

**การพัฒนาแบบจำลองเชิงพื้นที่เพื่อประเมินคาร์บอนเหนือพื้นดิน
ในป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณ ด้วยข้อมูลการรับรู้ระยะไกล:
กรณีศึกษาป่าชุมชนบ้านวังสำราญ จังหวัดลำปาง**

**Development of a Spatial Model for Estimating Aboveground Carbon in Mixed
Deciduous and Dry Dipterocarp Forest Using Remote Sensing Data:
A Case Study of Wang Samran Community Forest, Lampang Province**

ชุติกานุญ ชลอม¹, ธนากร ลัทธิตีระสุวรรณ¹, อิศรีย์ ฮาวปินใจ², อุบลวรรณ สุภาแสน³,

สินีนาง สONGศรี⁴, วรรณมา มังกิตะ¹ และ ปิยะพิศ ขอนแก่น¹

Chutikan Chalorm¹, Thanakorn Lattirasuvan¹, Itsaree Howpinjai², Ubonwan Subhasaen³,

Sieneenard Songsri⁴, Wanna Mangkita¹ and Piyapit Khonkaen^{1,*}

¹หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ประเทศไทย

²หลักสูตรเทคโนโลยีอุตสาหกรรมป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ประเทศไทย

³สาขาวิชารัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ประเทศไทย

⁴กลุ่มวิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ประเทศไทย

¹ Department of Forest Management, Maejo University Phrae Campus, Thailand

² Department of Forest Industry Technology, Maejo University Phrae Campus, Thailand

³ Department of Political Science, Maejo University Phrae Campus, Thailand

⁴ Basic Science Group, Maejo University Phrae Campus, Thailand

Received: 20 April 2026, Received in revised form: 29 June 2026, Accepted: 3 July 2026

Available online: 1 September 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา: ระบบนิเวศป่าไม้มีบทบาทสำคัญต่อการกักเก็บคาร์บอนและการบรรเทาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากป่าสามารถสะสมมวลชีวภาพและกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพืชพรรณไม้ยืนต้นได้ในปริมาณมาก การประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนอย่างถูกต้องจึงมีความสำคัญต่อการติดตามทรัพยากรป่าไม้ การจัดการป่าไม้อย่างยั่งยืน และการพัฒนากลไกคาร์บอนเครดิตในระดับชุมชน อย่างไรก็ตามการประเมินด้วยข้อมูลภาคสนามเพียงอย่างเดียวใช้เวลาและแรงงานสูง จึงมีการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณในพื้นที่ป่าชุมชนบ้านวังสำราญ จังหวัดลำปาง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงสเปกตรัม สร้างแบบจำลองการประเมินมวลชีวภาพ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากดาวเทียมกับข้อมูลภาคสนาม

วิธีดำเนินการวิจัย: การวิจัยดำเนินการในพื้นที่ป่าชุมชนบ้านวังสำราญ จังหวัดลำปาง โดยเก็บข้อมูลภาคสนามจากแปลงตัวอย่าง จำนวน 17 แปลง เพื่อนำมาคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยสมการแอลโลเมตรี และคำนวณคาร์บอนเหนือพื้นดินด้วยค่าคงที่ 0.47 ข้อมูลดังกล่าวถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการพัฒนาและตรวจสอบแบบจำลอง ขณะเดียวกันได้ประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 เพื่อสกัดค่าการสะท้อนแสงของแบนด์ที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณ ได้แก่ แบนด์สีน้ำเงิน สีเขียว สีแดง และอินฟราเรดใกล้ รวมทั้งคำนวณดัชนีพืชพรรณ 12 ดัชนี ได้แก่ EVI2, GNDVI, MSAVI, NDMI, NDRE, NDVI, SAVI, SR-RE, SR, VARI, MTVI2 และ RTVcore จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาร์บอนจากภาคสนามกับตัวแปรจากภาพถ่ายดาวเทียมด้วยการถดถอยเชิงเส้น และคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมด้วยค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of Determination: R^2) เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณสำหรับการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบค่าที่ได้จากภาคสนามกับค่าที่ได้จากข้อมูลดาวเทียมด้วยสถิติเชิงอนุมาน ทดสอบค่าทางสถิติ Paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน

ผลการวิจัย: ผลการสำรวจภาคสนามพบว่า ป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพในการสะสมมวลชีวภาพและกักเก็บคาร์บอนในระดับปานกลาง โดยมีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเฉลี่ย 71.62 ตันต่อเฮกตาร์ ค่าต่ำสุด 52.43 ตันต่อเฮกตาร์ และค่าสูงสุด 140.52 ตันต่อเฮกตาร์ ส่วนคาร์บอนเหนือพื้นดิน มีค่าเฉลี่ย 33.66 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ค่าต่ำสุด 24.64 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ และค่าสูงสุด 66.04 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับตัวแปรจาก Sentinel-2 พบว่า VARI เป็นตัวแปรเดียวที่ให้ความสัมพันธ์ดีที่สุด โดยมีสมการถดถอย $y = 0.0009x + 0.0109$ และค่า $R^2 = 0.28$ รองลงมา ได้แก่ NDMI, MTVI2 และแบนด์สีแดง ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.12$ ขณะที่ตัวแปรบางชนิด เช่น SR-RE, NDRE และ RTVcore ไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประมาณค่า จึงพัฒนาแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณโดยใช้ตัวแปร VARI และ SR ได้สมการ $AGB = 409.313 + 996.771(VARI) - 165.375(SR)$ ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.64$ เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากภาคสนามกับค่าที่ประเมินจาก Sentinel-2 พบว่าทั้งสองวิธีให้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันมาก โดยผลการทดสอบ Paired t-test แสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันมีค่า $r = 0.80$ ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระดับสูงระหว่างข้อมูลทั้งสองชุด

สรุปผลการวิจัย: การวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการบูรณาการข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ร่วมกับข้อมูลสำรวจภาคสนามสามารถแสดงศักยภาพการประเมินปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณในพื้นที่ป่าชุมชนบ้านวังสำราญ จังหวัดลำปาง ได้ แม้ว่าตัวแปรเชิงสเปกตรัมเดียวจะมีข้อจำกัดในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล แต่การใช้ VARI ร่วมกับ SR ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองได้อย่างชัดเจน ผลการทดสอบทางสถิติที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าจากภาคสนามและค่าจาก Sentinel-2 รวมทั้งค่าสหสัมพันธ์ที่อยู่ในระดับสูง สนับสนุนว่าข้อมูล Sentinel-2 มีศักยภาพในการประเมินคาร์บอนในระดับแปลงตัวอย่างได้เป็นอย่างดี แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการติดตามและประเมินทรัพยากรป่าไม้ของป่าชุมชนอย่างยั่งยืน และการสนับสนุนการพัฒนาคาร์บอนเครดิตในระดับท้องถิ่นได้

คำสำคัญ: มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน; ดาวเทียม Sentinel-2; ดัชนีพืชพรรณ; ป่าชุมชน; ป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณ

Abstract

Background and Objectives: Forest ecosystems play an important role in Carbon stock and climate change mitigation because forests can accumulate aboveground biomass and store large amounts of carbon in living vegetation. Therefore, accurate estimation of aboveground biomass and carbon storage is essential for forest resource monitoring, sustainable forest management, and the development of community-level carbon credit mechanisms. However, assessment based solely on field data is time-consuming and labor-intensive. Consequently, Sentinel-2 satellite imagery, which provides multiple spectral bands and suitable spatial resolution for vegetation analysis, has been applied in this study. The objective of this research was to estimate aboveground biomass and aboveground carbon storage in the Mixed Deciduous and Dry Dipterocarp Forest of Ban Wang Samran Community Forest, Lampang Province, by integrating field data with Sentinel-2 imagery in order to analyze the relationships among spectral variables, develop an aboveground biomass estimation model, and compare satellite-derived results with field-based data.

Methodology: This study was conducted in Ban Wang Samran Community Forest, Lampang Province. Field data were collected from 17 sample plots and used to calculate aboveground biomass by applying allometric equations, while aboveground carbon was estimated using a constant factor of 0.47. These field-derived values were used as reference data for model development and validation. At the same time, Sentinel-2 satellite imagery covering the study area was processed to extract reflectance values from vegetation-related bands, including the blue, green, red, and near-infrared bands. In addition, 12 vegetation indices were calculated, namely EVI2, GNDVI, MSAVI, NDMI, NDRE, NDVI, SAVI, SR-RE, SR, VARI, MTVI2, and RTVIcore. Relationships between field-based carbon values and satellite-derived variables were then analyzed using linear regression, and the most suitable variables were selected based on the coefficient of determination (R^2) for the development of a multiple linear regression model to estimate aboveground biomass. Furthermore, values derived from field measurements and satellite data were compared using inferential statistics, a paired t-test at the 95% confidence level, and Pearson's correlation coefficient.

Main Results: Field survey results revealed that the Mixed Deciduous and Dry Dipterocarp Forest in the study area had a moderate potential for biomass accumulation and carbon storage. The mean aboveground biomass was 71.62 t/ha, with a minimum of 52.43 t/ha and a maximum of 140.52 t/ha. Mean aboveground carbon storage was 33.66 tC/ha, ranging from 24.64 to 66.04 tC/ha. Analysis of the relationship between aboveground carbon storage and Sentinel-2 variables showed that VARI was the best single predictor, with the regression equation $y = 0.0009x + 0.0109$ and an R^2 value of 0.28. The next best predictors were NDMI, MTVI2, and the red band, each with an R^2 of 0.12. Some variables, such as SR-RE, NDRE, and RTVIcore, could not explain the variation in the data. To improve

estimation performance, a multiple linear regression model was developed using VARI and SR, yielding the equation: $AGB = 409.313 + 996.771(VARI) - 165.375(SR)$, with an R^2 of 0.64. Comparison between field-based values and Sentinel-2-derived estimates showed that the two approaches produced very similar mean values. The paired t-test indicated no statistically significant difference at the 95% confidence level, and Pearson's correlation coefficient was $r = 0.80$, indicating a strong positive relationship between the two datasets.

Conclusions: The findings of this study highlight the effectiveness of integrating Sentinel-2 satellite imagery with field-based inventory data for estimating aboveground carbon storage in the Mixed Deciduous and Dry Dipterocarp Forest of Ban Wang Samran Community Forest, Lampang Province. Although individual spectral variables had limitations in explaining data variation, combining VARI and SR significantly improved model performance. The statistical results, which showed no significant difference between field-based and Sentinel-2-derived values, together with the high correlation coefficient, support the potential of Sentinel-2 data for carbon estimation at the sample plot level. Therefore, the developed model can serve as a practical tool for sustainable monitoring and assessment of community forest resources and for supporting the development of local carbon credit initiatives.

Keywords: aboveground carbon; Sentinel-2; vegetation indices; community forest;

mixed deciduous and dry dipterocarp forest

*Corresponding author. E-mail: piyapit@gmail.com; piyapit@mju.ac.th

Introduction

จากยุทธศาสตร์ระยะยาวในการพัฒนาแบบปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำของประเทศ (Thailand's Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy: LT-LEDS) ซึ่งเป็นกรอบเป้าหมายและแนวทางการดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศในระยะยาว เพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ในปี ค.ศ. 2065 (Net Zero Greenhouse Gas Emission) เพื่อยกระดับการดำเนินงานของประเทศในการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศร่วมกับประชาคมโลก สอดคล้องกับเป้าหมายภายใต้ความตกลงปารีส (Paris Agreement) ในการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกไม่ให้เกิน 1.5 องศาเซลเซียส (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2022) ทรัพยากรป่าไม้จึงมีบทบาทต่อการรักษาสมดุลของระบบนิเวศและการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะบทบาทการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากบรรยากาศ ซึ่งต้นไม้และพืชสามารถดูดซับ CO_2 จากบรรยากาศผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จากนั้น CO_2 จะถูกแยกเป็นออกซิเจน (O_2) ปล่อยกลับสู่ชั้นบรรยากาศและคาร์บอนสะสมอยู่ในโครงสร้างของพืช (Vickers *et al.*, 2012) ส่งผลให้ป่าไม้สามารถกักเก็บคาร์บอนในปริมาณมาก ทั้งในส่วนของลำต้น กิ่ง ราก และใบ ป่าไม้จึงทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนตามธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ แต่ปริมาณและความสามารถของต้นไม้มีความ

แตกต่างกันไปตามชนิดพรรณไม้ อายุ ความหนาแน่นของต้นไม้ รวมถึงโครงสร้างและลักษณะสังคมพืชแต่ละพื้นที่ป่า ส่งผลให้ศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศป่าไม้ในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน (Sengbuntan *et al.*, 2023)

จากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลภาคสนามร่วมกับข้อมูล Sentinel-2 มีหลายช่วงคลื่นและมีความละเอียดเชิงพื้นที่ตั้งแต่ 10-20 เมตร เหมาะสมต่อการศึกษาดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index) โดยเฉพาะข้อมูลในช่วงคลื่นที่สายตามนุษย์มองเห็น (Visible) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared: NIR) มาใช้ในการคาดการณ์มวลชีวภาพเหนือพื้นดินช่วยให้สามารถประเมินได้อย่างรวดเร็ว ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ และมีความเหมาะสมกับพื้นที่ป่าที่เข้าถึงได้ยาก (Jaroonudomsombut, 2018) นอกจากนี้ Khunrattanasiri *et al.* (2024) ยังกล่าวว่า Sentinel-2 มีศักยภาพในการประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินได้ดี และค่าที่ประมาณได้ไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณภาคสนามอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนประสิทธิภาพของดัชนีพืชพรรณที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างป่าและบริบทเชิงนิเวศของพื้นที่ศึกษาเป็นสำคัญ (Imran *et al.*, 2020)

ในปัจจุบันป่าชุมชนได้เข้ามามีบทบาทสำคัญทั้งในเชิงนิเวศ เศรษฐกิจ และสังคม โดยมีรูปแบบการจัดการป่าไม้ที่ให้ชุมชนเป็นผู้ที่มีสิทธิในการตัดสินใจเป็นหลัก หรือเรียกว่าการจัดการป่าอย่างมีส่วนร่วม การจัดการป่าแบบร่วมกันโดยชุมชนเป็นฐานเป้าหมายของการจัดการป่าชุมชนเพื่อการรักษาป่าให้สมบูรณ์ควบคู่ไปกับการตอบสนองของความต้องการในการดำรงชีพของคนในท้องถิ่น เป้าหมายของป่าชุมชนนั้นมีได้หลายประการ เช่น การอนุรักษ์ การใช้ประโยชน์ระดับครัวเรือนหรือการผลิตในระดับพาณิชย์ (RECOFTC, 2026) และป่าชุมชนยังทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่ช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ มีส่วนสำคัญต่อการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Ruangsanka, 2023) ป่าชุมชนบ้านวังสำราญ จังหวัดลำปาง ตั้งอยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่พริก หมู่ที่ 6 ตำบลแม่พริก อำเภอแม่พริก จังหวัดลำปาง แบ่งเป็นพื้นที่เพื่อการอนุรักษ์ 176.32 เฮกตาร์ และพื้นที่เพื่อการใช้ประโยชน์ 115.36 เฮกตาร์ (Royal Forest Department, 2017) จึงเป็นพื้นที่ศึกษาที่เหมาะสมในการประเมินศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณ รวมทั้งใช้เป็นต้นแบบการจัดการทรัพยากรป่าไม้โดยชุมชน การนำเทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) เข้ามามีบทบาทสำคัญเนื่องจากข้อมูลดาวเทียมมีรายละเอียดภาพที่เหมาะสมและช่วงคลื่นที่ตอบสนองต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของพืชได้ดี

งานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำข้อมูลการสำรวจแจ้งนับทรัพยากรป่าไม้ร่วมกับข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel-2 มาใช้ร่วมกับดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Indices) โดยผู้วิจัยคัดเลือกและจัดกลุ่มดัชนีพืชพรรณตามความหมายเชิงชีวภาพภาพ 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มดัชนีที่สะท้อนความเขียวและความสมบูรณ์ของพืชพรรณ กลุ่มดัชนีที่ช่วยลดอิทธิพลของดินและพื้นหลัง กลุ่มดัชนีที่สะท้อนความชื้นของพืชพรรณ กลุ่มดัชนีที่เกี่ยวข้องกับช่วงคลื่น red-edge และคลอโรฟิลล์ และกลุ่มดัชนีที่สะท้อนโครงสร้างเรือนยอดและอัตราส่วนการสะท้อนแสงของพืชพรรณ เพื่อสร้างแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนผ่านวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis) โดยใช้วิธี Stepwise Method เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลภาคสนามมากที่สุด ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะสามารถพัฒนาแบบจำลองที่มีความแม่นยำเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชุมชนบ้านวังสำราญ ซึ่งจะเป็นฐานข้อมูลสำคัญในการบริหารจัดการทรัพยากรป่าไม้อย่างยั่งยืน และสนับสนุนแนวทางการสร้างรายได้จากคาร์บอนเครดิตในระดับชุมชนต่อไป

Methodology

1. การคัดเลือกพื้นที่และการรวบรวมข้อมูลภาคสนาม

กำหนดพื้นที่วางแปลงตัวอย่างในบริเวณพื้นที่ป่าชุมชนเพื่อการอนุรักษ์ 176.32 เฮกตาร์ คัดเลือกแปลงตัวอย่างโดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified sampling) จำแนกแปลงตัวอย่างตามสภาพที่ปรากฏที่มีชั้นภูมิเดียวกัน มีลักษณะความคล้ายคลึงกันมากที่สุด และพื้นที่ระหว่างชั้นภูมิมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น ประเภทของป่าไม้ องค์ประกอบของชนิดพืชพรรณ ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล ความลาดชัน ความอุดมสมบูรณ์ ชั้นอายุพืชพรรณ เป็นต้น โดยอ้างอิงฐานข้อมูลแบบจำลองมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของพื้นที่ป่าชุมชนบ้านวังสำราญ (Royal Forest Department, 2022) จำแนกพื้นที่ออกเป็น 3 ชั้นภูมิ ตามช่วงค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ดังนี้ 40.94-57.88, 57.89-77.63 และ 77.64-94.81 ตันต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ เพื่อให้กำหนดแปลงตัวอย่างครอบคลุมความแตกต่างของโครงสร้างป่าในพื้นที่ศึกษา กระจายตามชั้นภูมิที่กำหนด จำนวน 17 แปลง (Figure 1) ขนาดพื้นที่ 40 × 40 เมตร หรือ 0.16 เฮกตาร์ต่อแปลง และในแต่ละแปลงแบ่งเป็นแปลงย่อยขนาด 10 × 10 เมตร เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลไม้ต้นอย่างเป็นระบบ ด้วยการสำรวจไม้ต้น (Tree) ทุกต้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (Diameter at breast height: DBH) มากกว่าหรือเท่ากับ 4.50 เซนติเมตร และมีความสูงมากกว่า 1.30 เมตร บันทึกข้อมูล ได้แก่ ชนิดไม้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความสูงของต้นไม้ ตามแนวทางการประเมินมวลชีวภาพและคาร์บอนเหนือพื้นดินขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (Thailand Greenhouse Gas Management Organization, 2015)

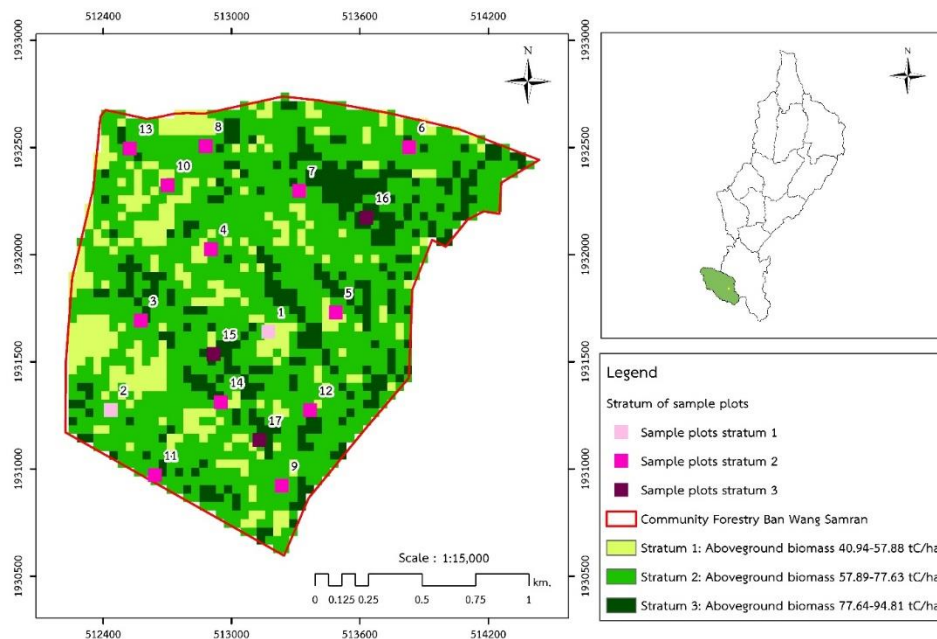


Figure 1 Sample plots in Ban Wang Samran Community Forest, Lampang Province.

2. การจัดเตรียมข้อมูลภาพดาวเทียม

2.1 ข้อมูลภาพดาวเทียม

ข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 โดยเป็นดาวเทียมสำรวจภายใต้โครงการ Copernicus ของสหภาพยุโรป พัฒนาและดำเนินการโดยองค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency: ESA) ข้อมูลที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ระดับ L2A จากระบบบันทึกภาพ Multispectral Instrument (MSI) ซึ่งผ่านการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงรังสีและเชิงเรขาคณิตแล้ว การศึกษานี้เลือกใช้แบนด์ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 10 เมตร และ 20 เมตร ได้แก่ Blue, Green, Red, NIR, Red Edge และ SWIR1 บันทึกข้อมูลเมื่อวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2568 เพื่อให้สอดคล้องกับช่วงเวลาการเก็บข้อมูลภาคสนามและข้อมูลภาพมีการปกคลุมของเมฆน้อยที่สุด แต่อาจมีข้อจำกัดของข้อมูลเนื่องจากเป็นช่วงปลายฤดูแล้ง อาจทำให้ค่าดัชนีต่ำและไม่สะท้อนถึงชีวมวลที่แท้จริงทั้งหมดของพื้นที่ศึกษา

โดยในขั้นตอนการเตรียมข้อมูลแบนด์ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 20 เมตร ได้ถูกปรับค่าความละเอียดเชิงพื้นที่ให้เป็น 10 เมตร จากโปรแกรมภูมิสารสนเทศด้วยกระบวนการ Resampling เพื่อให้ทุกแบนด์มีขนาดพิกเซล และระบบกริดเดียวกันก่อนนำไปคำนวณดัชนีพืชพรรณและดัชนีเชิงสเปกตรัม ตลอดจนการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ (Wu *et al.*, 2023) ทั้งนี้กระบวนการ Resampling ดังกล่าวเป็นการประมาณค่าพิกเซลใหม่เพื่อให้ข้อมูลมีความสอดคล้องกันเชิงพื้นที่ ไม่ได้เป็นการเพิ่มรายละเอียดเชิงพื้นที่ที่แท้จริงของข้อมูลต้นฉบับ ดังนั้นค่าดัชนีที่คำนวณจากแบนด์ซึ่งผ่านการ Resampling อาจได้รับอิทธิพลจากวิธีการประมาณค่าและอาจส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์หรือแบบจำลองถดถอยที่ใช้ในการประมาณค่ามวลชีวภาพและคาร์บอนเหนือพื้นดิน

2.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณจากภาพดาวเทียม

การศึกษานี้ นำข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 มาวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ จำนวน 12 ดัชนี โดยคัดเลือกและจัดกลุ่มดัชนีพืชพรรณตามความหมายเชิงชีวภาพได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มดัชนีที่สะท้อนความเขียวและความสมบูรณ์ของพืชพรรณ เช่น NDVI, GNDVI และ EVI2 สัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์และความหนาแน่นของเรือนยอด 2) กลุ่มดัชนีที่ช่วยวัดอิทธิพลของดินและพื้นหลัง เช่น SAVI และ MSAVI เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีเรือนยอดไม่ปิดทึบหรือมีพืชพรรณกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ 3) กลุ่มดัชนีที่สะท้อนความชื้นของพืชพรรณ เช่น NDMI สัมพันธ์กับปริมาณน้ำในเรือนยอดและสภาพความสมบูรณ์ของพืชพรรณ 4) กลุ่มดัชนีที่เกี่ยวข้องกับช่วงคลื่น red-edge และคลอโรฟิลล์ เช่น NDRE และ SR-RE มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์และสภาพเรือนยอด และ 5) กลุ่มดัชนีที่สะท้อนโครงสร้างเรือนยอดและอัตราส่วนการสะท้อนแสงของพืชพรรณ เช่น VARI, SR, MTVI2 และ RTVIcore เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นและโครงสร้างของพืชพรรณ

โดยค่าดัชนีพืชพรรณจากภาพดาวเทียมดังกล่าวใช้เป็นตัวแปรอิสระในการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของพื้นที่ศึกษา เนื่องจากดัชนีพืชพรรณแต่ละชนิดสามารถสะท้อนคุณลักษณะของพืชพรรณที่แตกต่างกัน ทั้งด้านความเขียวของเรือนยอด ปริมาณคลอโรฟิลล์ ความชื้นของพืชพรรณ อิทธิพลของพื้นดิน และโครงสร้างเรือนยอด ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความแปรปรวนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ผู้วิจัยจึงคัดเลือกสมการของดัชนีพืชพรรณที่ใช้ในการศึกษานี้ดัง Table 1

Table 1 The various vegetation indices Sentinel-2 used in this study

No.	Index	Formula	References
1	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Zhou <i>et al.</i> (2026)
2	Enhanced Vegetation Index 2	$EVI2 = 2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 2.4 \times Red + 1}$	Zhou <i>et al.</i> (2026)
3	Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Nitu <i>et al.</i> (2025)
4	Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = 1.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 0.5}$	Zhou <i>et al.</i> (2026)
5	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = \frac{2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - Red)}}{2}$	Zhou <i>et al.</i> (2026)
6	Normalized Difference Moisture Index	$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	Zhou <i>et al.</i> (2026)
7	Normalized Difference Red Edge Index	$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge}$	Sharifi&Felegari (2023)
8	Red Edge Simple Ratio	$SR-RE = \frac{NIR}{RedEdge}$	Saini (2023)
9	Visible Atmospherically Resistant Index	$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red - Blue}$	Zhou <i>et al.</i> (2026)
10	Simple Ratio	$SR = \frac{NIR}{Red}$	Xing <i>et al.</i> (2020)
11	Modified Triangular Vegetation Index 2	$MTVI2 = \frac{(1.5 \times (1.2 \times (R800 - R550) - 2.5 \times (R670 - R550)))}{\sqrt{(2 \times R800 + 1)^2 - (6 \times R800 - 5 \times \sqrt{R670}) - 0.5}}$	Xing <i>et al.</i> (2020)
12	Red-Edge Triangulated Vegetation Index	$RTVcore = 100 \times (NIR - Red-edge) - 10 \times (NIR - Green)$	Saini (2023)

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 วิเคราะห์ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

วิเคราะห์ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของไม้ต้นรายต้นที่มี DBH ตั้งแต่ 4.50 เซนติเมตรขึ้นไป และความสูงมากกว่า 1.30 เมตร จากการวางแปลงตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 40×40 เมตร ขนาด 1,600 ตารางเมตร หรือ 0.16 เฮกตาร์ แบ่งเป็นแปลงย่อยขนาด 10×10 เมตร จำนวน 17 แปลง นำมาคำนวณด้วยสมการแอลโลเมตรีสังคมป่าเบญจพรรณ และป่าเต็งรัง ของ Ogawa *et al.* (1965) ดังนี้

$$W_s = 0.0396 (DBH^2 H)^{0.9326}$$

$$W_b = 0.003487 (DBH^2 H)^{1.0270}$$

$$W_l = (28.0 / (W_s + W_b) + 0.025)^{-1}$$

$$AGB = W_s + W_b + W_l$$

- เมื่อ W_s = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนของลำต้น (กิโลกรัม)
 W_b = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนของกิ่ง (กิโลกรัม)
 W_l = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินในส่วนของใบ (กิโลกรัม)
 H = ความสูงของต้นไม้ถึงปลายยอด (เมตร)
 AGB = มวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมด (กิโลกรัม)
 DBH = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (เซนติเมตร)

3.2 วิเคราะห์ประเมินปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน คำนวณจากค่าปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินได้จากการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อ 3.1 นำไปคูณด้วยค่าคงที่ของคาร์บอนเท่ากับ 0.47 (Thailand Greenhouse Gas Management Organization, 2016)

3.3 การพัฒนาแบบจำลองการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมวลชีวภาพหรือการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ซึ่งกำหนดเป็นตัวแปรตามกับค่าดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 กำหนดเป็นตัวแปรต้น โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณแบบขั้นตอน (Stepwise Multiple Linear Regression) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จากนั้นคัดเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of Determination: R^2) ร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Squared Error: MSE และรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Squared Error: RMSE) นำข้อมูลแปลงตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องมาประมาณค่ามวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินด้วยสมการที่คัดเลือกได้ แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนและทดสอบความแตกต่างด้วยสถิติ Paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากนั้นนำสมการที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพ การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน และปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดของพื้นที่ป่าชุมชนบ้านวังสำราญ (Khunrattanasiri *et al.*, 2024)

โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมข้อมูลภาคสนามและข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 การตรวจสอบความสอดคล้องเชิงตำแหน่ง การคำนวณดัชนีพืชพรรณ การพัฒนาและประเมินแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อนำไปสู่การประมาณค่ามวลชีวภาพและคาร์บอนเหนือพื้นดินในพื้นที่ศึกษา ดังแสดงใน Figure 2

Results

1. โครงสร้างป่าและปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณ

ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างป่าของชุมชนบ้านวังสำราญ มีลักษณะเป็นป่าเต็งรังผสมเบญจพรรณที่มีองค์ประกอบของไม้หลายช่วงวัย สำหรับไม้ต้นมีพื้นที่หน้าตัดรวม 7.71 ตารางเมตรต่อเฮกตาร์ และมีความหนาแน่น 158.38 ต้นต่อเฮกตาร์

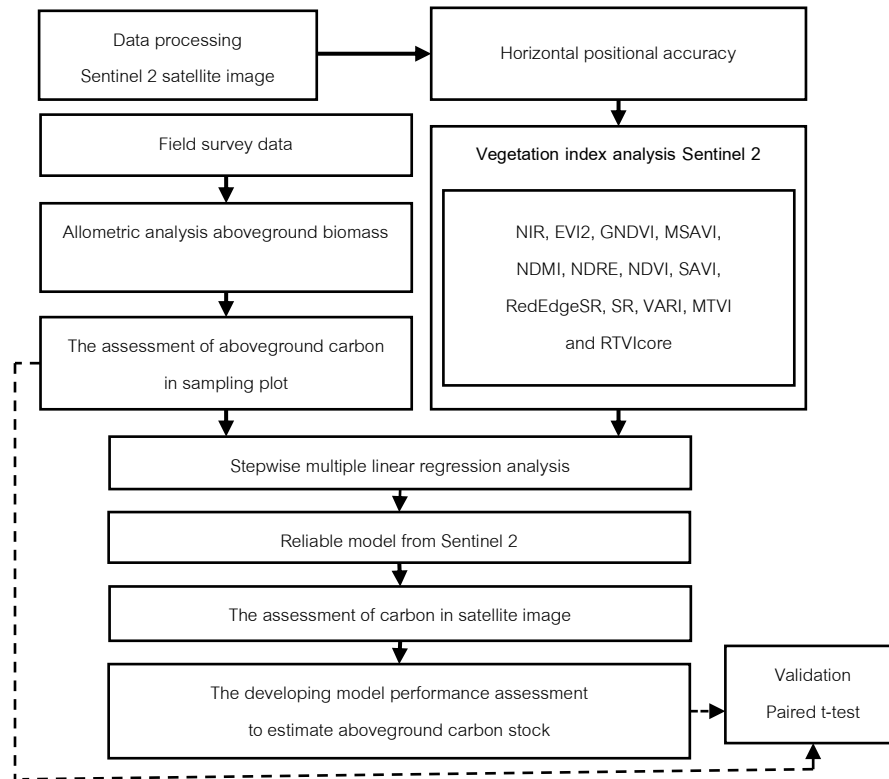


Figure 2 Flowchart of the study

ขณะที่ไม้หนุ่มและกล้าไม้มีความหนาแน่น 138.60 และ 22.47 ต้นต่อเฮกตาร์ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวเมื่อพิจารณาร่วมกับการกระจายของไม้ตามชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกแบบ L-shape แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ศึกษายังมีไม้รุ่นและไม้ขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งสามารถเจริญทดแทนเป็นไม้ขนาดใหญ่ได้ในอนาคต และแสดงถึงศักยภาพของการฟื้นตัวตามธรรมชาติของสังคมพืช แต่โครงสร้างเรือนยอดของพื้นที่ศึกษายังไม่พบว่าเรือนยอดชั้นบนที่มีความสูงประมาณ 20-30 เมตรอย่างชัดเจน โดยเรือนยอดส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในชั้นเรือนยอดรอง ความสูงประมาณ 7-20 เมตร และชั้นเรือนยอดล่างหรือไม้พุ่มและไม้ขนาดเล็ก ความสูงประมาณ 1-7 เมตร ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างป่ายังมีความเรียบง่ายเมื่อเทียบกับป่าที่มีเรือนยอดหลายชั้นสมบูรณ์ โดยไม้ต้นในพื้นที่ป่าชุมชนบ้านวังสำราญมีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวมเท่ากับ 71.62 ต้นต่อเฮกตาร์ โดยส่วนของต้นไม้ที่มีมวลชีวภาพเฉลี่ยมากที่สุด คือ ส่วนของลำต้น 58.03 ต้นต่อเฮกตาร์ รองลงมาคือ ส่วนของกิ่งและส่วนของใบ ซึ่งคิดเป็น 11.52 และ 2.08 ต้นต่อเฮกตาร์ตามลำดับ (Table 2) แสดงให้เห็นว่าลำต้นเป็นส่วนหลักที่สะสมชีวมวลเหนือพื้นดินได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับธรรมชาติของไม้ยืนต้นที่ส่วนของลำต้นมีเนื้อไม้หนาแน่นและมีอายุยืนยาว สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chave *et al.* (2005) และ Slik *et al.* (2013) พบว่า ลำต้นมีการสะสมมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในป่าฝนและป่าผลัดใบเขตร้อนถึงร้อยละ 70-85 และชนิดไม้ที่มีการสะสมคาร์บอนสูงสุดในพื้นที่ คือ ตะแบกเปลือกบาง มะนูน มะกอกเกลื้อน จั้ว กระบก รัก ยอป่า ขมิ้นต้น เหียง และตีนนก ตามลำดับ

Table 2 Aboveground biomass and carbon stock of sample plots from Sentinel-2 satellite data at Ban Wang Samran Community Forest, Lampang Province

Plot No.	Aboveground biomass (t ha ⁻¹)					Carbon stock (tC ha ⁻¹)				
	Field data				Sentinel-2	Field data				Sentinel-2
	Stem (W _s)	Branch (W _b)	Leaf (W _l)	Total (W _t)		Stem (C _s)	Branch (C _b)	Leaf (C _l)	Total (C _t)	
1	55.56	11.02	2.00	68.57	51.47	26.11	5.18	0.94	32.23	24.19
2	44.14	8.48	1.66	54.27	51.72	20.74	3.98	0.78	25.51	24.31
3	58.00	11.24	2.12	71.37	77.46	27.26	5.28	1.00	33.54	36.41
4	42.61	8.30	1.53	52.43	52.88	20.02	3.90	0.72	24.64	24.85
5	59.51	11.93	2.15	73.59	80.03	27.97	5.61	1.01	34.59	37.61
6	55.48	11.26	1.92	68.65	62.88	26.07	5.29	0.90	32.27	29.55
7	57.62	11.08	2.16	70.86	69.76	27.08	5.21	1.02	33.30	32.79
8	56.70	11.02	2.12	69.83	60.06	26.65	5.18	0.99	32.82	28.23
9	112.24	25.08	3.20	140.52	113.13	52.75	11.79	1.50	66.04	53.17
10	58.55	11.37	2.17	72.09	66.73	27.52	5.34	1.02	33.88	31.36
11	55.45	10.84	2.02	68.32	76.01	26.06	5.10	0.95	32.11	35.73
12	56.69	10.90	2.14	69.72	84.08	26.64	5.12	1.00	32.77	39.52
13	45.39	8.62	1.72	55.72	55.63	21.33	4.05	0.81	26.19	26.14
14	47.44	9.16	1.76	58.37	69.71	22.30	4.31	0.83	27.43	32.76
15	52.60	10.29	1.95	64.83	86.05	24.72	4.83	0.91	30.47	40.44
16	56.61	11.07	2.09	69.78	76.1	26.61	5.20	0.98	32.79	35.77
17	71.86	14.14	2.61	88.61	83.82	33.78	6.64	1.23	41.65	39.39
Mean	58.03	11.52	2.08	71.62	71.62	27.27	5.41	0.98	33.66	33.66
SD	15.59	3.77	0.38	19.72	15.87	7.33	1.77	0.18	9.27	7.46
Variance	243.10	14.24	0.15	388.97	251.84	53.71	3.15	0.03	85.91	55.64

2. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่าการสะท้อนแสงของแบนด์ที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณและดัชนีพืชพรรณ จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับแบนด์ที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณ และดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 พบว่า ตัวแปรที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดคือ VARI โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.28 และมีสมการเท่ากับ $y = 0.0009x + 0.0109$ แสดงว่า VARI สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินได้ร้อยละ 27.84 รองลงมา ได้แก่ NDMI มีค่า $R^2 = 0.12$ และสมการ $y = 0.0006x + 0.0201$, MTVI2 มีค่า $R^2 = 0.12$ และสมการ $y = 0.0006x + 0.5211$ และ R มีค่า $R^2 = 0.12$ และสมการ $y = -1.4292x + 1,759.7296$ ตามลำดับ

ในขณะที่ตัวแปรบางตัวมีความสัมพันธ์กับค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินค่อนข้างต่ำมาก เช่น SR-RE, NDRE และ RTVlcore มีค่า R^2 เท่ากับ 0.00 ทั้ง 3 ตัวแปร แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้มีความสามารถต่ำมากหรือไม่มีความสัมพันธ์ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ช่วงคลื่น B, G และ NIR ก็ให้ค่าความสัมพันธ์ค่อนข้างต่ำเช่นกัน โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.05, 0.02 และ 0.06 ตามลำดับ (Table 3) โดยสมการจากข้อมูล Sentinel-2 ส่วนใหญ่มีค่า R^2 อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง โดยค่าที่สูงที่สุดไม่เกิน 0.30 เนื่องจากข้อมูลภาพถ่ายเทียม Sentinel-2 สามารถใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพได้ในระดับหนึ่งและดัชนี Red-edge ให้ผลดีกว่าดัชนีแบบดั้งเดิมอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าแบนด์และดัชนีพืชพรรณจากข้อมูล Sentinel-2 เพียงอย่างเดียวอาจยังไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าคาร์บอนเหนือพื้นดินได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการสะท้อนแสงของพืชพรรณเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ขนาดความโตของต้นไม้ ความหนาแน่นของต้นไม้ โครงสร้างเรือนยอด และลักษณะเฉพาะของพื้นที่ป่า ดังนั้นหากพิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมจากค่า R^2 สูงสุดดัชนี VARI จึงเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้ประมาณค่าคาร์บอนเหนือพื้นดินจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ในการวิจัยนี้

Table 3 Mathematical forms of linear regression equations and coefficient of determination (R^2) values for various indices derived from Sentinel-2

Index	Equation	R^2
B	$y = -0.3723x + 1,525.6860$	0.05
G	$y = 0.2335x + 1,778.5567$	0.02
R	$y = -1.4292x + 1,759.7296$	0.12
NIR	$y = -1.1776x + 4,170.9162$	0.06
EVI2	$y = 0.0005x + 0.7190$	0.03
GNDVI	$y = -0.0002x + 0.4020$	0.06
MSAVI	$y = 0.0002x + 0.5760$	0.04
NDMI	$y = 0.0006x + 0.0201$	0.12
NDRE	$y = 0.0000x + 0.2527$	0.00
NDVI	$y = 0.0002x + 0.4060$	0.03
SR-RE	$y = 0.0000x + 1.6807$	0.00
SAVI	$y = 0.0004x + 0.6089$	0.03
SR	$y = 0.0013x + 2.3878$	0.03
VARI	$y = 0.0009x + 0.0109$	0.28
MTVI2	$y = 0.0006x + 0.5211$	0.12
RTVlcore	$y = -24.7115x + 144,506.8862$	0.00

Remark: y = aboveground biomass ($t\ ha^{-1}$); x = vegetation-related spectral bands and vegetation indices.

3. การพัฒนาแบบจำลองการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณ

ผลการพัฒนาแบบจำลองการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยดาวเทียม Sentinel-2 ใช้วิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยสกัดค่าข้อมูลของตัวแปรตามในพื้นที่ที่ตรงกับแปลงตัวอย่าง กำหนดให้ตัวแปรต้น ได้แก่ ข้อมูลภาพดาวเทียมแบนด์ Blue (B), Green (G), Red (R) และ NIR และข้อมูลดัชนีพืชพรรณ จำนวน 12 ดัชนี ได้แก่ EVI2, GNDVI, MSAVI, NDMI, NDRE, NDVI, SAVI, SR-RE, SR, VARI, MTVI2 และ RTVcore ส่วนตัวแปรตาม ได้แก่ ข้อมูลมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของแปลงตัวอย่างทั้ง 17 แปลง ผลการศึกษาพบว่า ดัชนีที่เหมาะสมที่ควรนำมาพัฒนาเป็นสมการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณ คือ ดัชนี VARI และ SR แม้ว่าผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบตัวแปรเดียวพบว่า SR มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรดัชนีพืชพรรณบางชนิด แต่เมื่อนำเข้าสู่การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณร่วมกับ VARI พบว่า SR สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินได้ดีขึ้น เนื่องจากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณไม่ได้พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวกับตัวแปรตามเพียงลำพัง แต่พิจารณาบทบาทร่วมกันของตัวแปรอิสระในการลดค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ส่งผลให้ดัชนี SR จึงถูกคัดเลือกเข้าสู่แบบจำลองสุดท้าย เนื่องจากดัชนี SR มีข้อมูลเชิงสเปกตรัมบางส่วนที่มีผลต่อการอธิบายค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินร่วมกับ VARI โดยเฉพาะในด้านความแตกต่างของการสะท้อนแสงระหว่างช่วงคลื่นสีแดงและช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นและโครงสร้างของพืชพรรณ แม้ความสัมพันธ์เชิงเดี่ยวของ SR จะไม่สูงมากก็ตาม ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ตัวแปร VARI และ SR จึงให้ประสิทธิภาพโดยรวมเหมาะสมที่สุดในการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน มีรูปแบบสมการดังนี้ $AGB = 409.313 + 996.771 (VARI) - 165.375 (SR)$ แสดงค่า $R^2 = 0.64$ (Figure 3)

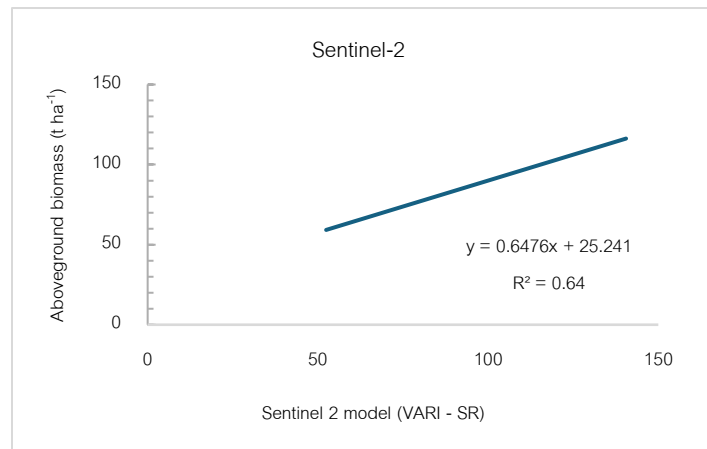


Figure 3 Relationship of data between the Aboveground biomass and VIs values based on the Sentinel-2 satellite image data

ผลการเปรียบเทียบปริมาณมวลชีวภาพและปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินของแปลงตัวอย่างทั้ง 17 แปลง ระหว่างข้อมูลภาคสนามและข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 (Table 2) พบว่า ค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากันที่ 71.62 ตันต่อเฮกตาร์ ขณะที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาคสนาม 19.72 ตันต่อเฮกตาร์ ขณะที่ข้อมูลจาก

Sentinel-2 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 15.87 ตันต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลภาคสนามมีความแปรผันเชิงพื้นที่สูงกว่า เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างป่าในแต่ละแปลงอย่างชัดเจน ส่วนปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินพบว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธีการมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน 33.66 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ โดยข้อมูลภาคสนามมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่าข้อมูล Sentinel-2 มีค่าเท่ากับ 9.27 และ 7.46 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ เนื่องจากการประมาณจากดาวเทียมมีแนวโน้มลดความผันผวนของค่าที่เกิดจากความแตกต่างเชิงโครงสร้างของป่าเมื่อเทียบกับการวัดภาคสนาม ผลการทดสอบ Paired t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินระหว่างข้อมูลภาคสนามกับข้อมูลจาก Sentinel-2 พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 0.00$, $p = 1.00$) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างข้อมูลภาคสนามและข้อมูล Sentinel-2 มีค่าเท่ากับ 0.80 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูง และเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ได้แก่ MSE เท่ากับ 28.51 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์² และ RMSE เท่ากับ 5.34 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ แสดงให้เห็นว่า Sentinel-2 มีศักยภาพในการประมาณค่าคาร์บอนเหนือพื้นดินในระดับแปลงตัวอย่างได้ค่อนข้างดี (Table 4)

เมื่อพิจารณารายแปลงตัวอย่างพบว่า แปลงตัวอย่างที่ 9 มีค่ามวลชีวภาพและคาร์บอนสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 140.52 ตันต่อเฮกตาร์ และ 66.04 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ เนื่องจากแปลงดังกล่าวประกอบด้วยต้นไม้ขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นของเรือนยอดสูง ทำให้ค่ามวลชีวภาพจริงมีระดับสูงมาก อย่างไรก็ตามข้อมูลจากดาวเทียมมีแนวโน้มประเมินค่าต่ำกว่าการวัดภาคสนามในแปลงที่มีมวลชีวภาพสูง ซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดของข้อมูลเชิงสเปกตรัมในช่วงที่เกิดการอิ่มตัวของสัญญาณ (Spectral Saturation) เมื่อค่าการสะท้อนแสงของพืชพรรณถึงระดับหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพจะไม่ทำให้ค่าการสะท้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้แบบจำลองประเมินค่ามวลชีวภาพต่ำกว่าความเป็นจริง (Lu, 2006; Saatchi et al., 2011) แต่ส่วนใหญ่ค่าคาร์บอนจากดาวเทียม Sentinel-2 มีความใกล้เคียงกับข้อมูลภาคสนามสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่แสดงให้เห็นว่า Sentinel-2 ให้ความแม่นยำในการประมาณค่าระดับแปลงได้ดี

โดยการกระจายเชิงพื้นที่ของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและคาร์บอนเหนือพื้นดินจากข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 ประมาณค่าในระดับพิกเซล คำนวณได้จากค่าดัชนีพืชพรรณ VARI และ SR ของแต่ละพิกเซล แล้วนำไปแทนค่าในสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่พัฒนาจากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลภาคสนามกับข้อมูลดาวเทียม เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน จากนั้นแปลงเป็นค่าคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้ค่าสัดส่วนคาร์บอน 0.47 ตามสมการ $C = AGB \times 0.47$ โดยที่ C คือปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดิน และ AGB คือมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ดังนั้นแผนที่คาร์บอนเหนือพื้นดินใน Figure 4 จึงเป็นผลลัพธ์จากการแปลงค่ามวลชีวภาพที่ประมาณได้ในระดับพิกเซลเป็นค่าคาร์บอนเหนือพื้นดิน

Discussion

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับค่าการสะท้อนแสงของแบนด์ที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณและดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลการรับรู้ระยะไกลสามารถใช้สนับสนุนการประมาณค่ามวลชีวภาพและคาร์บอนเหนือพื้นดินได้ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับข้อมูลภาคสนาม อย่างไรก็ตาม

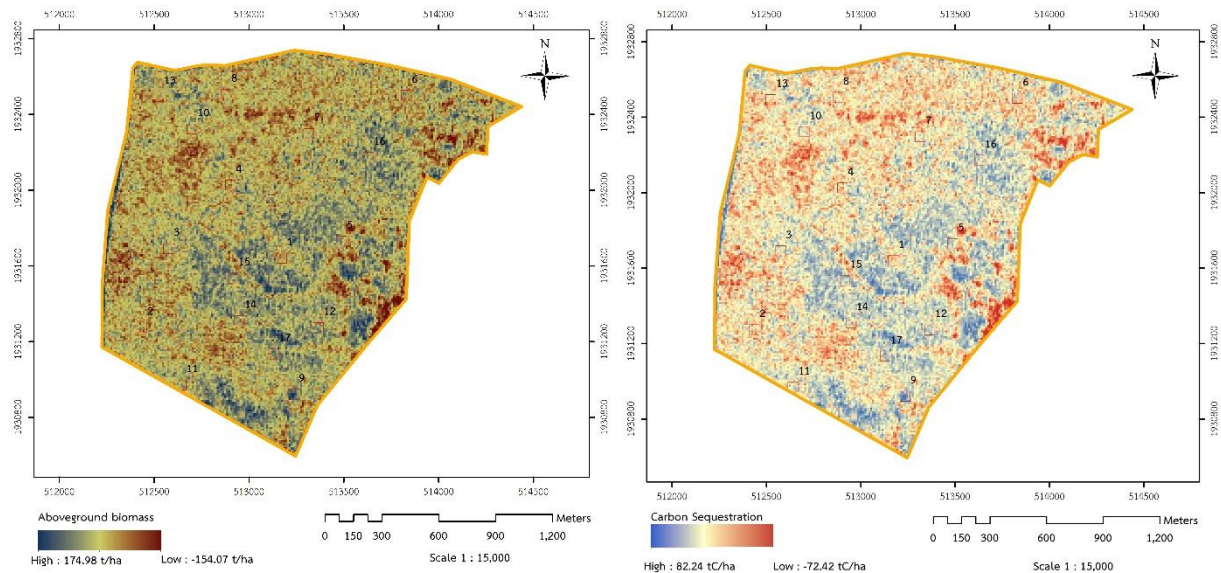


Figure 4 Estimated map of aboveground biomass and Carbon stock derived from Sentinel-2 satellite imagery in Ban Wang Samran Community Forest, Lampang Province.

Table 4 Paired t-test statistics results between Carbon stock field data and Sentinel-2 Satellite image data.

Results	Carbon stock field data	Sentinel-2 Satellite image data
Mean	33.66	33.66
Variance	85.91	55.64
Observations	17.00	17.00
Pearson Correlation	0.80	
Hypothesized Mean Difference	0.00	
df	16.00	
t Stat	0.00	
P(T<=t) one-tail	0.50	
t Critical one-tail	1.75	
P(T<=t) two-tail	1.00	
t Critical two-tail	2.12	

ประสิทธิภาพของดัชนีพืชพรรณแต่ละชนิด มีความแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างป่า สภาพพื้นที่ และช่วงเวลาของภาพถ่ายเทียมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาค้นพบว่า ดัชนี VARI มีความสัมพันธ์กับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินสูงกว่าดัชนีพืชพรรณชนิดอื่นในกลุ่มตัวแปรเดียว ขณะที่แบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่ใช้ดัชนี VARI ร่วมกับ SR ให้ผลการประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดอยู่ในระดับปานกลาง ($R^2 = 0.64$) เนื่องจากดัชนี VARI เป็นดัชนี

ที่ใช้ข้อมูลช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ ซึ่งสัมพันธ์กับความเขียวและสภาพเรือนยอดของพืชพรรณ ส่วน SR สะท้อนความแตกต่างของการสะท้อนแสงระหว่างช่วงคลื่นสีแดงและช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถและความหนาแน่นและโครงสร้างของพืชพรรณ ดังนั้นแม้ SR จะมีความสัมพันธ์เชิงเดียวไม่สูงมาก แต่เมื่อนำมาใช้ร่วมกับ VARI ในแบบจำลองถดถอยพหุคูณ พบว่าสามารถช่วยเสริมการอธิบายความแปรปรวนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินได้ดีขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ข้อมูล Sentinel-2 และดัชนีพืชพรรณในการประมาณมวลชีวภาพหรือคาร์บอนเหนือพื้นดิน ซึ่งพบว่าดัชนีที่ให้ผลดีที่สุดอาจแตกต่างกันไปตามชนิดป่าและบริบทเชิงนิเวศของพื้นที่ศึกษา เช่น งานวิจัยของ Li *et al.* (2021) อธิบายว่าดัชนีกลุ่ม Red-edge ให้ผลดีในบางสภาพป่า แต่ขณะทำงานของ Legesse *et al.* (2024) พบว่า EVI มีความเหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาบางประเภท ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าประสิทธิภาพของดัชนีพืชพรรณไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดัชนีเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างเรือนยอด ความหนาแน่นของพืชพรรณ ระดับการผลัดใบ ความชื้น และสภาพพื้นหลังของพื้นที่ศึกษาร่วมด้วย แม้ข้อมูล Sentinel-2 จะมีศักยภาพในการประเมินโครงสร้างมวลชีวภาพของป่าไม้ เนื่องจากมีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมและมีช่วงคลื่นที่ตอบสนองต่อสภาพพืชพรรณ โดยเฉพาะช่วงคลื่น Red-edge และ NIR ที่สัมพันธ์กับคลอโรฟิลล์และความหนาแน่นของเรือนยอด (Immitzer *et al.*, 2016) แต่การใช้ข้อมูลเชิงสเปกตรัมเพียงอย่างเดียวยังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากมวลชีวภาพของป่าไม้ซึ่งเป็นผลรวมของโครงสร้างของต้นไม้ ทั้งจากข้อมูลขนาดลำต้น ความสูงของต้นไม้ ความหนาแน่นของต้นไม้ และความชื้นของเรือนยอด ซึ่งไม่สามารถสะท้อนได้ครบถ้วนจากค่าการสะท้อนแสงเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ในแปลงที่มีมวลชีวภาพสูงอาจเกิดปัญหาการอิ่มตัวของสัญญาณเชิงสเปกตรัม (spectral saturation) ทำให้แบบจำลองมีแนวโน้มประเมินค่าต่ำกว่าข้อมูลภาคสนาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghosh & Behera (2018), Imran *et al.* (2020) และ Xu *et al.* (2025)

อีกทั้งจากการศึกษาครั้งนี้ค่า R^2 ที่อยู่ในระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่าป่าเต็งรังผสมป่าเบญจพรรณมีความแปรปรวนเชิงโครงสร้างค่อนข้างสูง และข้อมูลเชิงสเปกตรัมจาก Sentinel-2 เพียงช่วงเวลาเดียวอาจยังไม่เพียงพอในการอธิบายความแตกต่างของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินได้ทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาพดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ในช่วงปลายฤดูแล้ง ซึ่งเป็นช่วงที่ป่าผลัดใบอาจมีการเปลี่ยนแปลงของเรือนยอดและความเขียวของพืชพรรณ ส่งผลต่อค่าดัชนีพืชพรรณและความสัมพันธ์กับข้อมูลภาคสนามได้ นอกจากนี้การศึกษานี้ยังใช้แปลงตัวอย่างจำนวน 17 แปลง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดสำคัญสำหรับการพัฒนาแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยเฉพาะเมื่อมีตัวแปรอิสระจากดัชนีพืชพรรณจำนวนมาก จำนวนตัวอย่างที่จำกัดอาจส่งผลต่อความเสถียรของแบบจำลอง และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดการเรียนรู้เกินของแบบจำลอง (Overfitting) ดังนั้นในอนาคตจึงควรเพิ่มจำนวนแปลงตัวอย่างให้ครอบคลุมความแปรปรวนของโครงสร้างป่า การใช้ข้อมูลภาพดาวเทียมหลายช่วงเวลา และพิจารณาผสมผสานข้อมูลเชิงโครงสร้าง เช่น LiDAR (Light Detection and Ranging: LiDAR) หรือ SAR (Synthetic Aperture Radar) หรือ Machine Learning ร่วมกับข้อมูลเชิงสเปกตรัม เพื่อเพิ่มความสามารถในการอธิบายมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน โดยเฉพาะในพื้นที่ป่าธรรมชาติที่มีหลายชั้นเรือนยอด นอกจากนี้การรายงานค่าความคลาดเคลื่อน เช่น RMSE และ MSE ร่วมกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เช่น cross-validation ก็จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองและสนับสนุนการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในเชิงพื้นที่ได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น

Conclusions

ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ดัชนีพืชพรรณ VARI และ SR มีความสัมพันธ์กับปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากข้อมูลภาคสนาม แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดมีรูปสมการ คือ $AGB = 409.313 + 996.771(VARI) - 165.375(SR)$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.64 สามารถอธิบายถึงความแปรปรวนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินได้ในระดับปานกลาง พื้นที่ศึกษามีปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ย 33.66 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ และมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าเฉลี่ย 123.42 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเฮกตาร์ คิดเป็นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ารวมในพื้นที่ศึกษา ณ เวลาที่สำรวจในปี พ.ศ. 2568 เท่ากับ 21,762 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีศักยภาพในการใช้เป็นแนวทางสำหรับการประเมินมวลชีวภาพและปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดิน แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีข้อจำกัดจากจำนวนแปลงตัวอย่างที่ค่อนข้างจำกัด การใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพียงช่วงเวลาเดียว ดังนั้นการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนในระยะยาวหรือการประเมินซ้ำทุก ๆ 3-5 ปี ควรดำเนินการด้วยความระมัดระวัง และควรเพิ่มเติมการตรวจสอบข้อมูลภาคสนามจำนวนมากขึ้น รวมถึงการเพิ่มข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหลายช่วงเวลา เพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือก่อนนำไปใช้สนับสนุนการติดตามคาร์บอนหรือการพัฒนาคลังคาร์บอนเครดิตระดับป่าชุมชนอื่น ๆ ในอนาคต

Acknowledgments

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์ส่งเสริมวนศาสตร์ชุมชนที่ 9 (ลำปาง) เจ้าหน้าที่ส่วนจัดการป่าชุมชน สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 3 (ลำปาง) กรมป่าไม้ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

References

- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Ghosh, S.M., & Behera, M.D. (2018). Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*, 96, 29-40.
- Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing*, 8, 166.

- Imran, A.B., Khan, K., Ali, N., Ahmad N., Li, A.A., & Shah, K. (2020). Narrow band based and broadband derived vegetation indices using Sentinel-2 Imagery to estimate vegetation biomass. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(1), 97-108.
- Jaroonudomsombut, J. (2018). *Application of vegetation indices for aboveground biomass estimation in different forest types using landsat 8 imageries data: A case study of Khao Yai National Park*. Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Khunrattanasiri, W., Amarakul, A., Rianthakool, L., & Hutayanon, T. (2024). Comparative study of Landsat 9 and Sentinel-2 satellite data for above-ground carbon sequestration estimation at Mae Moh mine reforestation site, Lampang province, *Thailand. Agriculture and Natural Resources*, 58(2), 175-182.
- Legesse, F., Degefa, S., & Soromessa, T. (2024). Estimating carbon stock using vegetation indices and empirical data in the upper awash river basin. *Discover Environment*, 2, 137.
- Li, C., Zhou, L., & Xu, W. (2021). Estimating Aboveground Biomass Using Sentinel-2 MSI Data and Ensemble Algorithms for Grassland in the Shengjin Lake Wetland, China. *Remote Sensing*, 13, 1595.
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297-1328.
- Nitu, A., Florea, C., Ivanovici, M., & Racoviteanu, A. (2025). NDVI and Beyond: Vegetation Indices as Features for Crop Recognition and Segmentation in Hyperspectral Data⁺. *Sensors*, 25, 3817.
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2022). *Thailand long-term low greenhouse gas emission development strategy (revised version)*. Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Ministry of Natural Resources and Environment. (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. *Natural and Life in Southeast Asia*, 4, 49-80.
- RECOFTC. (2026). *Introduction to community forests: What is a community forest?*.
<https://thaicfnet.org/intro>. (in Thai)

- Ruangsaika, S. (2023). Ecosystem Services of Community Forest and Quality of Life and Environment. *Journal of Interdisciplinary Innovation Review*, 6(5), 307-320. (in Thai)
- Royal Forest Department. (2017). *Project of Ban Sam Ran Community Forest*. Forest Resource Management Office No.3 (Lampang). Royal Forest Department. (in Thai)
- Royal Forest Department. (2022). *A database developed from the aboveground biomass model for community forests*. Community Forest Management Office, Royal Forest Department. (in Thai)
- Saatchi, S.S., Harris, L.N., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermannb, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., Whiteh, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 9899-9904.
- Saini, R. (2023). Integrating Vegetation Indices and Spectral Features for Vegetation Mapping from Multispectral Satellite Imagery Using AdaBoost and Random Forest Machine Learning Classifiers. *Geomatics and Environmental Engineering*, 17(1), 57-74.
- Sengbuntan, B., Diloksumpun, P., & Diloksumpun, S. (2023). Species Diversity and Carbon Storage in Biomass of Tree and Sapling in the Ban Nong Kwang Community Forest, Uttaradit Province. *Thai Journal of Forestry*, 42(2), 155-168. (in Thai)
- Sharifi, A., & Felegari, S. (2023). Remotely sensed normalized difference red-edge index for rangeland biomass estimation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 95(7), 1128-1136.
- Slik, J.W.F., G. Paoli, K. McGuire, N. Zweifel. (2013). Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics. *Global Ecology and Biogeography*, 22,1261-1271.
- Thailand Greenhouse Gas Management Organization. (2015). *Establishment of sampling plots and data collection procedures for forest-based projects*. Thailand Greenhouse Gas Management Organization, 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)
- Vickers B., Trines, E., & Pohnan, E. (2012). *Community guidelines for accessing forestry voluntary carbon markets*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for Asia and the Pacific Bangkok, Thailand.
- Wu, J., Lin, L., Zhang, C., Li, T., Cheng, X., & Nan, F. (2023). Generating Sentinel-2 all-band 10-m data by sharpening 20/60-m bands: A hierarchical fusion network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 16-31.
- Xing, N., Huang, W., Xie, Q., Shi, Y., Ye, H., Dong, Y., Wu, M., Sun, G., & Jiao, Q. (2020). A Transformed Triangular Vegetation Index for Estimating Winter Wheat Leaf Area Index. *Remote Sensing*, 12, 16.
- Xu, W., Cheng, Y., Luo, M., Mai, X., Wang, W., Zhang, W., & Wang, Y. (2025). Progress and Limitations in Forest Carbon Stock Estimation Using Remote Sensing Technologies: A Comprehensive Review. *Forests*, 16(449), 1-36.
- Zhou, Q., Neigh, C.S.R., Ju, J., Wooten, M., Zhu, Z., Tomoaki, M., Campbell, P.K.E., Sridhar, M.K., Baker, B.W., & Leite, R.V. (2026). Global uncertainty assessment of vegetation indices from NASA's Harmonized Landsat & Sentinel-2 Project. *Remote Sensing of Environment*, 332, 115084.