การประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข จากอากาศยานไร้คนขับ

Estimation of the solar energy by Digital Terrain Model data from Unmanned Aerial Vehicles

วิลาวัณย์ ประสมทรัพย์[1*], ติณณ์ ถิรกุลโตมร[2], ธนกร ทอดสูงเนิน[3], ศิลาภรณ์ จันทะลุน[4], ภาณุวิชญ์ เอ็นดู[5]

[1,2,3,4,5] สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

**Corresponding author: wilawan.pa@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าที่สวนทางกับความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย ทำให้การพัฒนาพลังงานทดแทนรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานลม เป็นทางเลือกที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการใช้เทคโนโลยีช่วยในการสำรวจค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข (DTM) ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับบนพื้นที่โล่ง ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เพื่อนำเสนอพื้นที่ต้นแบบในการคำนวณปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพื้นที่รับแสง (Area Solar Radiation) ที่มีค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในระดับต่าง ๆ ก่อนการลงสำรวจพื้นที่จริง จากการศึกษาพบว่าค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลขจะให้ค่าพลังงานสูงสุดและต่ำสุด เท่ากับ 5,670.96 และ 2.65927 MWh ตามลำดับ หลังจากทำการตัดสิ่งปกคลุมดิน (สิ่งปลูกสร้างและแหล่งน้ำ) ค่าพลังงานสูงสุดและต่ำสุด เท่ากับ 5,645.61 และ 382.715 MWh ตามลำดับ เมื่อนำมาแบ่งระดับค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ตามช่วงของข้อมูลเชิงเรขาคณิตออกเป็น 5 ระดับ พบว่าบริเวณพื้นที่เปิดโล่งทางทิศตะวันตกและทิศใต้ของมหาวิทยาลัย เป็นพื้นที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด (เนื้อที่ 22,869.04 ตารางเมตร) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพิจารณาพื้นที่เหมาะสมหากมีแผนในการจัดหาพื้นที่ในการติดตั้งเซลล์รับพลังงานแสงอาทิตย์ภายในมหาวิทยาลัยเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, แบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข, อากาศยานไร้คนขับ

Abstract

The ability to generate electricity is in contrast to the demand for electricity in Thailand. This causes a wide range to the development of alternative energy such as solar, water, and wind. Therefore, this study aims to study a preliminary of applying technology to survey the amount of solar energy by using the Digital Terrain Model (DTM) from Unmanned Aerial Vehicles (UAV) over the Rajamangala University of Technology Isan. This study presents a technic for calculating the amount of Solar Energy per Area Solar Radiation by using the DTM. As the results from calculating the DTM, the maximum and minimum Solar Energy is 5,670.96 MWh and 2.65927 MWh, respectively. After eliminating some noise from the DTM, the maximum and minimum Solar Energy is 5,645.61 MWh and 382.715 MWh, respectively. The result from adjusted DTM was classified into five levels associated with Geometrical interval. It is showed that the open area in the west and south of the University (totally 22,869.04 m^2) are the places that receive the highest amount of Solar Energy. The explored result of this study can be proposed to prioritize the areas for the field surveying afterwards. It would be able to reduce the time of field surveying over the suitable areas for the Solar Farm installation.

Keywords: Solar radiation, Digital Terrain Model, Unmanned Aerial Vehicle

1. บทนำ

สภาวะเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศไทยมีการเจริญเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งสวนทางกับความสามารถในการผลิตไฟฟ้าที่ยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของการบริโภคพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศได้ และด้วยกระแสตื่นตัวกับสภาวะโลกร้อนที่ต้องการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จึงได้มีการพัฒนาพลังงานทดแทนรูปแบบต่าง ๆ หากพิจารณาตามข้อมูลแผนที่ศักยภาพรังสีที่สร้างจากข้อมูลการตรวจวัดจริงบริเวณสถานีอุตุนิยมวิทยา ค่าพลังงานที่ได้จะเป็นค่าการสะท้อนถึงค่าพลังงานในจุดตรวจวัด และนำมาทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Interpolate) ให้กับพื้นที่

ทั้งหมด ต่อมาในปี พ.ศ. 2552 ได้มีการจัดทำโครงการโครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย โดยทำการคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม GMS4, GMS5, GOES9 และ MTSAT-1R ระยะเวลา 20 ปี (ค.ศ. 1990-2009) ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีที่ได้มีความละเอียดเชิงพื้นที่ประมาณ 3 x 3 ตารางกิโลเมตร และมีการจัดทำเป็นแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของเดือนต่าง ๆ ซึ่งผลลัพธ์ของแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยระยะเวลา 20 ปี สามารถนำมาใช้เป็นค่าพื้นฐานอ้างอิงได้ แต่ยังมีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่หยาบเกินไปสำหรับการนำมาใช้ประกอบการพิจารณาการติดตั้งโซลาร์เซลล์ เพื่อเป็นทางออกให้กับการสถานการณ์ดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข (Digital Terrain Model: DTM) ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) บนพื้นที่โล่ง ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ให้เป็นพื้นที่ต้นแบบในการคำนวณปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพื้นที่รับแสง (Area Solar Radiation) ที่มีค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในระดับต่าง ๆ ก่อนการลงสำรวจพื้นที่จริง

2. วิธีการศึกษา

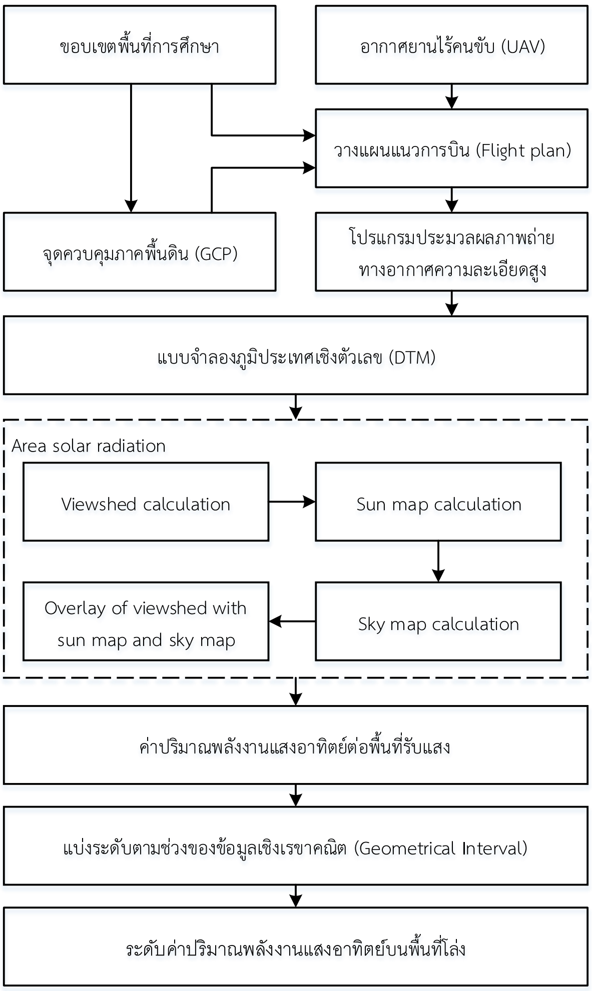
การประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลขที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับบนพื้นที่โล่ง ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1)

2.1 *การวางแผนแนวการบิน (Flight plan)*

กำหนดให้บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานเป็นพื้นที่ศึกษา มีเนื้อที่ประมาณ 330 ไร่ หรือประมาณ 528,000 ตารางเมตร และวางเส้นแนวบินผ่าน (Line of flight) ตามแนวตะวันออก–ตะวันตก กำหนดให้ความสูงการบินอยู่ที่ 90 เมตร กำหนดส่วนซ้อนร้อยละ 60 และส่วนเกยร้อยละ 30 เพื่อไม่ให้เกิดช่องโหว่ระหว่างแถบบิน [1] และวางจุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 9 จุดต่อการขึ้นบินถ่าย 1 ครั้ง ขึ้นบินถ่ายภาพวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

2.2 *การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ*

ข้อมูลที่ได้จาก UAV จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ข้อมูลรูปภาพ และข้อมูล Log การประมวลผลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ (1) กระบวนการเริ่มต้นจะทำการเลือกขนาดมาตราส่วนภาพให้เหมาะกับที่ใช้งาน และจะปรับแก้ภาพที่มีขนาดซ้อนเหลื่อมกันให้ลดลง และทำการจับคู่ภาพโดยด้วยข้อมูลจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Point: GCP) ในการจับคู่ภาพ (2) กลุ่มของจุดสามมิติ และเมช (Point Cloud and Mesh) เป็นการสร้างโครงตาข่ายสามเหลี่ยมขึ้นมาโดยใช้ข้อมูลจากกลุ่มพิกัดที่กำหนด และ (3) แบบจำลองความสูงพื้นผิวปกคลุมภูมิประเทศ (Digital Surface Model: DSM), แบบจำลองความสูง (Digital Terrain Model: DTM), การสร้างภาพออโท (Orthomosaic) และ การสร้างดัชนี (Index) เป็นการกำหนดค่าความชัดเพื่อจะทำให้รายละเอียดรูปภาพมีรายละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการศึกษา

2.3 *การคำนวณปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพื้นที่รับแสง (Area Solar Radiation)*

2.3.1 การคำนวณมุมมอง (Viewshed calculation)

การคำนวณมุมมองเป็นการแสดงมุมมองจากท้องฟ้าทั้งหมดที่มองเห็นหรือถูกบดบังเมื่อดูจากสถานที่เฉพาะ จากมุมมองนี้จะถูกคำนวณโดยค้นหาตามจำนวนเส้นทางที่กำหนดรอบสถานที่ที่สนใจและกำหนดมุมสูงสุดของสิ่งกีดขวางบนท้องฟ้าหรือมุมขอบฟ้า ผลลัพธ์ของแต่ละตำแหน่งเซลล์จะสอดคล้องกับมุมซีนิธ (Zenith: ϑ) และมุมแอซิมัท (Azimuth: α) บนซีกโลกของแต่ละทิศทาง [2][3][4][5][6] (รูปที่ 2)

2.3.2 การคำนวณแผนที่แสงอาทิตย์ (Sun map calculation)

การคำนวณแผนที่แสงอาทิตย์สามารถคำนวณโดยใช้แผนที่ดวงอาทิตย์ในการฉายภาพครึ่งทรงกลมเดียวกันกับมุมมอง แผนที่ดวงอาทิตย์จะเป็นภาพแบบกริดที่แสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์หรือตำแหน่งที่ชัดเจนของ

ดวงอาทิตย์ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชั่วโมงของแต่ละวันและเป็นเวลาตลอดทั้งปี การติดตามดวงอาทิตย์จะถูกคำนวณจากละติจูดของพื้นที่ที่ศึกษาและการกำหนดค่าของเวลาที่กำหนดโดยภาคส่วนของแผนที่ดวงอาทิตย์ สำหรับแต่ละภาคส่วนของแผนที่ดวงอาทิตย์จะมีการระบุค่าที่ไม่ซ้ำกัน (รูปที่ 3)

2.3.3 การคำนวณแผนที่ท้องฟ้า (Sky map calculation)

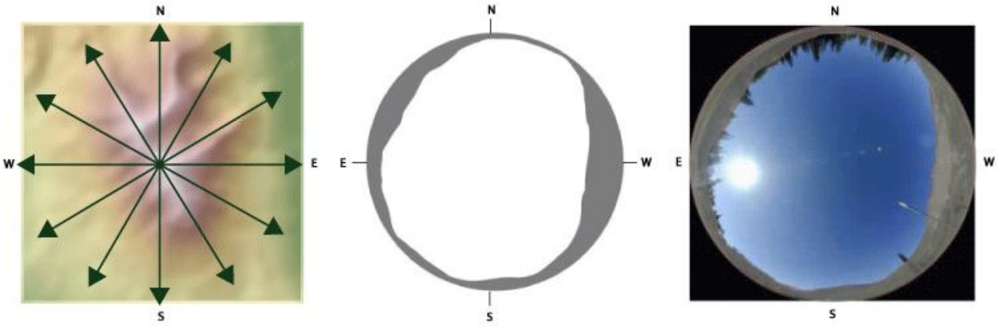
แผนที่ท้องฟ้าจะถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงมุมมองครึ่งทรงกลมของท้องฟ้าทั้งหมด โดยแบ่งเป็นชุดของภาคส่วนของท้องฟ้าที่กำหนดโดยมุมซีนิธ และมุมแอซิมัท รังสีแสงอาทิตย์จะถูกคำนวณสำหรับแต่ละภาคส่วนของท้องฟ้าตามทิศทางดิ่งและทางราบ (รูปที่ 4)

2.3.4 ภาพมุมมองซ้อนทับกับแผนที่ดวงอาทิตย์และแผนที่ท้องฟ้า (Overlay of viewshed with sun map and sky map)

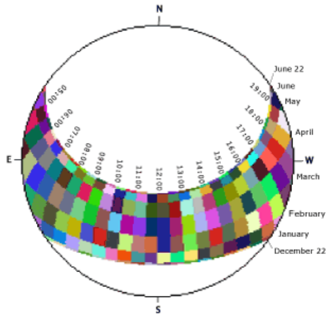
ในระหว่างการคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ แผนที่ดวงอาทิตย์และแผนที่ท้องฟ้าจะถูกนำมาวางซ้อนทับกันเพื่อคำนวณการกระจายของรังสีแสงอาทิตย์และการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ สร้างเป็นภาพมุมมองซ้อนทับระหว่างแผนที่ดวงอาทิตย์และแผนที่ท้องฟ้า (รูปที่ 5 และรูปที่ 6)

2.4 การแบ่งระดับตามช่วงของข้อมูลเชิงเรขาคณิต (Geometrical Interval)

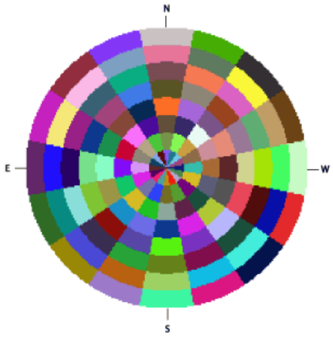
วิธีการแบ่งระดับตามช่วงของข้อมูลเชิงเรขาคณิตเป็นการจัดแบ่งช่วงค่าโดยพิจารณาจากความแตกต่างของค่าที่ต้องการจัดกลุ่ม ค่าที่มีความแตกต่างกันมากจะถูกจัดกลุ่มแยกออกจากกัน นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงการกระจายของข้อมูลในแต่ละระดับความเสี่ยงให้มีจำนวนใกล้เคียงกัน [7] การแบ่งกลุ่มด้วยวิธีนี้จะมั่นใจได้ว่า แต่ละช่วงชั้นจะมีระยะห่างที่ใกล้เคียงกันและมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงชั้นอย่างสม่ำเสมอ [8] โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ออกเป็น 5 ระดับ คือ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ (1) มากที่สุด (2) มาก (3) ปานกลาง (4) น้อย และ (5) น้อยที่สุด



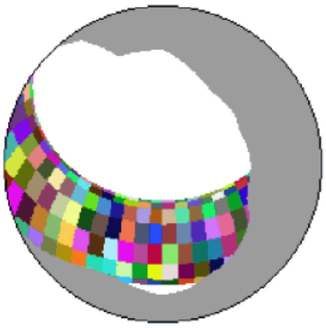
รูปที่ 2 มุมในแนวนอน ผลลัพธ์จากพื้นที่การมองเห็น และแผนที่พื้นที่การมองเห็นไปยังมุมท้องฟ้า [9]



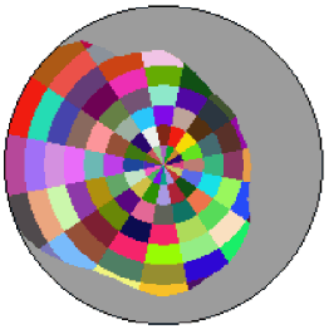
รูปที่ 3 แผนที่ดวงอาทิตย์ (Sun map) [9]



รูปที่ 4 แผนที่ท้องฟ้า (Sky map) [9]



รูปที่ 5 การซ้อนทับของพื้นที่การมองเห็นกับแผนที่ดวงอาทิตย์ [9]



รูปที่ 6 การซ้อนทับของพื้นที่การมองเห็นกับแผนที่ท้องฟ้า [9]

3. ผลการศึกษา

3.1 แบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข (Digital Terrain Model: DTM)

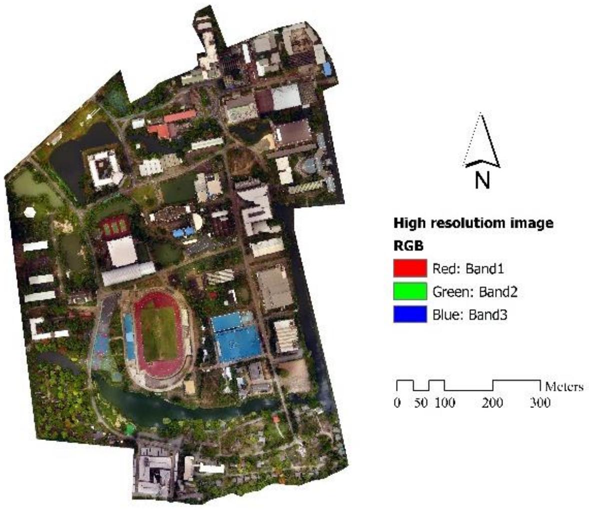
ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูง (รูปที่ 3) ที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ เป็นข้อมูลตั้งต้นที่นำมาประมวลผลเป็นข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นข้อมูลความสูงที่ไม่รวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิว แต่จะมีการสร้าง Point cloud จำลองความสูงบริเวณพื้นที่สิ่งปลูกสร้างเข้าไปด้วย ซึ่งถือเป็นจุดรบกวนในภาพ (Noise) แสดงดังรูปที่ 4 โดยให้ค่าความสูงตั้งแต่ 206.82 ถึง 287.26 เมตร ซึ่งค่าแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลขที่สูงที่สุดจะอยู่บริเวณหลังคาของสิ่งปลูกสร้าง และค่าต่ำสุดจะอยู่ที่บริเวณแหล่งน้ำ

3.2 การประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์

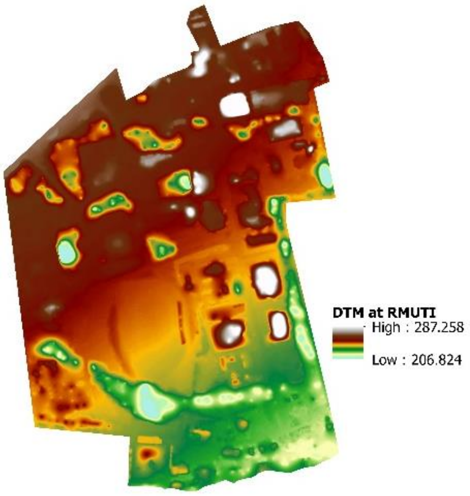
การประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลขที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Pixel size) 0.23 x 0.23 เมตร ให้ค่าพลังงานสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 5,670.96 MWh และ 2.65927 MWh ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 และบนพื้นที่โล่ง (ตัดข้อมูลสิ่งปลูกสร้างและแหล่งน้ำออก) ให้ค่าพลังงานสูงสุดเท่ากับ 5,645.61 MWh และค่าพลังงานต่ำสุดเท่ากับ 382.715 MWh ดังแสดงในรูปที่ 6

3.3 ระดับค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์

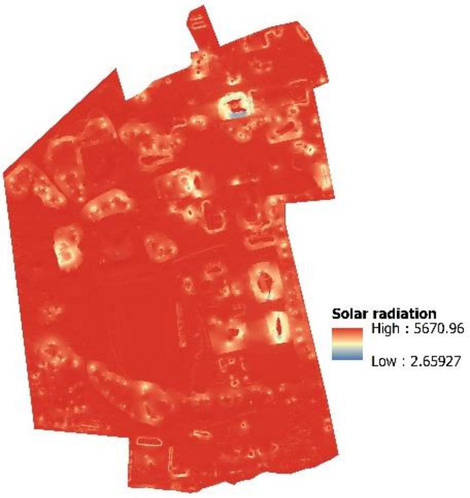
ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาแบ่งระดับตามช่วงของข้อมูลเชิงเรขาคณิตออกเป็น 5 ระดับ พบว่าบริเวณพื้นที่ทางด้านทิศตะวันตกและทางทิศใต้ของมหาวิทยาลัย เป็นพื้นที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด มีเนื้อที่ 22,869.04 ตารางเมตร พื้นที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์มาก ปานกลาง และน้อย จะแทรกตัวอยู่ตามบริเวณพื้นที่สีเขียวรอบมหาวิทยาลัย และพื้นที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์น้อยที่สุดมีเนื้อที่ 130,511.18 ตารางเมตร จะอยู่บริเวณพื้นที่ใกล้สิ่งปลูกสร้าง และบริเวณพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 7 และมีจำนวนเนื้อที่ดังแสดงในตารางที่ 1



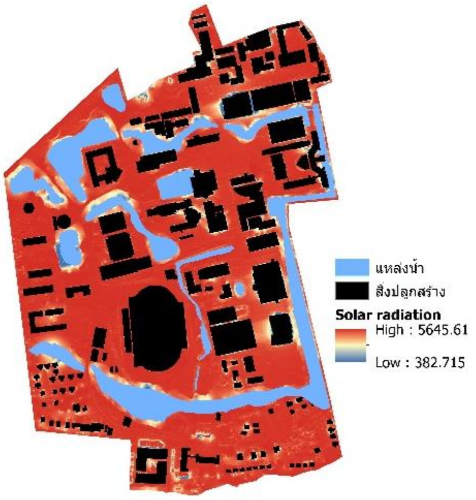
รูปที่ 3 ภาพถ่ายรายละเอียดสูง (High-resolution image)



รูปที่ 4 แผนที่แบบจำลองความสูง



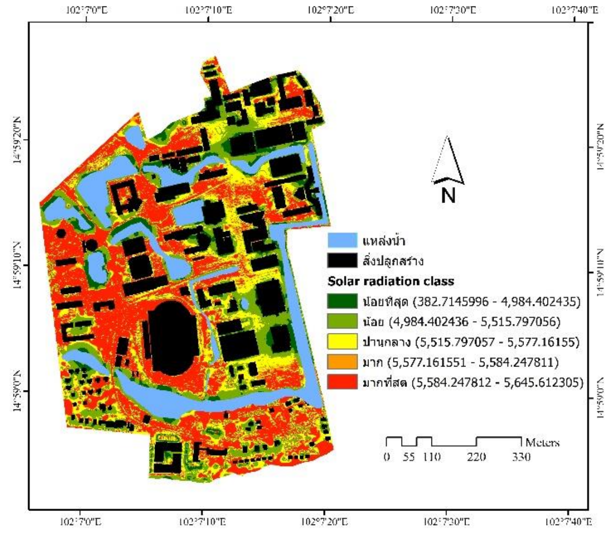
รูปที่ 5 แผนที่พลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 6 แผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ไม่รวมสิ่งปลูกสร้าง และแหล่งน้ำ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการประมาณค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลขที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ บนพื้นที่โล่งภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน พบว่าค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลขให้ค่าพลังงานสูงสุดเท่ากับ 5,670.96 MWh และต่ำสุดเท่ากับ 2.659272 MWh ซึ่งสังเกตได้ว่ามีระยะห่างระหว่างช่วงของข้อมูลที่ผิดปกติมากเกินไป จึงทำการตัดพื้นที่สิ่งสิ่งปลูกสร้าง และแหล่งน้ำออกจากข้อมูลตั้งต้น ทำให้ค่าพลังงานที่ได้สูงสุดจะอยู่ที่ 5,645.61 MWh และค่าพลังงานต่ำสุดเท่ากับ 382.715 MWh เมื่อนำมาแบ่งระดับค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ตามช่วงของข้อมูลเชิงเรขาคณิต (Geometrical Interval) ออกเป็น 5 ระดับ พบว่าบริเวณพื้นที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด (>5,584.3 MWh) มีเนื้อที่ 22,869.04 ตารางเมตร (จำนวน 432,307 เซลล์) เป็นพื้นที่เปิดโล่งทางทิศตะวันตกและทิศใต้ของมหาวิทยาลัย พื้นที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์มาก (5,577.2 - 5,584.3 MWh) ปานกลาง (5,515.8 - 5,577.2 MWh) และน้อย (4,984.5 - 5,515.8 MWh) จะแทรกตัวอยู่ตามบริเวณพื้นที่สีเขียวรอบมหาวิทยาลัย และพื้นที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์น้อยที่สุด (>4,984.5 MWh) มีเนื้อที่ 130,511.18 ตารางเมตร (จำนวน 2,467,130 เซลล์) จะอยู่บริเวณพื้นที่ใกล้สิ่งปลูกสร้าง และบริเวณพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำ ซึ่งข้อมูลและวิธีการที่ได้ในการประมวลผลครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ภายในมหาวิทยาลัยเพื่อรองรับการพัฒนาตามแนวทางมหาวิทยาลัยสีเขียว และการใช้พลังงานทดแทนอย่างยั่งยืนในอนาคตได้ โดยจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการลงพื้นที่สำรวจจริงในส่วนของพื้นที่ที่มีค่าพลังงานตั้งแต่ระดับน้อยที่สุดไปจนถึงระดับมากไปได้เป็นอย่างมาก



รูปที่ 7 ระดับปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar radiation classes) เมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม 2562

ตารางที่ 1 จำนวนเนื้อที่ที่ให้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละระดับ

ระดับปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ (MWh)	จำนวนเซลล์ (Cell)	ขนาดพื้นที่ (ตารางเมตร)
มากที่สุด (>5,584.3)	432,307	22,869.04
มาก (5,577.2 - 5,584.3)	1,474,414	77,996.50
ปานกลาง (5,515.8 - 5,577.2)	1,339,474	70,858.17
น้อย (4,984.5 - 5,515.8)	361,199	19,107.43
น้อยที่สุด (>4,984.5)	2,467,130	130,511.18

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตามสัญญาเลขที่ NKR2563INC005 และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพจากสาขาวิชาภูมิสารสนเทศ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

[1] กองการบิน (สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). (2562). คู่มือการบินติดตามการเปลี่ยนแปลงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. Available source: http://aviation.mnre.go.th/th/information/more/115

[2] Rich, P.M., Dubayah, R., Hetrick, W.A. and Saving, S.C. (1994). Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, pp. 524-529.

[3] Rich, P.M., and Fu, P. (2000). Topoclimatic Habitat Models. *The Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling,* Alberta, September 2-8, 2000, pp. 357-364.

[4] Fu, P. (2000). *A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology.* Ph.D. Thesis, University of Kansas, USA.

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

[6] Fu, P. and Rich, P.M. (2002). A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry. *Computers and Electronics in Agriculture,* 37, pp. 25-35.

[7] เมรินทร์ วรรณพงษ์, อุทัยวรรณ สีงาม และ จิระเดช มาจันแดง. (2560). การประเมินเชิงพื้นที่ของความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไข้เลือดออกในเขตเทศบาลเมืองมหาสารคาม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 36(4), หน้า 409-417.

[8] ESRI Thailand. (2558). การแบ่งช่วงชั้น. Available source: http://servicesbeta.esri.com/demos/3.11/api/js/esri/dijit/analysis/help/th/InterpolatePoints.html

[9] ESRI. (2019). Modeling solar radiation. Available source: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm