

นิพนธ์ต้นฉบับ

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าปลูกทดแทนด้วยข้อมูลจากดาวเทียม
Sentinel-2 บริเวณเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

Above-ground Carbon Storage Estimation of a Reforestation Site at Mae Moh Mine,
Lampang Province, Using Sentinel-2 Satellite Data

วีระภาส คุณรัตนศิริ¹Weeraphart Khunrattanasiri¹อลงกรณ์ อมะระกุล^{1*}Alongkorn Amarakul^{1*}ลัดดาวรรณ เจริญตระกูล²Laddawan Rianthakool²ฐิตินันท์ หุตะยานนท์³Thitinan Hutayanon³¹ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900¹Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand²ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900²Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand³การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 52220³Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Mae Moh Mine, Lampang 52220, Thailand

*Corresponding Author, E-mail: alongkorn.a@ku.th

รับต้นฉบับ 22 มิถุนายน 2566

รับแก้ไข 7 สิงหาคม 2566

รับลงพิมพ์ 22 สิงหาคม 2566

ABSTRACT

This research aimed to determine the relationship between above-ground carbon sequestration and vegetation index derived from Sentinel-2 satellite data to estimate the above-ground carbon sequestration of a reforestation site at Mae Moh mine in the Lampang province. Twenty five permanent plots of size 40 m × 40 m were selected and tree data, including diameter at breast height (DBH) and total height (H), were collected. An allometric equation was developed to determine the relationship between the above-ground carbon sequestration and vegetation index through linear regression. The results showed that the above-ground carbon sequestration estimated through RVI (ratio vegetation index) was sufficiently accurate. The model was of the form $y = -65.57 + 57.57x$ ($R^2 = 0.75$), with an RMSE of 11.14 tons of carbon dioxide equivalent per hectare. The average estimated above-ground carbon sequestration was 41.56 tons of carbon per hectare, while the total above-ground carbon sequestered at the reforestation site was 81,843.28 tons of carbon. The average carbon dioxide adsorption was 152.53 tons of carbon dioxide equivalent per hectare, while the total carbon dioxide adsorbed by the reforestation site being 300,374.28 tons of carbon dioxide equivalent.

Keywords: Above-ground carbon storage; Biomass; Remote sensing; Sentinel-2

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่าดัชนีพืชพรรณของข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ปลูกป่าทดแทน บริเวณเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้แปลงถาวรที่มีขนาด 40×40 ตารางเมตร จำนวน 25 แปลง เก็บข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอกและความสูงทั้งหมดของต้นไม้ คำนวณหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้สมการแอลโลเมตรี และวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่าดัชนีพืชพรรณด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ผลการศึกษาพบว่า การประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินด้วยดัชนีพืชพรรณ RVI มีความเหมาะสมที่สุด โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ คือ $y = -65.57 + 57.57x$ มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด เท่ากับ 0.75 และมีค่ารากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 11.14 ต้นคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเฮกตาร์ สามารถประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ยเท่ากับ 41.56 ต้นคาร์บอนต่อเฮกตาร์ และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินทั้งหมดของพื้นที่ปลูกป่าทดแทน เท่ากับ 81,843.28 ต้นคาร์บอน คิดเป็นการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 152.53 ต้นคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเฮกตาร์ และปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดของพื้นที่ปลูกป่าทดแทน เท่ากับ 300,374.28 ต้นคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

คำสำคัญ: การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน มวลชีวภาพ การรับรู้ระยะไกล ดาวเทียม Sentinel-2

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกที่มีสาเหตุหลักมาจากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล การทำลายป่า และการเสื่อมโทรมของป่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเขตร้อน ส่งผลให้อนุภาคเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกรวน (climate change) ในปัจจุบันได้มีการสร้างกลไกการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างกลไกเรดพลัส (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation, REDD+) ที่มีแนวคิดในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการทำลายป่าในประเทศกำลังพัฒนา ครอบคลุมถึงการจัดการป่าไม้อย่างยั่งยืน และการเพิ่มพูนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ป่าไม้ (Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, 2014) กลไกเรดพลัสกำหนดให้การปล่อยและกำจัดก๊าซเรือนกระจกต้องมีเกณฑ์มาตรฐานเทียบกับระดับอ้างอิงเพื่อประเมินผลกระทบในหน่วยเทียบเท่าต้นคาร์บอนไดออกไซด์ (tCO₂) และรายงานการปรับปรุงทุกสองปี (Herold *et al.*, 2019) โดยป่าไม้มีบทบาทสำคัญในการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ เพราะเป็นแหล่งดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นบรรยากาศ (carbon pool) มากักเก็บไว้ในรูปของมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (above-ground biomass, AGB) (Intergovernmental Panel on Climate

Change, 2003) ซึ่งสามารถคำนวณเป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (above-ground carbon, AGC) ได้ โดยการลงพื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนามจะให้ค่าประมาณของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่น่าเชื่อถือที่สุด (Tomppo *et al.*, 2010) แต่สำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาและแรงงานมาก ซึ่งในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เทคนิคการรับรู้จากระยะไกลได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มีการนำข้อมูลภาพดาวเทียมที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ต่างกันมาศึกษาการประมาณปริมาณการกักเก็บมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยใช้ดัชนีพืชพรรณต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย (Xue and Su, 2017; Ali *et al.*, 2018; Puliti *et al.*, 2021) และมีข้อมูลภาพดาวเทียมที่เปิดให้บริการฟรีโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายให้แก่ผู้ใช้งานทุกระดับ ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากข้อมูลภาพดาวเทียมเทียบกับค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจะทำให้ทราบความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของข้อมูลภาพดาวเทียม

ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 354,357.61 กิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (GgCO₂eq) ในปี พ.ศ. 2559 โดยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดจากการผลิตไฟฟ้าและความร้อนประมาณ 108,238.60 GgCO₂eq คิดเป็นร้อยละ 42.84 ของภาคพลังงาน (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2020) เหมืองแม่เมาะเป็นเหมืองแบบเปิดที่ใหญ่ที่สุดในเอเชีย

ตะวันออกเฉียงใต้ (Electricity Generating Authority of Thailand, 2016) ตั้งอยู่ที่จังหวัดลำปาง มีหน้าที่ผลิตถ่านหินลิกไนต์เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งการทำเหมืองเป็นโครงการที่ทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง จึงจำเป็นต้องมีมาตรการเพื่อลดผลกระทบของการทำเหมืองต่อสิ่งแวดล้อมตามแผนแม่บทฟื้นฟูสภาพเหมืองได้กำหนดวัตถุประสงค์เพื่อการใช้ประโยชน์สุดท้ายของที่ดินเป็นการปลูกป่าทดแทนร้อยละ 93 ของพื้นที่ ทำให้เกิดโครงการปลูกป่าทดแทนขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2525 (Revision of Mine Master Plan Committee, 2020) ซึ่งจะเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญของจังหวัดลำปางหลังเลิกทำเหมืองแล้ว การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลกับค่าดัชนีพืชพรรณของข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินบริเวณพื้นที่ปลูกป่าทดแทนของ

เหมืองแม่เมาะ ซึ่งการศึกษานี้จะมีบทบาทสำคัญในการติดตามปริมาณการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของจังหวัดลำปาง

อุปกรณ์และวิธีการ

สถานที่ศึกษา

เหมืองแม่เมาะเป็นเหมืองถ่านหินลิกไนต์แบบเปิดตั้งอยู่ในเขตตำบลแม่เมาะและตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (Figure 1) เป็นที่ราบระหว่างภูเขา สูงประมาณ 320 ถึง 400 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง มีพื้นที่ประมาณ 41,700 ไร่ พิกัดทางภูมิศาสตร์อยู่ระหว่าง $18^{\circ} 17'$ ถึง $18^{\circ} 22' N$ และ $99^{\circ} 40'$ ถึง $99^{\circ} 46' E$ มีฤดูกาล 3 ฤดู ได้แก่ ฤดูร้อน (มีนาคมถึงพฤษภาคม) ฤดูฝน (พฤษภาคมถึงตุลาคม) และฤดูหนาว (พฤศจิกายนถึงกุมภาพันธ์) มีป่าผสมผลัดใบหรือป่าเบญจพรรณเป็นประเภทป่าดั้งเดิมของพื้นที่ (TEAM Consulting Engineering and Management Public Co. Ltd., 2017)

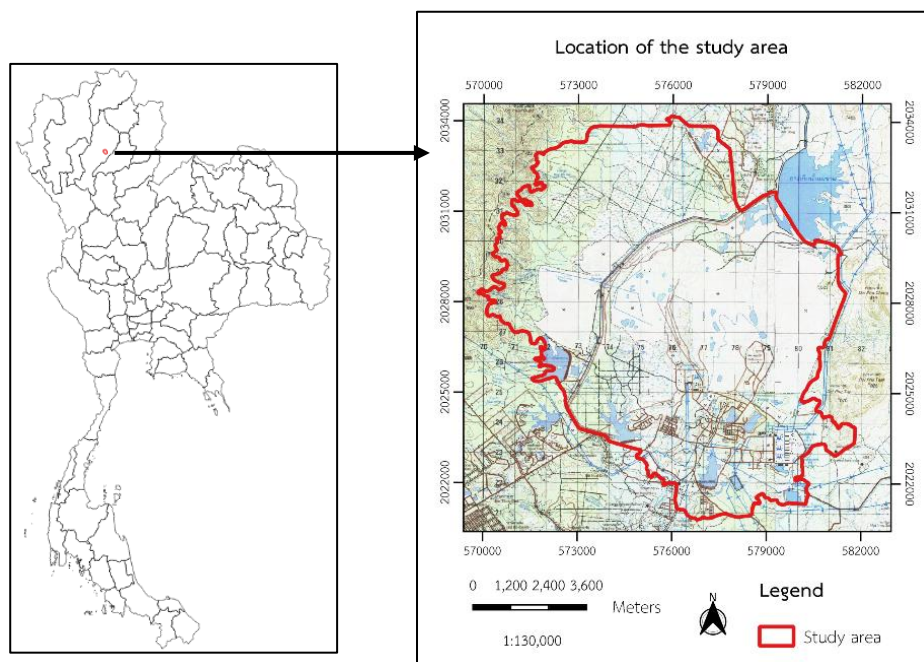


Figure 1 Location of the study area at Mae Moh mine in the Lamphang province.

การเตรียมข้อมูลภาพดาวเทียม

1. ข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2

คัดเลือกข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 ระบบบันทึกข้อมูล MSI ความละเอียดจุดภาพ 10 เมตร ผลิตภัณฑ์ L1C บันทึกภาพเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 โดยได้รับการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงรังสีจากผู้ผลิตและผู้ให้บริการข้อมูลแล้ว (European Space Agency, 2015)

2. การสังเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ

นำข้อมูลภาพดาวเทียมมาสังเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ 6 ดัชนี ได้แก่ ดัชนีพืชพรรณแบบสัดส่วน (RVI) ดัชนีพืชพรรณแบบผลต่าง (DVI) ดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอร์มัลไลซ์ (NDVI) ดัชนีพืชพรรณ Soil Adjusted (SAVI) ดัชนีพืชพรรณ Renormalized Difference (RDVI) และดัชนีพืชพรรณ Green Normalized Difference (GNDVI) (Table 1) (Xue and Su, 2017; Khunrattanasiri, 2020;)

Table 1 The various Vegetation indices used in this study.

Indices	Formula
Ratio Vegetation Index (RVI)	$RVI = \frac{NIR}{R}$
Difference Vegetation Index (DVI)	$DVI = NIR - R$
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + L)} \times (1 + L)$
Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)	$RDVI = \frac{(NIR - R)}{\sqrt{(NIR + R)}}$
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	$GNDVI = \frac{(NIR - G)}{(NIR + G)}$

Remarks: NIR = infrared band R = red band
 L = soil conditioning index G = green band

การสำรวจข้อมูลภาคสนาม

คัดเลือกแปลงปลูกป่าทดแทนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525-2550 ซึ่งเป็นแปลงถาวรขนาด 40×40 ตารางเมตร จากจำนวนทั้งหมดมาปีละ 1 แปลง เพื่อเป็นตัวแทนของปีปลูกนั้น ๆ ในกรณีที่ 1 ปีปลูก มีมากกว่า 1 แปลง ใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (simple random sampling) ในการคัดเลือกแปลงตัวแทน ได้จำนวน 25 แปลง เก็บข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอก (DBH) ความสูงทั้งหมด (H) และชนิดไม้ของต้นไม้ทุกต้นที่มีขนาด DBH มากกว่า 4.5 เซนติเมตร โดยแบ่งแปลงตัวอย่างเป็นแปลงสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและแปลงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องตามวิธีการของ Katong (2018)

การวิเคราะห์ข้อมูล

คำนวณหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน โดยใช้สมการแอลโลเมตรีของ Ogawa *et al.* (1965) และ Viriyabuncha (2020) ดังสมการที่ (1-4) เนื่องจากชนิดไม้ที่นำมาปลูกฟื้นฟูสอดคล้องกับชนิดป่าเบญจพรรณซึ่งเป็นพรรณไม้ดั้งเดิมของพื้นที่

$$W_s = 0.0396 (D^2H)^{0.9326} \quad (1)$$

$$W_b = 0.003487 (D^2H)^{1.027} \quad (2)$$

$$W_l = 1 / (28 / (W_s + W_b) + 0.025) \quad (3)$$

$$AGB = W_s + W_b + W_l \quad (4)$$

โดยที่ W_s = มวลชีวภาพของลำต้น (กิโลกรัม)

W_b = มวลชีวภาพของกิ่ง (กิโลกรัม)

W_l = มวลชีวภาพของใบ (กิโลกรัม)

AGB = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมด (กิโลกรัม)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)

H = ความสูงทั้งหมด (เมตร)

คำนวณหาค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินและการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากมวลชีวภาพเหนือพื้นดินตามวิธีการของ IPCC (2003) ที่ได้กำหนดค่าสัดส่วนคาร์บอนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.47 จากนั้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (ตัวแปรตาม) กับค่าดัชนีพืชพรรณ (ตัวแปรต้น) โดยวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) นำสมการที่ดีที่สุดไปประมาณหาค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ที่มีค่าสูงที่สุด นำข้อมูลแปลงตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องมาประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินด้วยสมการที่ดีที่สุด เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการถดถอยของข้อมูลภาพถ่ายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลเป็นร้อยละทดสอบสถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าราก

ของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error: RMSE) จากนั้นนำสมการที่ดีที่สุดมาใช้ประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินทั้งหมดและการดูดซับก๊าซ-

คาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดของพื้นที่ปลูกป่าทดแทน เขื่อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนได้ดัง Figure 2

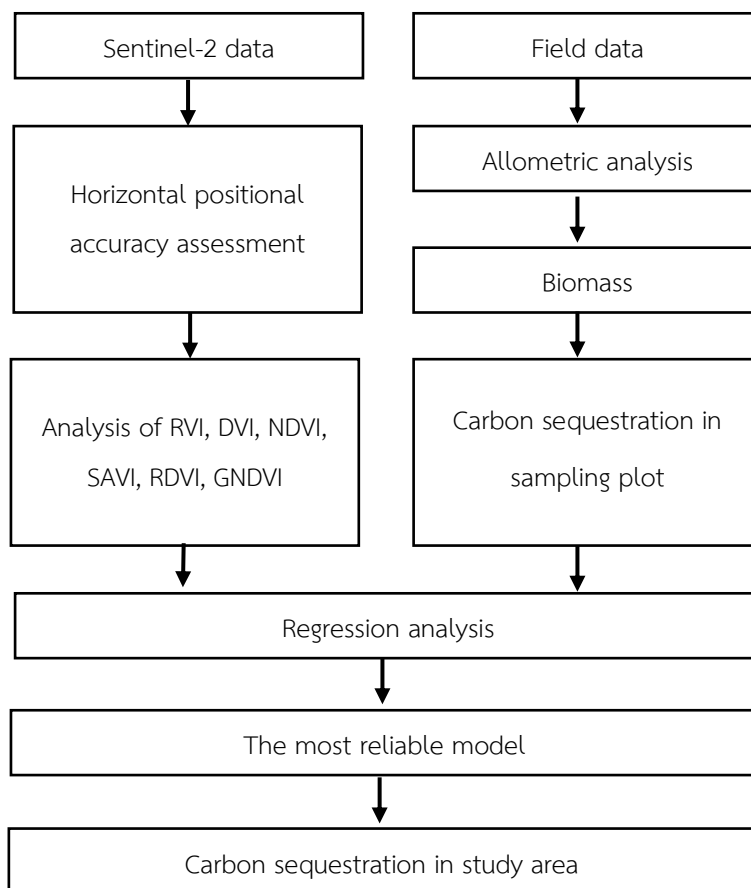


Figure 2 Flowchart of the study.

ผลและวิจารณ์

การวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม

คำนวณปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยสมการแอลโลเมตรี โดยใช้ข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของต้นไม้ทั้ง 25 แปลง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525–2550

จากนั้นนำไปคูณกับค่าสัดส่วนคาร์บอน (Thailand Greenhouse Gas Management Organization, 2016) ได้เป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน พบว่า มีปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเฉลี่ยเท่ากับ 85.39 ตันต่อเฮกตาร์ และมีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ยเท่ากับ 40.13 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ (Table 2)

Table 2 Average AGB and AGC sequestered as estimated by the allometric equation.

Plot	AGB sequestration (ton/ha)	AGC sequestration (ton/ha)
1982-1986	140.59	66.08
1987-1991	86.88	40.83
1992-1996	82.96	38.99
1997-2001	79.11	37.18
2002-2007	45.65	21.45
Average	85.39	40.13

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่าดัชนีพืชพรรณ

จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง พบว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจากข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่า RVI สูงสุด เท่ากับ 0.75 สอดคล้องกับ

การศึกษาของ Katong (2018) ที่พบว่า ข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่า RVI สูงสุด เช่นเดียวกัน แสดงแผนภาพการกระจายของข้อมูลระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่าดัชนีพืชพรรณ และเส้นแนวโน้มแบบเส้นตรงจากข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 ดัง Figure 3 แสดงรายละเอียดรูปแบบสมการการถดถอยเชิงเส้นค่าสหสัมพันธ์และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดใน Table 3

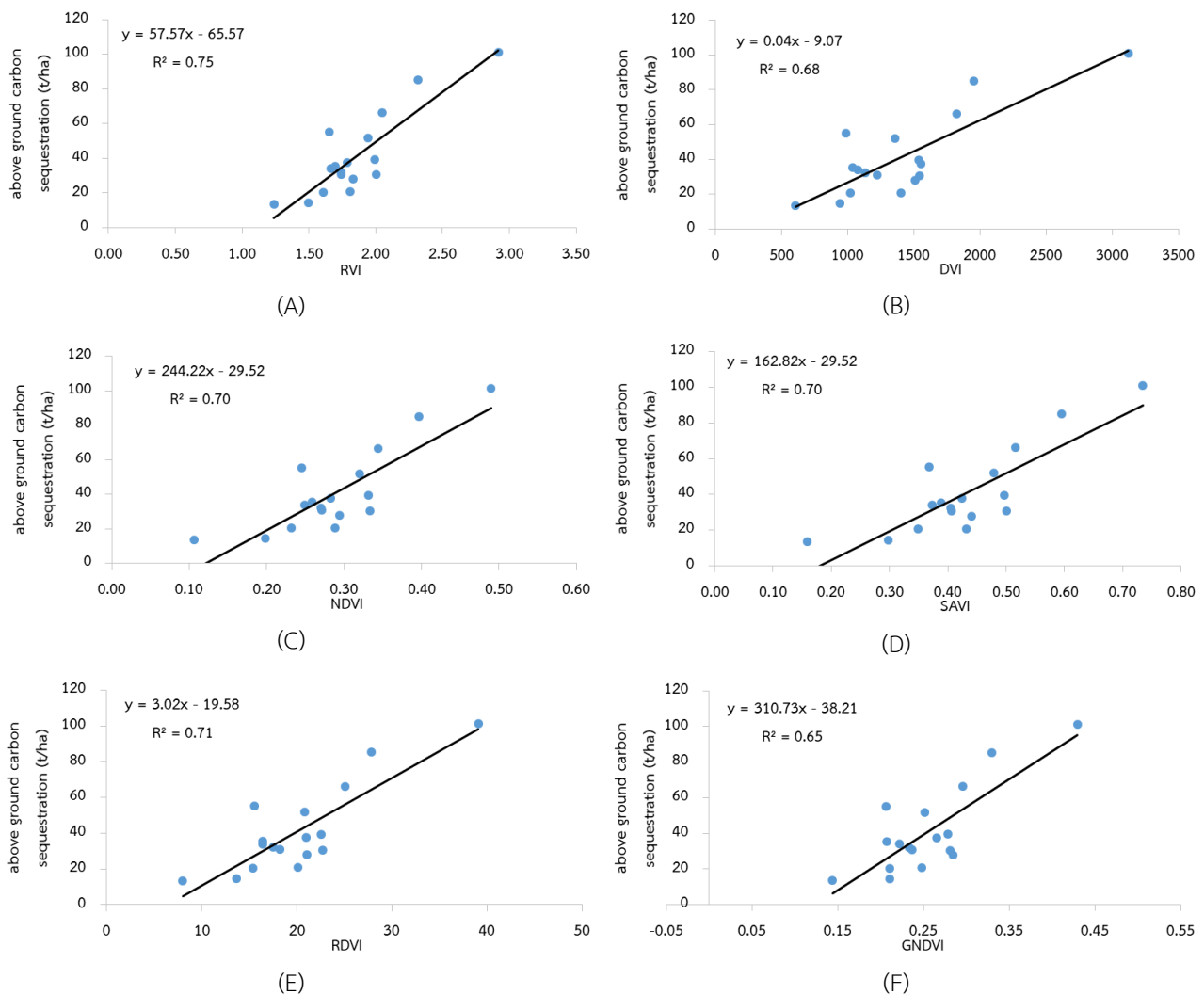


Figure 3 Distribution of data (A-F) between the AGC sequestration and VIs values based on the Sentinel-2 data.

Table 3 Mathematical form of the linear regression equations, correlations, and coefficient of determination of various indices derived from Sentinel-2.

Indices	Sentinel-2		
	Equation	R	R ²
RVI	$y = -65.57 + 57.57x$	0.87	0.75
DVI	$y = -9.07 + 0.04x$	0.83	0.68
NDVI	$y = -29.52 + 244.22x$	0.83	0.70
SAVI	$y = -29.52 + 162.82x$	0.83	0.70
RDVI	$y = -19.58 + 3.02x$	0.84	0.71
GNDVI	$y = -38.21 + 310.73x$	0.80	0.65

Remark: x is each indicator in column from table.

การวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการประมาณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดแล้วพบว่า ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการแอลโลเมตรีมีความสัมพันธ์กับค่า RVI มากที่สุด จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่ามีค่าสถิติทดสอบ F เท่ากับ 46.12 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต ($F_{0.05(1,16)} = 4.49$) ดัง Table 4 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 หมายความว่า ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมีความสัมพันธ์กับค่า RVI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

สอดคล้องกับการศึกษาของ Katong (2018) ที่พบว่าสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ปลูกป่าทดแทน เขื่อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง คือ สมการที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Sibanda *et al.* (2015) Ali *et al.* (2018) และ Puliti *et al.* (2021) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดของสมการความสัมพันธ์สำหรับการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าสูงเช่นเดียวกัน (Puliti *et al.*, 2021)

Table 4 ANOVA statistics results between the RVI obtained from Sentinel-2 and AGC sequestration.

	df	SS	MS	F	P-Value
Regression	1	7085.64	7085.64	46.12	0.00
Residual	15	2304.69	153.65		
Total	16	9390.33			

นำข้อมูลแปลงตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจำนวน 8 แปลง ที่ได้สุ่มเลือกไว้ก่อนหน้านี้แล้ว มาตรวจสอบความถูกต้องในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์กับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลกับค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการแอลโลเมตรี โดยใช้สถิติทดสอบแบบ t-test พบว่า มีค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ -1.32 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าวิกฤต ($t_{0.05(1,7)} = \pm 2.36$) (Table 5) แสดงว่า ผลการประมาณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากสมการที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 และ

ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการแอลโลเมตรีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการแอลโลเมตรีเท่ากับ 306.17 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ในขณะที่ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการความสัมพันธ์เท่ากับ 341.80 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ คิดเป็นสัดส่วนต่างกันร้อยละ 11.64 และมีค่า RMSE เท่ากับ 11.14 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเฮกตาร์

Table 5 t-test statistics results between RVI of Sentinel-2 and AGC sequestration.

	Allometric equations	Satellite image data
Mean	38.27	42.73
Variance	482.91	321.33
Observations	8.00	8.00
Pearson Correlation	0.90	
Hypothesized Mean Difference	0.00	
df	7.00	
t Stat	-1.32	
P(T<=t) one-tail	0.11	
t Critical one-tail	1.89	
P(T<=t) two-tail	0.23	
t Critical two-tail	2.36	

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ปลูกป่าทดแทน เขื่อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

จากการแทนค่าลงในสมการการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 คิดเฉพาะพื้นที่ปลูกป่าทดแทน ซึ่งมีพื้นที่ทั้งหมด เท่ากับ 1,969.28 เฮกตาร์ สามารถประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ย เท่ากับ 41.56 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ คิดเป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินทั้งหมด เท่ากับ 81,843.28 ตันคาร์บอน และมีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย เท่ากับ 152.53 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเฮกตาร์ คิดเป็นปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด เท่ากับ 300,374.28 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เพิ่มขึ้นจากการศึกษาของ Katong (2018) ที่ประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ย เท่ากับ 25.76 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ในพื้นที่เดียวกัน และมากกว่าค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ยของป่าเบญจพรรณในอุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน ในการศึกษาของ Nuanurai (2005) ที่ประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ย เท่ากับ 34.26 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ในขณะที่การศึกษาของ Boonsang (2011) พบว่า ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ยของป่าเบญจพรรณในบริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าแม่ต๋น เท่ากับ 80.16 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ แสดงว่า การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ปลูกป่าทดแทน บริเวณเขื่อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีความ

ใกล้เคียงกับการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าเบญจพรรณมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะสังคมพืชดั้งเดิมก่อนทำเหมือง

สรุป

พื้นที่ปลูกป่าทดแทน เขื่อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีบทบาทสำคัญในการลดความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศได้ เนื่องจากมีพื้นที่ขนาดใหญ่สำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากจากชั้นบรรยากาศ ดังนั้นการติดตามโครงการปลูกป่าด้วยการรับรู้จากระยะไกลจึงมีความสำคัญ จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนามกับดัชนีพืชพรรณที่สังเคราะห์ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น พบว่า ดัชนีพืชพรรณ RVI มีความสัมพันธ์กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากข้อมูลภาคสนามสูงที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด เท่ากับ 0.75 มีรูปแบบความสัมพันธ์คือ $Y = -65.57 + 57.57x$ มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน โดยมีค่ารากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 11.14 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเฮกตาร์ สามารถประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ย คิดเฉพาะพื้นที่ปลูกป่าทดแทนทั้งหมด เท่ากับ 41.56 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินทั้งหมด เท่ากับ

81,843.28 ตันคาร์บอน มีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย เท่ากับ 152.53 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเฮกตาร์ และมีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด เท่ากับ 300,374.28 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าสรุปได้ว่าการใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมสามารถช่วยในการติดตามการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ได้อีกทางหนึ่ง และการฟื้นฟูพื้นที่เมืองแม่มาะให้ได้ตามวัตถุประสงค์เพื่อการใช้ประโยชน์สุดท้าย จะช่วยให้สามารถกักเก็บคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้นอีกในอนาคต

คำนิยม

การศึกษาครั้งนี้ได้รับการอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ศึกษาจากคุณฉลอง สนนิม และขอขอบคุณคุณคุณจิตินันท์ หุตะยานนท์ และพี่ ๆ เจ้าหน้าที่เหมืองแม่มาะ จังหวัดลำปาง

REFERENCES

- Ali, A., Ullah, S., Bushra, S., Ahmad, N., Ali, A., Khan, M.A. 2018. Quantifying forest carbon stocks by integrating satellite images and forest inventory data. *Austrian Journal of Forest Science*, 135(2): 93-117.
- Boonsang, S. 2011. Estimation of Above - ground Carbon Sequestration of Forest Area by Using Remote Sensing Techniques at Mae Tuen Wildlife Sanctuary, Tak Province. M.S. Thesis, Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation. 2014. *Survey and Assessment of Carbon Sequestration in Forest Areas*. The Agricultural Co-operative Federation of Thailand (ACFT), Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Electricity Generating Authority of Thailand. 2016. *Measures to Prevent and Correct Environmental Impacts from Mining*. <https://mmmenv.egat.co.th/egatmmm/web/management.php>, 27 February 2023. (in Thai)
- European Space Agency. 2015. *Sentinel-2 User Handbook*. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xlslt4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook, 25 November 2021.
- Herold, M., Carter, S., Avitabile, V., Espejo, A.B., Jonckheere, I., Lucas, R., McRoberts, R.E., Næsset, E., Nightingale, J., Petersen, R., Reiche, J., Romijn, E., Rosenqvist, A., Rozendaal, D.M.A., Seifert, F.M., Sanz, M.J., De Sy, V. 2019. The role and need for space-based forest biomass-related measurements in environmental management and policy. *Surveys in Geophysics*, 40: 757-778.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.
- Katong, R. 2018. *Comparative Study of Landsat 8 and Sentinel-2 Data for Above-ground Carbon Sequestration Estimation at Reforestation Site of Mae Moh Mine, Lampang Province*. M.S. Thesis, Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Khunrattanasiri, W. 2020. *Satellite Imagery for Forest Resource Survey*. Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Nuanurai, N. 2005. *Comparison of Leaf Area Index, Above-ground Biomass and Carbon Sequestration of Forest Ecosystems by Forest Inventory and Remote Sensing at Kaeng Krachan National Park, Thailand*. M.S. Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai)

- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. 2020. **Thailand Third Biennial Update Report**. Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Bangkok, Thailand. (in Thai)
 - Ogawa, H., Yoda, K., Ogino, K., Kira, T. 1965. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand II Plant biomass. **Nature and Life in Southeast Asia**, 4: 49-80.
 - Puliti, S., Breidenbach, J., Schumacher, J., Hauglin, M., Klingenberg, T.F., Astrup, R. 2021. Above-ground biomass change estimation using national forest inventory data with Sentinel-2 and Landsat. **Remote Sensing of Environment**, 265: 112644. doi:10.1016/j.rse.2021.112644.
 - Revision of Mine Master Plan Committee. 2020. **Review Mae Moh Mine Master Plan**. Electricity Generating Authority of Thailand, Nonthaburi, Thailand. (in Thai)
 - Sibanda, M., Mutanga, O., Rouget, M. 2015. Examining the potential of Sentinel-2 MSI spectral resolution in quantifying above-ground biomass across different fertilizer treatments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 110: 55-65. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.10.005.
 - TEAM Consulting Engineering and Management Public Co. Ltd. 2017. **Environmental Health Impact Assessment: Project to Expand the Power Plant for Replacement Power Plants in Mae Moh Machine 4-7**. TEAM Consulting Engineering and Management Public Co. Ltd., Bangkok, Thailand. (in Thai)
 - Thailand Greenhouse Gas Management Organization. 2016. **Thailand Voluntary Emission Reduction Program Reference Manual: Forestry and Agriculture Sector**. Thailand Greenhouse Gas Management Organization, Bangkok, Thailand. (in Thai)
 - Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R.E. 2010. **National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting**. Springer, Berlin, Germany.
 - Viriyabuncha, C. 2020. **A Guide to Studying Carbon Stocks Source in Natural Forests**. Department of National Park, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok, Thailand. (in Thai)
 - Xue, J., Su, B. 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of Sensors**, 2017: 1353691. doi:10.1155/2017/1353691.
-