open Drone Map. รายงานการประชุม การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. (2560). เรื่อง ประกวดราคาจ้างโครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐ – มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง เพื่อจ้างติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) ขนาดกำลังติดตั้งรวม ไม่น้อยกว่า ๓๐๐ กิโลวัตต์ (kW) บนพื้นที่หลังคาอาคารต่างๆ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางด้วยวิธีประกวดราคาอิเล็กทรอนิกส์ (e-bidding).

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. (2561). แผนที่ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. เข้าถึงได้จาก <https://www.lpru.ac.th/google-map/map-2018.pdf>

มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2560). โครงการศึกษาศักยภาพพื้นที่ที่เหมาะสมในการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (รายงานการวิจัย). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

เยาวเรศ ทับพันธุ์. (2551). การประเมินโครงการตามแนวทางเศรษฐศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่ 3 ed.). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2559). เทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ. เข้าถึงได้จาก <https://www.ryt9.com/s/prg/2409508>

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561). มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อ  
งานวิศวกรรม (ฉบับเทคนิคพิจารณา). เข้าถึงได้จาก <https://eit.or.th/>

สมาคมการสำรวจและการแผนที่แห่งประเทศไทย. (2556). ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ *LiDAR*. เข้าถึงได้จาก  
[http://sms.or.th/sms/images/pdf/C\\_Board.pdf](http://sms.or.th/sms/images/pdf/C_Board.pdf)

สมาคมดาราศาสตร์ไทย. (2562). เวลาดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ขึ้น-ตก พ.ศ. 2563 – จังหวัดลำปาง. เข้าถึงได้จาก  
<http://thaiastro.nectec.or.th/skyevnt/sunmoon/2020/lampang.html>

สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2556). เรื่อง การรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่  
ติดตั้งบนหลังคา.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2562). คู่มือโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (*Smart grid*). เข้าถึงได้จาก  
<https://thai-smartgrid.com/manual-smart-grid/>

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน). (2552). ตำราเทคโนโลยีอวกาศและภูมิ  
สารสนเทศศาสตร์. อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.

สุรกิจ ทองสุก, & อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล. (2561). การศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย  
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และ  
เทคโนโลยี), 10(19), 157-169.

## ภาคผนวก

ตารางภาคผนวก-1 ค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) จากการรังวัดแบบ RTK GNSS NETWORK

Name	North	East	Height	Solution	Ho-Error	V-Error
GCP1	2015835.356	550590.312	250.460	Fix	0.016	0.025
GCP2	2015664.118	550995.727	253.663	Fix	0.012	0.019
GCP3	2015513.205	550672.390	251.639	Fix	0.011	0.016
GCP4	2015710.456	551161.400	246.877	Fix	0.011	0.017
GCP5	2015810.920	551525.798	252.013	Fix	0.015	0.017
GCP6	2015645.075	551425.758	250.298	Fix	0.013	0.013
GCP7	2015829.084	551806.793	252.796	Fix	0.013	0.030
GCP8	2016092.171	551498.124	252.776	Fix	0.012	0.031
GCP9	2016240.459	551205.027	251.995	Fix	0.009	0.018
GCP10	2016485.893	551332.544	250.808	Fix	0.015	0.026
GCP11	2016660.317	551831.600	250.877	Fix	0.011	0.021
GCP12	2016261.790	551572.453	253.833	Fix	0.007	0.012

ตารางภาคผนวก-2 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบ (CP) จากการรังวัดแบบ RTK GNSS NETWORK

Name	North	East	Height	Solution	H-Error	V-Error
CP1	2015710.189	550678.613	253.296	Fix	0.026	0.039
CP2	2015776.249	550692.387	252.477	Fix	0.010	0.015
CP3	2015547.632	551175.658	249.471	Fix	0.010	0.018
CP4	2015766.072	551318.947	249.869	Fix	0.022	0.032
CP5	2015917.341	550811.066	249.928	Fix	0.015	0.043
CP6	2015663.800	550791.945	255.622	Fix	0.022	0.040
CP7	2015872.785	551651.448	252.470	Fix	0.017	0.036
CP8	2015983.807	551711.397	253.900	Fix	0.010	0.021
CP9	2016152.641	551737.204	254.404	Fix	0.011	0.025

Name	North	East	Height	Solution	H-Error	V-Error
CP10	2016117.056	551631.582	253.694	Fix	0.011	0.027
CP11	2016144.856	551540.206	253.207	Fix	0.015	0.036
CP12	2016430.078	551356.443	251.588	Fix	0.009	0.020
CP14	2016494.679	551379.951	252.442	Fix	0.010	0.018
CP15	2016662.489	551671.687	249.874	Fix	0.010	0.018
CP16	2016431.415	551540.259	252.320	Fix	0.012	0.021
CP17	2016420.482	551632.898	253.115	Fix	0.013	0.025
CP18	2016411.699	551802.595	253.285	Fix	0.013	0.021
CP19	2016358.906	551765.202	254.117	Fix	0.008	0.014
CP20	2016480.849	551710.658	251.640	Fix	0.011	0.022
CP21	2016238.014	551351.117	253.017	Fix	0.011	0.019
CP22	2015960.912	551428.213	250.824	Fix	0.020	0.033
CP23	2015959.618	551600.051	252.519	Fix	0.011	0.023
CP24	2015968.229	551626.005	252.727	Fix	0.015	0.028
CP25	2016077.942	551217.164	250.314	Fix	0.014	0.019
CP26	2016451.705	551380.501	252.447	Fix	0.027	0.033

ตารางภาคผนวก-3 ค่ารังสีดวงอาทิตย์บนหลังคาอาคารจากการวิเคราะห์รายสัปดาห์

สัปดาห์	วันที่	รังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งสัปดาห์ (Wh/m <sup>2</sup> )			ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )	
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	รวมทั้งสัปดาห์	รวมทั้งวัน
1	1 ม.ค.-7 ม.ค.	2,478.22	29,781.12	18,657.78	18.66	2.67
2	8 ม.ค.-14 ม.ค.	2,109.73	24,153.25	17,549.56	17.55	2.51
3	15 ม.ค.-21 ม.ค.	2,611.74	31,426.60	20,092.20	20.09	2.87
4	22 ม.ค.-28 ม.ค.	2,709.71	32,637.85	21,169.46	21.17	3.02
5	29 ม.ค.-4 ก.พ.	2,824.78	34,046.17	22,457.61	22.46	3.21
6	5 ก.พ.-11 ก.พ.	2,946.23	35,565.27	23,892.33	23.89	3.41
7	12 ก.พ.-18 ก.พ.	3,079.75	37,248.69	25,517.78	25.52	3.65
8	19 ก.พ.-25 ก.พ.	3,223.09	39,056.53	27,302.22	27.30	3.90

สัปดาห์	วันที่	รังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งสัปดาห์ (Wh/m <sup>2</sup> )			ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )	
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	รวมทั้งสัปดาห์	รวมทั้งวัน
9	26 ก.พ.-3 มี.ค.	3,374.06	40,994.69	29,246.51	29.25	4.18
10	4 มี.ค.-10 มี.ค.	3,520.87	42,886.35	31,210.96	31.21	4.46
11	11 มี.ค.-17 มี.ค.	2,790.37	31,152.21	26,312.76	26.31	3.76
12	18 มี.ค.-24 มี.ค.	2,862.40	31,911.02	27,313.12	27.31	3.90
13	25 มี.ค.-31 มี.ค.	2,929.68	32,623.79	28,229.21	28.23	4.03
14	1 เม.ย.-7 เม.ย.	3,002.16	33,270.55	29,037.41	29.04	4.15
15	8 เม.ย.-14 เม.ย.	3,130.62	33,851.20	29,728.83	29.73	4.25
16	15 เม.ย.-21 เม.ย.	3,379.36	34,377.76	30,300.93	30.30	4.33
17	22 เม.ย.-28 เม.ย.	3,770.16	34,836.30	30,757.19	30.76	4.39
18	29 เม.ย.-5 พ.ค.	3,808.58	35,226.64	31,106.89	31.11	4.44
19	6 พ.ค.-12 พ.ค.	3,309.77	35,550.10	31,362.36	31.36	4.48
20	13 พ.ค.-19 พ.ค.	3,191.78	35,811.19	31,539.23	31.54	4.51
21	20 พ.ค.-26 พ.ค.	3,205.22	36,015.22	31,654.44	31.65	4.52
22	27 พ.ค.-2 มิ.ย.	3,212.85	36,161.86	31,715.71	31.72	4.53
23	3 มิ.ย.-9 มิ.ย.	3,218.99	36,273.61	31,753.79	31.75	4.54
24	10 มิ.ย.-16 มิ.ย.	3,222.47	36,337.30	31,771.96	31.77	4.54
25	17 มิ.ย.-23 มิ.ย.	3,223.58	36,358.70	31,777.19	31.78	4.54
26	24 มิ.ย.-30 มิ.ย.	3,222.62	36,340.17	31,772.71	31.77	4.54
27	1 ก.ค.-7 ก.ค.	3,219.32	36,279.71	31,755.63	31.76	4.54
28	8 ก.ค.-14 ก.ค.	3,213.39	36,171.13	31,719.30	31.72	4.53
29	15 ก.ค.-21 ก.ค.	3,206.03	36,028.17	31,660.77	31.66	4.52
30	22 ก.ค.-28 ก.ค.	3,192.88	35,827.85	31,549.29	31.55	4.51
31	29 ก.ค.-4 ส.ค.	3,285.66	35,570.36	31,377.47	31.38	4.48
32	5 ส.ค.-11 ส.ค.	3,763.22	35,251.16	31,128.04	31.13	4.45
33	12 ส.ค.-18 ส.ค.	3,801.62	34,865.72	30,785.60	30.79	4.40
34	19 ส.ค.-25 ส.ค.	3,402.81	34,412.83	30,337.36	30.34	4.33
35	26 ส.ค.-1 ก.ย.	3,146.06	33,891.37	29,773.61	29.77	4.25
36	2 ก.ย.-8 ก.ย.	3,007.58	33,313.59	29,090.41	29.09	4.16
37	9 ก.ย.-15 ก.ย.	2,934.22	32,671.84	28,290.66	28.29	4.04
38	16 ก.ย.-22 ก.ย.	2,867.43	31,963.83	27,381.84	27.38	3.91
39	23 ก.ย.-29 ก.ย.	2,795.88	31,207.63	26,387.59	26.39	3.77
40	30 ก.ย.-6 ต.ค.	3,538.72	43,121.32	31,424.53	31.42	4.49

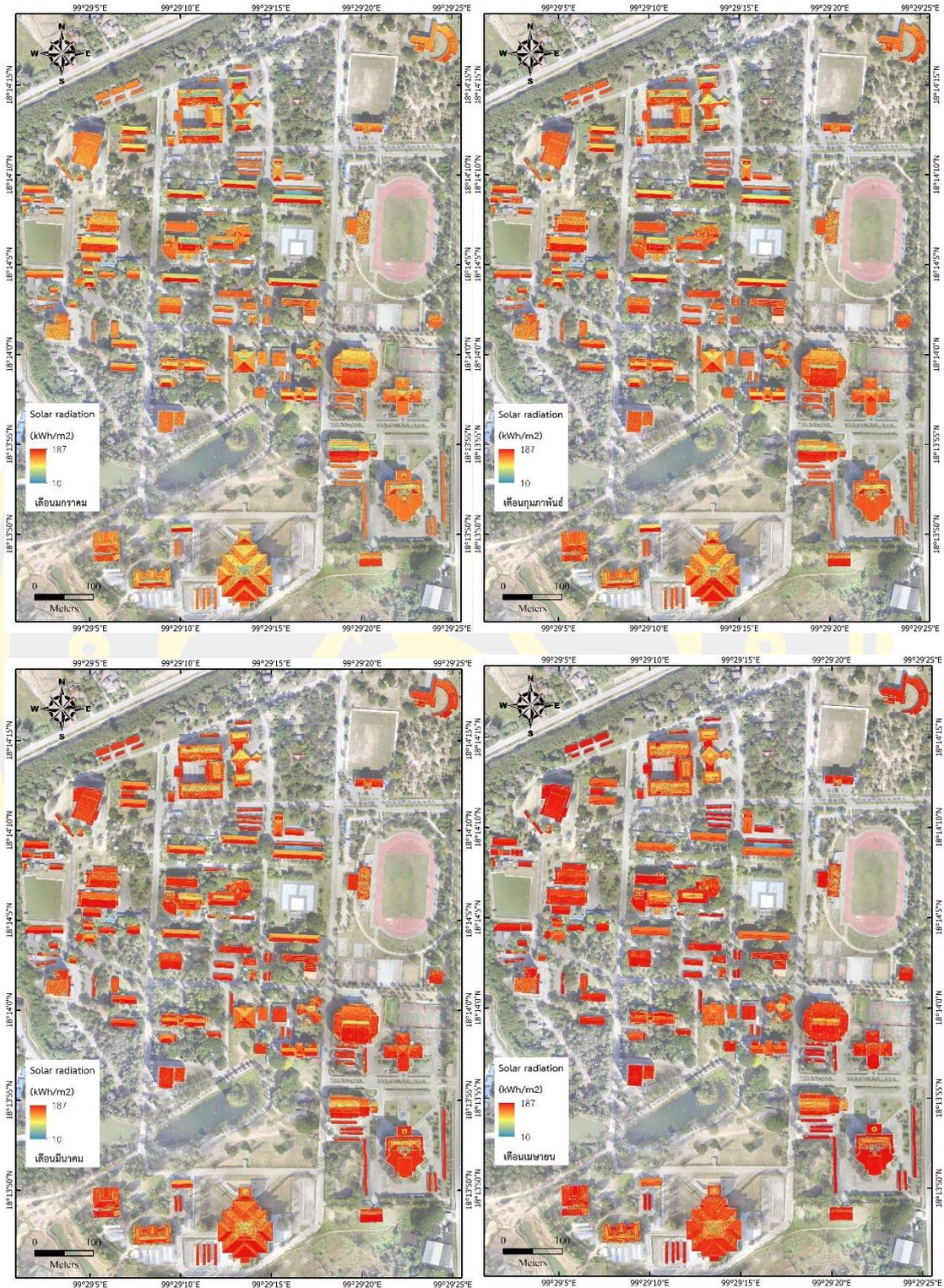
สัปดาห์	วันที่	รังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งสัปดาห์ (Wh/m <sup>2</sup> )			ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )	
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	รวมทั้งสัปดาห์	รวมทั้งวัน
41	7 ต.ค.-13 ต.ค.	3,391.72	41,208.94	29,442.61	29.44	4.21
42	14 ต.ค.-20 ต.ค.	3,245.03	39,335.65	27,536.69	27.54	3.93
43	21 ต.ค.-27 ต.ค.	3,105.46	37,572.38	25,775.57	25.78	3.68
44	28 ต.ค.-3 พ.ย.	2,966.60	35,815.28	24,093.12	24.09	3.44
45	4 พ.ย.-10 พ.ย.	2,839.97	34,232.46	22,608.85	22.61	3.23
46	11 พ.ย.-17 พ.ย.	2,723.83	32,810.53	21,305.27	21.31	3.04
47	18 พ.ย.-24 พ.ย.	2,624.68	31,595.36	20,217.93	20.22	2.89
48	25 พ.ย.-1 ธ.ค.	2,544.42	30,590.96	19,345.88	19.35	2.76
49	2 ธ.ค.-8 ธ.ค.	2,484.74	29,767.22	18,669.61	18.67	2.67
50	9 ธ.ค.-15 ธ.ค.	2,446.85	29,434.22	18,338.66	18.34	2.62
51	16 ธ.ค.-22 ธ.ค.	2,431.03	29,213.25	18,160.58	18.16	2.59
52	23 ธ.ค.-31 ธ.ค.	3,258.81	39,200.21	24,411.22	24.41	3.49
เฉลี่ยต่อสัปดาห์		3,073.01	34,716.29	27,226.89	27.23	3.89
ผลรวมทั้งปี		-	-	1,415,798.23	1,415.80	-

ตารางภาคผนวก-4 ค่ารังสีดวงอาทิตย์และค่าพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้รายสัปดาห์

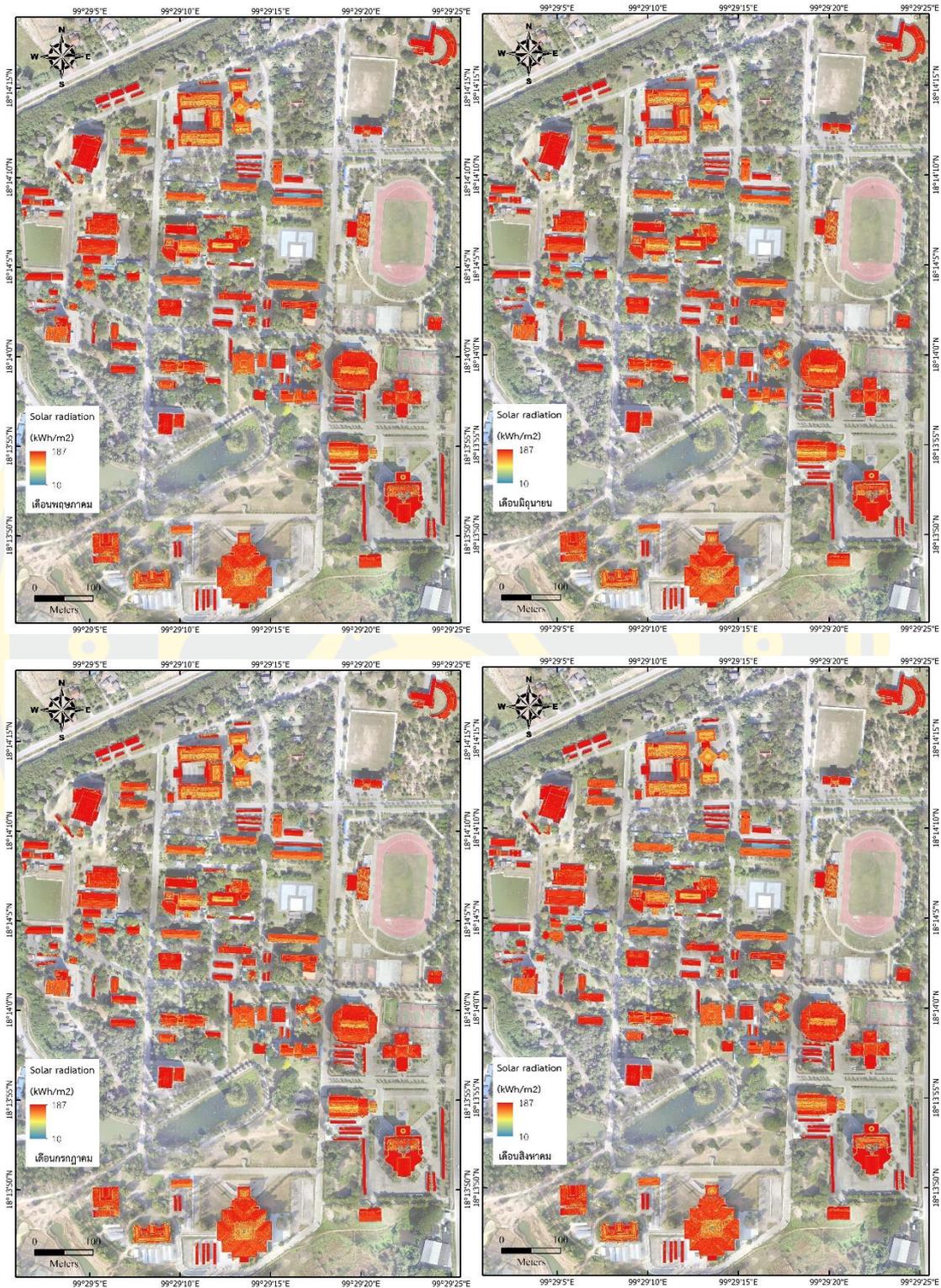
สัปดาห์	วันที่	ค่ารังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )			ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh)		
		พื้นที่ หลังคา	พื้นที่ที่ ติดตั้งแล้ว	พื้นที่ที่มี ศักยภาพ	พื้นที่ที่ ติดตั้งแล้ว	พื้นที่ที่มี ศักยภาพ	ผลรวม
1	1 ม.ค.-7 ม.ค.	18.66	24.19	23.00	6,171.61	25,486.01	31,657.61
2	8 ม.ค.-14 ม.ค.	17.55	21.72	20.79	5,539.86	23,036.20	28,576.06
3	15 ม.ค.-21 ม.ค.	20.09	25.92	24.66	6,611.77	27,326.33	33,938.10
4	22 ม.ค.-28 ม.ค.	21.17	27.21	25.90	6,940.29	28,700.95	35,641.24
5	29 ม.ค.-4 ก.พ.	22.46	28.73	27.38	7,329.81	30,332.81	37,662.61
6	5 ก.พ.-11 ก.พ.	23.89	30.41	29.00	7,758.78	32,132.81	39,891.58
7	12 ก.พ.-18 ก.พ.	25.52	32.30	30.83	8,240.58	34,156.86	42,397.44
8	19 ก.พ.-25 ก.พ.	27.30	34.35	32.81	8,763.83	36,358.35	45,122.18
9	26 ก.พ.-3 มี.ค.	29.25	36.57	34.96	9,328.74	38,737.96	48,066.69
10	4 มี.ค.-10 มี.ค.	31.21	38.77	37.10	9,890.10	41,108.51	50,998.61
11	11 มี.ค.-17 มี.ค.	26.31	30.41	29.40	7,757.36	32,579.97	40,337.33

สัปดาห์	วันที่	ค่ารังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )			ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh)		
		พื้นที่ หลังคา	พื้นที่ที่ ติดตั้งแล้ว	พื้นที่ที่มี ศักยภาพ	พื้นที่ที่ ติดตั้งแล้ว	พื้นที่ที่มี ศักยภาพ	ผลรวม
12	18 มี.ค.-24 มี.ค.	27.31	31.25	30.26	7,972.10	33,531.76	41,503.86
13	25 มี.ค.-31 มี.ค.	28.23	31.98	31.01	8,157.08	34,361.86	42,518.94
14	1 เม.ย.-7 เม.ย.	29.04	32.57	31.63	8,307.71	35,049.49	43,357.20
15	8 เม.ย.-14 เม.ย.	29.73	33.02	32.12	8,423.54	35,591.45	44,014.99
16	15 เม.ย.-21 เม.ย.	30.30	33.34	32.48	8,505.99	35,992.41	44,498.41
17	22 เม.ย.-28 เม.ย.	30.76	33.55	32.73	8,558.21	36,264.20	44,822.41
18	29 เม.ย.-5 พ.ค.	31.11	33.65	32.87	8,584.79	36,424.88	45,009.67
19	6 พ.ค.-12 พ.ค.	31.36	33.68	32.94	8,591.03	36,495.67	45,086.70
20	13 พ.ค.-19 พ.ค.	31.54	33.65	32.94	8,582.88	36,500.58	45,083.46
21	20 พ.ค.-26 พ.ค.	31.65	33.58	32.91	8,566.32	36,464.01	45,030.33
22	27 พ.ค.-2 มิ.ย.	31.72	33.50	32.85	8,545.15	36,400.56	44,945.71
23	3 มิ.ย.-9 มิ.ย.	31.75	33.43	32.80	8,527.42	36,345.19	44,872.61
24	10 มิ.ย.-16 มิ.ย.	31.77	33.38	32.77	8,515.14	36,305.26	44,820.39
25	17 มิ.ย.-23 มิ.ย.	31.78	33.36	32.75	8,510.77	36,290.83	44,801.60
26	24 มิ.ย.-30 มิ.ย.	31.77	33.38	32.76	8,514.54	36,303.28	44,817.82
27	1 ก.ค.-7 ก.ค.	31.76	33.42	32.80	8,526.33	36,341.68	44,868.01
28	8 ก.ค.-14 ก.ค.	31.72	33.49	32.85	8,543.77	36,396.38	44,940.16
29	15 ก.ค.-21 ก.ค.	31.66	33.58	32.91	8,564.97	36,460.45	45,025.42
30	22 ก.ค.-28 ก.ค.	31.55	33.64	32.94	8,581.91	36,499.04	45,080.95
31	29 ก.ค.-4 ส.ค.	31.38	33.68	32.94	8,590.87	36,497.97	45,088.84
32	5 ส.ค.-11 ส.ค.	31.13	33.66	32.88	8,585.83	36,432.59	45,018.42
33	12 ส.ค.-18 ส.ค.	30.79	33.56	32.74	8,560.91	36,279.14	44,840.05
34	19 ส.ค.-25 ส.ค.	30.34	33.36	32.51	8,510.70	36,016.00	44,526.70
35	26 ส.ค.-1 ก.ย.	29.77	33.05	32.15	8,430.50	35,624.63	44,055.12
36	2 ก.ย.-8 ก.ย.	29.09	32.60	31.67	8,317.02	35,092.55	43,409.57
37	9 ก.ย.-15 ก.ย.	28.29	32.02	31.06	8,169.00	34,415.78	42,584.78
38	16 ก.ย.-22 ก.ย.	27.38	31.31	30.32	7,986.41	33,595.58	41,581.99
39	23 ก.ย.-29 ก.ย.	26.39	30.47	29.47	7,773.85	32,652.72	40,426.58
40	30 ก.ย.-6 ต.ค.	31.42	39.02	37.34	9,953.17	41,373.38	51,326.55
41	7 ต.ค.-13 ต.ค.	29.44	36.80	35.18	9,386.84	38,981.98	48,368.82
42	14 ต.ค.-20 ต.ค.	27.54	34.63	33.08	8,835.27	36,657.04	45,492.31
43	21 ต.ค.-27 ต.ค.	25.78	32.62	31.13	8,320.47	34,490.06	42,810.53

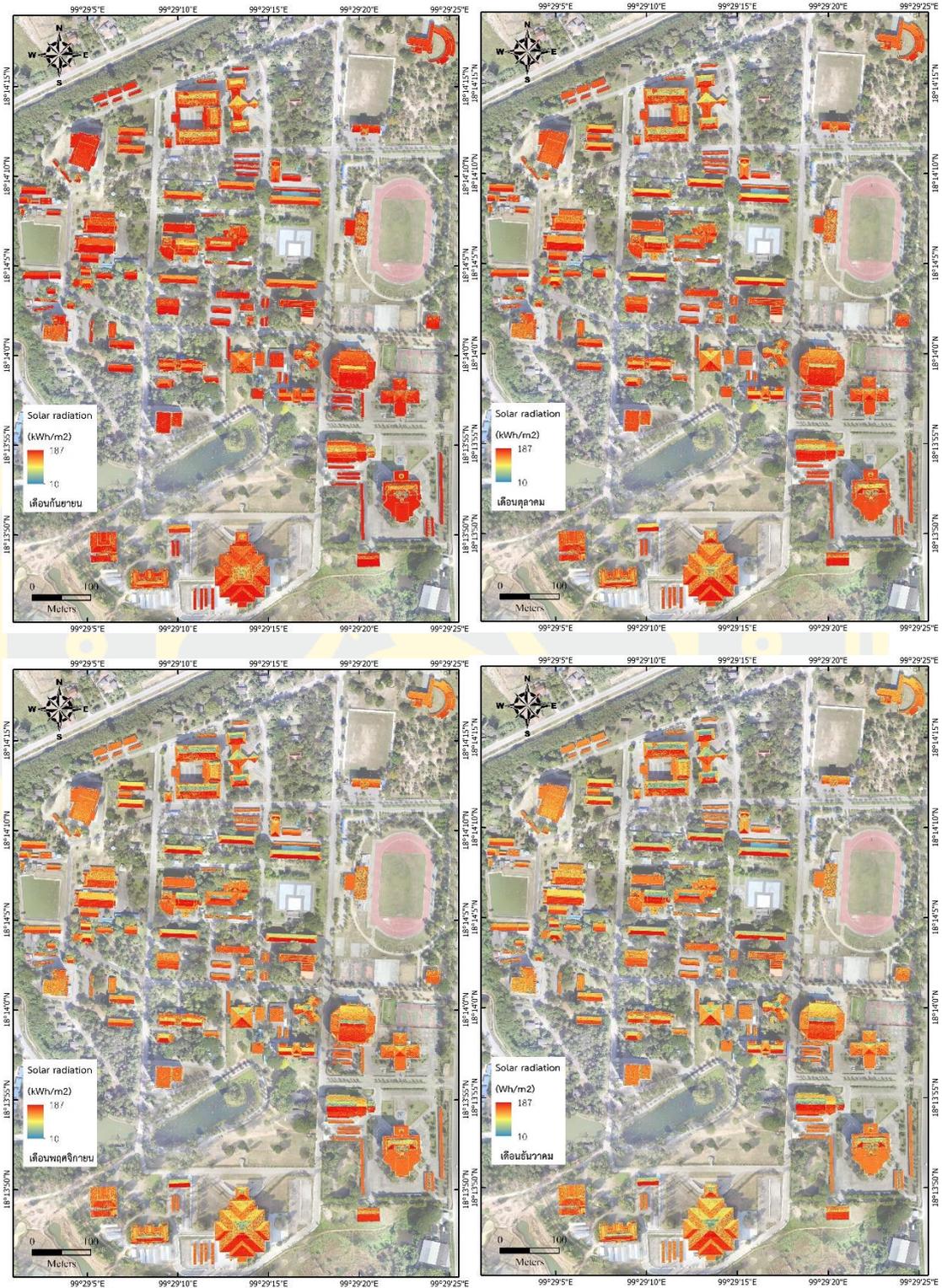
สัปดาห์	วันที่	ค่ารังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m <sup>2</sup> )			ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh)		
		พื้นที่ หลังคา	พื้นที่ที่ ติดตั้งแล้ว	พื้นที่ที่มี ศักยภาพ	พื้นที่ที่ ติดตั้งแล้ว	พื้นที่ที่มี ศักยภาพ	ผลรวม
44	28 ต.ค.-3 พ.ย.	24.09	30.66	29.24	7,820.99	32,392.33	40,213.32
45	4 พ.ย.-10 พ.ย.	22.61	28.92	27.55	7,376.65	30,528.26	37,904.91
46	11 พ.ย.-17 พ.ย.	21.31	27.37	26.06	6,982.76	28,877.89	35,860.65
47	18 พ.ย.-24 พ.ย.	20.22	26.08	24.81	6,651.70	27,492.27	34,143.97
48	25 พ.ย.-1 ธ.ค.	19.35	25.03	23.80	6,383.98	26,373.14	32,757.11
49	2 ธ.ค.-8 ธ.ค.	18.67	24.20	23.01	6,173.26	25,494.66	31,667.92
50	9 ธ.ค.-15 ธ.ค.	18.34	23.81	22.63	6,074.40	25,078.87	31,153.27
51	16 ธ.ค.-22 ธ.ค.	18.16	23.59	22.42	6,018.50	24,846.14	30,864.64
52	23 ธ.ค.-31 ธ.ค.	24.41	31.70	30.13	8,086.77	33,386.56	41,473.33
ค่าเฉลี่ยต่อสัปดาห์		27.23	31.54	30.49	8,046.20	33,779.91	41,826.11
ค่าเฉลี่ยต่อวัน		3.89	4.51	4.36	1,149.46	4,825.70	5,975.16
ผลรวมทั้งปี		1,415.8	1,640.16	1,585.35	418,402	1,756,555	2,174,957



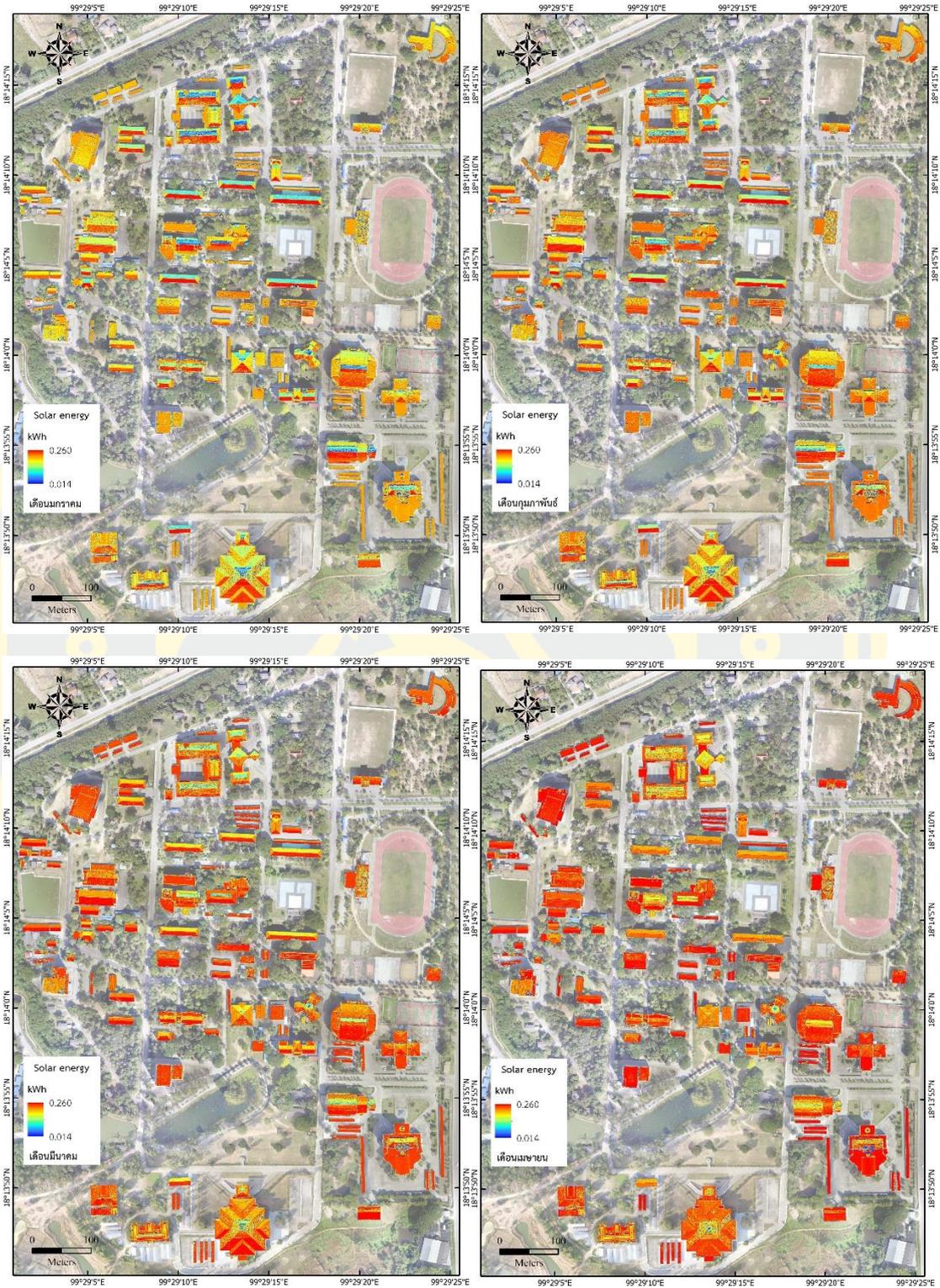
ภาพภาคผนวก-1 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือน (เดือนมกราคม-เมษายน)



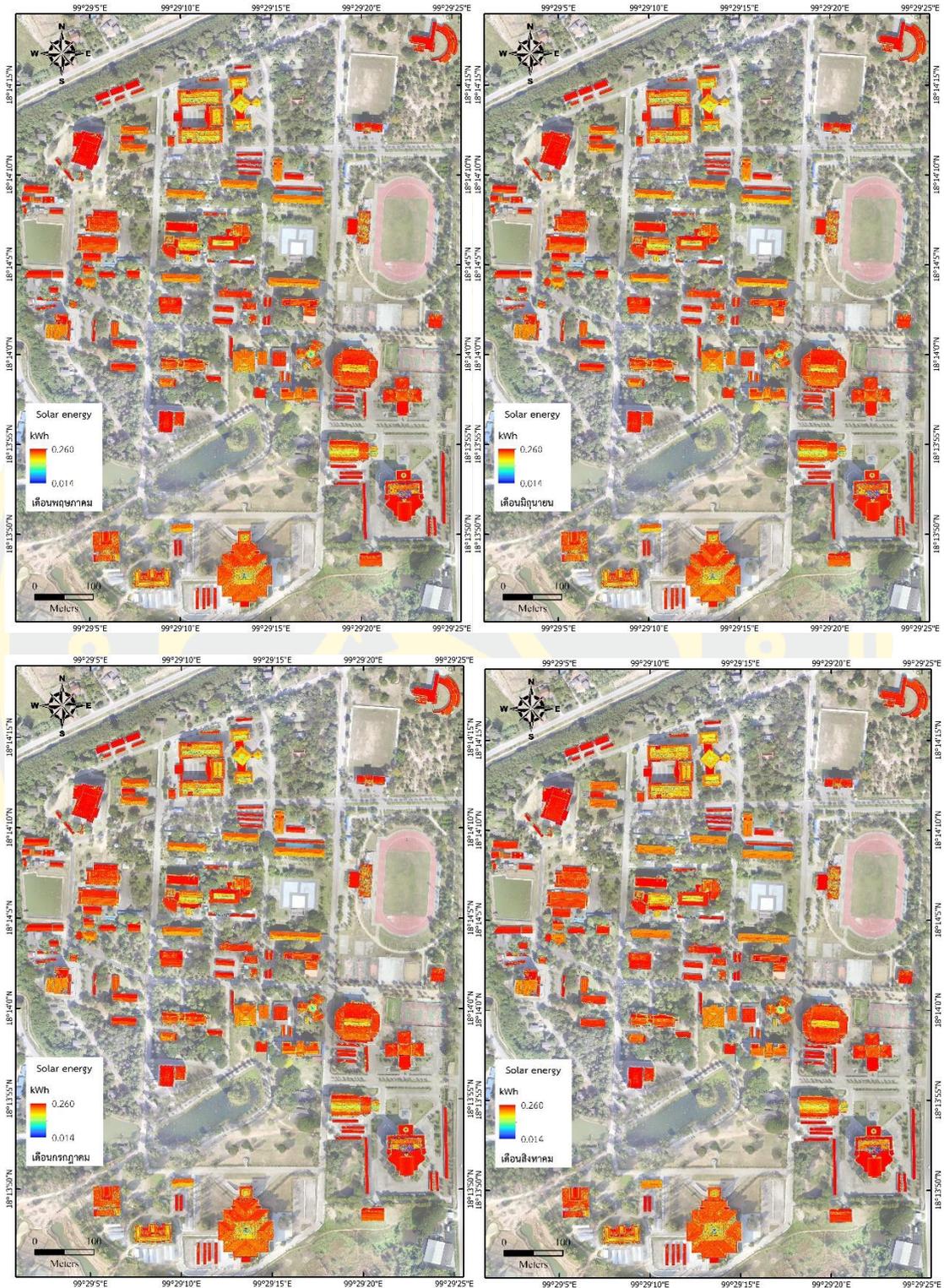
ภาพภาคผนวก-2 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือน (เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม)



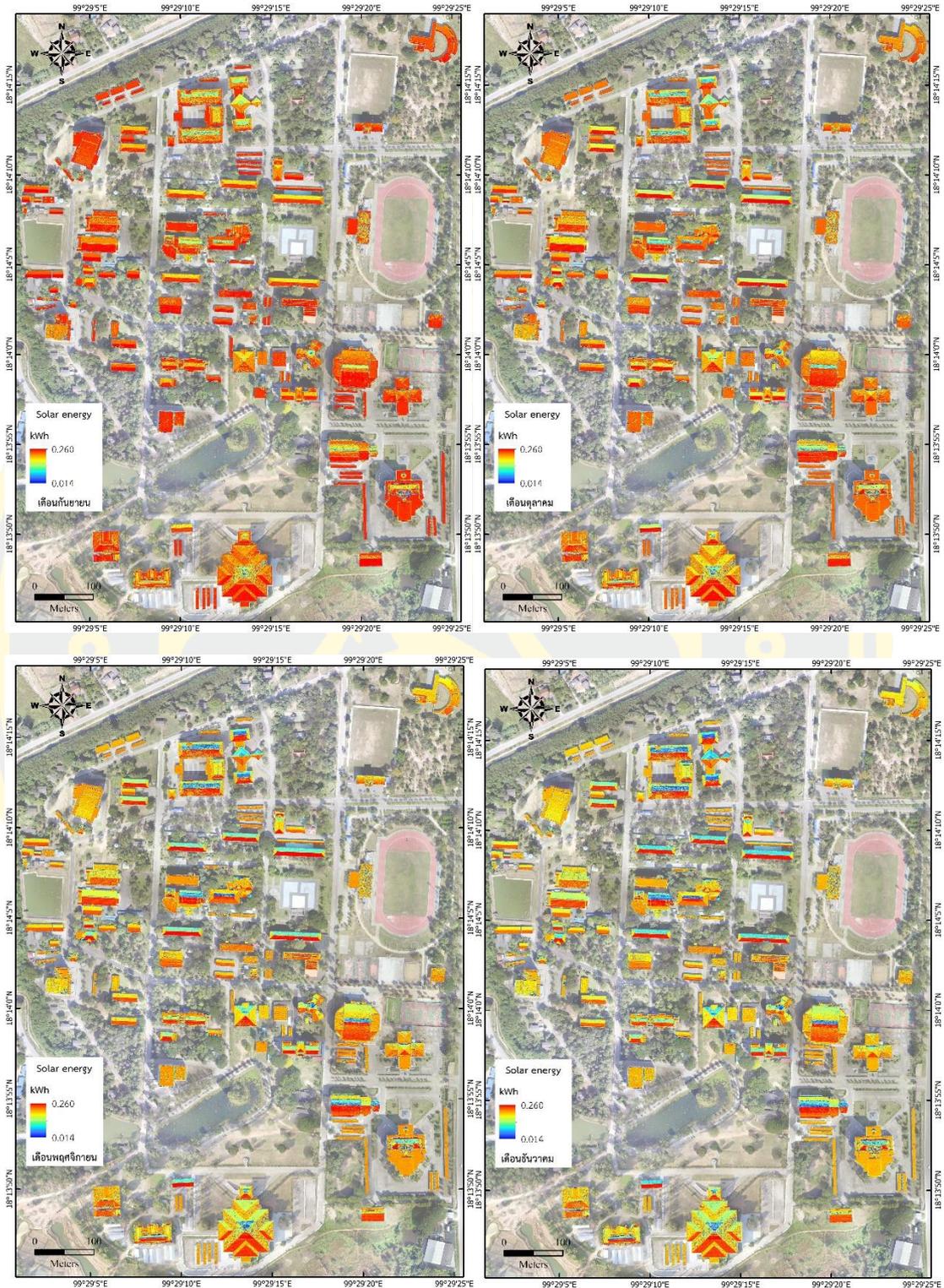
ภาพภาคผนวก-3 แผนที่รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อเดือน (เดือนกันยายน-ธันวาคม)



ภาพภาคผนวก-4 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งเดือน (เดือนมกราคม-เมษายน)



ภาพภาคผนวก-5 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งเดือน (เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม)



ภาพภาคผนวก-6 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งเดือน (เดือนกันยายน-ธันวาคม)

## ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาววารินทร์ วงษ์วรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	27 มกราคม 2519
สถานที่เกิด	ปราจีนบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	19/91 หมู่ 4 ต.ป่าสัก อ.เมืองลำพูน จ.ลำพูน
ตำแหน่งและประวัติการทำงาน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาสังคมศึกษา คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ลำปาง
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่