การประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชนด้วยเทคนิคอากาศยานไร้คนขับ

ทินกร อังคะฮาด[1] วุฒิศาสตร์ โชคเกื้อ[1] สาธิต แสงประดิษฐ์[2,5]
ญาณวุฒิ อุทรักษ์[3,5] กิตตากร วิริยะศาสตร์[4] และ ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ[1,5*]

วันที่รับ 22 กุมภาพันธ์ 2568 วันที่แก้ไข 17 มีนาคม 2568 วันตอบรับ 21 มีนาคม 2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ในพื้นที่ป่าชุมชน ตั้งอยู่ที่ตำบลท่าสองคอน อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม โดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับร่วมกับการสำรวจภาคสนาม การดำเนินการแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ การเก็บข้อมูลภาคสนาม และการสร้างแบบจำลองเรือนยอดต้นไม้ พื้นที่ศึกษาครอบคลุม 66 ไร่ หรือ 10.66 เฮกตาร์ และใช้ Agisoft PhotoScan ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ จากการสำรวจภาคสนามในแปลงตัวอย่างขนาด 40x40 เมตร^2 จำนวน 10 แปลง ผลการดำเนินการพบว่า มีพรรณไม้ทั้งสิ้น 22 วงศ์ 39 ชนิด รวมทั้งหมด 1,241 ต้น การประเมินปริมาณการกักเก็บคาร์บอนจากโมเดลการเรียนรู้ด้วยเครื่องจากอากาศยานไร้คนขับพบว่า มีค่าเฉลี่ยประมาณ 213.53 tCO_2e, 2.022026 kg CO_2e/m^2 และ 0.002022 tCO_2e/ha ในขณะที่ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเรือนยอดต้นไม้ เฉลี่ยอยู่ที่ 212.51 tCO_2e, 2.012442 kg CO_2e/m^2 และ 0.000201 tCO_2e/ha การประเมินความแม่นยำของแบบจำลองพบว่า มีค่า Precision = 0.902, Recall = 0.638, Accuracy = 0.597, F1-Score = 0.747 และ Percent = 74.737% ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองนี้มีความสามารถในการวิเคราะห์การตรวจจับต้นไม้และความแม่นยำในการจำแนกรูปทรงพุ่มที่ถูกต้อง สอดคล้องกับการวิเคราะห์มวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชนครั้งนี้

คำสำคัญ: มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน, การกักเก็บคาร์บอน, แบบจำลองเรือนยอดต้นไม้, อากาศยานไร้คนขับ

[1] ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[2] ภาควิชาภูมิสารสนเทศ, คณะวิทยาการสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[3] ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[4] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
[5] ศูนย์วิจัยและปฏิบัติการก๊าซกระจก, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[*] ผู้แต่ง, อีเมล: teerawong@msu.ac.th

The Assessment of above Ground Biomass and Carbon Sequestration in Community Forests using UAV Technology

Thinnakon Angkahad[1] Wutthisat Chokkuea[1] Satith Sangpradid[2,5]
Yannawut Uttaruk[3,5] Kittakorn Viriyasatr[4] and Teerawong Laosuwan[1,5]

Received 22 February 2025, Revised 17 March 2025, Accepted 21 March 2025

Abstract

The objective of this research is to evaluate the biomass and carbon sequestration of trees in a community forest area located in Tha Song Khon Subdistrict, Mueang Maha Sarakham District, Maha Sarakham Province, using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology combined with field surveys. The operation was divided into three main parts: UAV surveys, field data collection, and the creation of a Canopy Model. The study area covered 66 rai or 10.66 hectares. Agisoft PhotoScan was used for processing aerial photographs. From field surveys in sample plots of 40x40 meters^2, totaling 10 plots, the results showed a total of 22 families and 39 species of trees, amounting to 1,241 trees. The most common species found included 457 trees of Dipterocarpus alatus, 224 trees of Shorea obtusa, and 56 trees of Lagerstroemia tomentosa. The evaluation of carbon sequestration using machine learning models from UAVs showed an average of approximately 213.53 tCO_2e, 2.022026 kg CO_2e/m^2, and 0.002022 tCO_2e/ha. In contrast, the averaged results from the Canopy Model analysis were 212.51 tCO_2e, 2.012442 kg CO_2e/m^2, and 0.000201 tCO_2e/ha. The accuracy assessment of the model was found at a Precision of 0.902, Recall of 0.638, Accuracy of 0.597, F1-Score of 0.747, and Percent of 74.737%, indicating that the model has the capability to analyze trees and to accurately classify canopy shapes.

Keywords: Above ground biomass, Carbon sequestration, Canopy model, UAV

[1] Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University
[2] Department of Geoinformatics, Faculty of Informatics, Mahasarakham University
[3] Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University
[4] Defence Technology Institute
[5] Greenhouse Gas Research and Operations Center, Mahasarakham University
[*] Corresponding author: teerawong@msu.ac.th

1. บทนำ

ภาวะโลกร้อน หมายถึง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งอากาศใกล้ผิวโลกและน้ำในมหาสมุทร ปรากฏการณ์นี้มีสาเหตุหลักมาจากก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำอุตสาหกรรม การเกษตร และการตัดไม้ทำลายป่า โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซที่มีการปล่อยออกมามากที่สุด ข้อมูลจากรายงานของ Revised 1996 IPCC แสดงให้เห็นว่าแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามารถแบ่งออกเป็น 6 แหล่งหลัก ได้แก่ (1) ภาคพลังงาน (2) ภาคกระบวนการอุตสาหกรรม (3) สารละลายและการใช้ผลิตภัณฑ์ (4) ภาคเกษตรกรรม (5) การใช้ที่ดินจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและป่าไม้ และ (6) ภาคการจัดการของเสีย ทั้งหมดนี้มีความสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ [1] - [4] โดยจากการประเมินของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ในปี พ.ศ. 2557 พบว่าในสามทศวรรษที่ผ่านมา พื้นผิวโลกอุ่นขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงปี ค.ศ. 1983 ถึง 2012 เป็นช่วง 30 ปี ที่อุ่นที่สุดในช่วง 1,400 ปีที่ผ่านมาในซีกโลกเหนือ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากที่สุดถึงประมาณ 67% ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการใช้พลังงานฟอสซิล อีกทั้งการตัดไม้ทำลายป่ายังทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 20% จากการสูญเสียคาร์บอนที่เก็บในรูปของเนื้อไม้ [5] - [6]

ต้นไม้มีบทบาทสำคัญในการกักเก็บและดูดซับคาร์บอนจากบรรยากาศ โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งคาร์บอนที่ถูกดูดซับจะเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพของต้นไม้ การลดจำนวนป่าไม้มีผลกระทบโดยทำให้แหล่งกักเก็บคาร์บอนลดลงและคาร์บอนถูกปลดปล่อยกลับสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ การปลดปล่อยคาร์บอนจากการลดจำนวนป่าไม้ยังส่งผลสำคัญต่อการเพิ่มปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน ดังนั้น ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณคาร์บอนที่ถูกกักเก็บในป่าไม้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศโลก [7] - [10]

โดยทั่วไป ปริมาณคาร์บอนที่สะสมในต้นไม้นั้นมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่ามวลชีวภาพ ซึ่งหมายถึงมวลรวมของทุกส่วนประกอบของต้นไม้ อันได้แก่ ลำต้น กิ่ง ใบ และราก ดังนั้น ข้อมูลทางกายวิภาคของต้นไม้ เช่น ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น และความกว้างของทรงพุ่ม เป็นต้น สามารถใช้ในการประเมินปริมาณคาร์บอนที่สะสมอยู่ในต้นไม้ได้โดยใช้สมการแอลโลเมตริก สมการนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพกับลักษณะโครงสร้างของต้นไม้ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาการสะสมคาร์บอนในระบบนิเวศป่าไม้ [11] - [15] สำหรับการศึกษาลักษณะโครงสร้างของต้นไม้ ข้อมูลสามารถเก็บได้จากการสำรวจภาคสนาม ซึ่งแม้ว่าจะให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำสูงเกี่ยวกับโครงสร้างและรูปทรงของต้นไม้ แต่กระบวนการนี้ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน และต้องใช้เวลาและเงินทุนค่อนข้างมาก [16] - [18]

ปัจจุบัน เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing Technology) ได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในด้านของภาพถ่ายจากดาวเทียม (Satellite Imagery) และภาพถ่ายทางอากาศ (Aerial Imagery) ที่มีความละเอียดสูง เทคโนโลยีเหล่านี้สามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาโครงสร้างและความหนาแน่นของพืชพรรณธรรมชาติในพื้นที่ป่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บอยู่ในพื้นที่ป่าได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้นอีกด้วย [19] - [21] อนึ่ง การใช้ข้อมูลช่วงคลื่นสีแดงเขียวน้ำเงิน (Red Green Blue หรือ RGB) จาก UAV ในการศึกษาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในป่าชุมชนเป็นวิธีการที่น่าสนใจ โดยคณะผู้วิจัยตั้งเป้าหมายในการนำข้อมูลจาก UAV มาใช้เพื่อประเมินศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ที่มีชีวภาคและโครงสร้างของพืชพรรณที่ไม่ซับซ้อนมากนัก

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาที่มีศักยภาพสูงในการกักเก็บคาร์บอนและศึกษาผลกระทบของภาวะโลกร้อน เนื่องจากอาจมีป่าไม้หรือพืชพรรณที่สามารถ

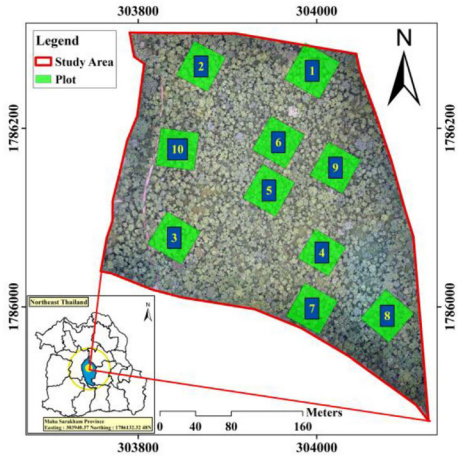
ดูดซับคาร์บอนได้ดี พื้นที่นี้อาจเป็นป่าชุมชน ซึ่งสามารถใช้เปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ถูกตัดไม้ทำลายป่าหรือมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การศึกษาในพื้นที่นี้ช่วยให้เข้าใจว่ากิจกรรมของมนุษย์ส่งผลต่อการปล่อยและกักเก็บคาร์บอนอย่างไร นอกจากนี้ พื้นที่ยังเอื้อต่อการใช้เทคโนโลยี เช่น UAV และการสำรวจระยะไกล ทำให้สามารถวัดปริมาณคาร์บอนได้อย่างแม่นยำ และใช้สมการทางวิทยาศาสตร์คำนวณมวลชีวภาพของต้นไม้ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งอาจอยู่ภายใต้โครงการอนุรักษ์หรือมีการบริหารโดยชุมชนที่ต้องการข้อมูลวิทยาศาสตร์มาสนับสนุนนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ งานวิจัยก่อนหน้ายังช่วยเป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนในพื้นที่นี้

นอกจากนี้ การศึกษานี้จะสร้างข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่มีความซับซ้อนของพืชพรรณที่สูงขึ้น และอาจช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการกักเก็บคาร์บอนในระบบนิเวศต่าง ๆ เช่น ป่าดิบชื้นและป่าผสมผลัดใบ เป็นต้น

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา ได้แก่ ป่าชุมชน ตั้งอยู่ในเขตป่าตาม พ.ร.บ.ป่าไม้ พ.ศ. 2484 ในตำบลท่าสองคอน อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม (รูปที่ 1)

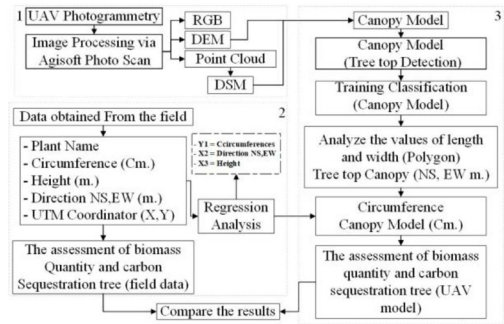


รูปที่ 1 ป่าชุมชนบ้านหินลาด และบ้านหินลาดพัฒนา

โดยป่าชุมชนแห่งนี้เป็นพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ด้วยทรัพยากรป่าไม้ เช่น ไม้แดง ไม้เต็ง ไม้รัง และพืชพันธุ์ป่าอื่น ๆ ซึ่งมีมูลค่าทางเศรษฐกิจและเป็นแหล่งอาหารของชุมชน พื้นที่ป่าแบ่งออกเป็น 2 ชุมชนหลัก ได้แก่ บ้านหินลาด 32 ไร่ และบ้านหินลาดพัฒนา 34 ไร่ รวมประมาณ 66 ไร่ หรือ 10.66 เฮกตาร์ ชุมชนใช้ประโยชน์จากป่าในการเก็บเห็ด พืชผัก สมุนไพร รวมถึงไม้ฟืน ภูมิประเทศเป็นที่ราบสูง อากาศไม่ร้อนอบอ้าวในฤดูร้อน และค่อนข้างเย็นในฤดูหนาว อุณหภูมิเฉลี่ย 27.4°C โดยรวมพื้นที่ป่าแห่งนี้มีความสำคัญทั้งทางชีวภาพและเศรษฐกิจต่อชุมชนท้องถิ่น

2.2 วิธีการดำเนินการ

สำหรับวิธีการดำเนินการแสดงได้ดังรูปที่ 2 และสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนในการดำเนินการ

จากรูปที่ 2 เป็นขั้นตอนในการดำเนินการซึ่งแสดงกระบวนการวิเคราะห์ปริมาณชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้โดยใช้ข้อมูลจาก UAV และการสำรวจภาคสนาม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

การวิจัยนี้ใช้ UAV DJI Phantom 4 PRO ซึ่งมีกล้องความละเอียด 20 ล้านพิกเซล ในการสำรวจพื้นที่ครั้งนี้ได้วางแผนแนวบินที่ความสูง 100 เมตรจากพื้นดิน (รูปที่ 3) การบินสำรวจนี้มีการตั้งค่าให้มีการซ้อนทับของภาพ (overlap) ร้อยละ 85 และการซ้อนทับด้านข้าง (side lap) ร้อยละ 70 โดยความแม่นยำของกล้องอยู่ที่ 10 เมตร มุมเอียงของกล้องมีค่าความแม่นยำ

2 องศา ใช้เส้นทางการบินแบบตาราง (Grid) สำหรับสร้างแผนที่สองมิติ นอกจากนี้ ข้อมูลที่บันทึกได้จากการสำรวจมีนามสกุลไฟล์ .JPG และขนาด 5,472 x 3,648 Pixel รวมพื้นที่ที่ทำการบันทึกทั้งสิ้น 321 ภาพ การประมวลผลภาพจาก UAV ดำเนินการด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (Point cloud) ที่แสดงตำแหน่งของพื้นที่ในพิกัด X, Y, Z ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้าง Digital Surface Model (DSM), Digital Elevation Model (DEM) และ Orthophoto ต่อไป

2. การสำรวจภาคสนาม

เป็นการเก็บข้อมูลของต้นไม้แต่ละต้นโดยตรง ซึ่งรวมถึง ชื่อพันธุ์ไม้ เส้นรอบวงของต้นไม้ (Circumference, เซนติเมตร) ความสูงของต้นไม้ (Height, เมตร) ทิศทางการวัด (North-South, East-West, เมตร) พิกัดตำแหน่งของต้นไม้ (UTM Coordinate, X, Y) ของต้นไม้ทุกต้นในแปลงตัวอย่าง รวมถึงการใช้กล้องวัดระยะในการเก็บข้อมูลความสูงของต้นไม้และไม้วางแปลงตัวอย่าง ในพื้นที่แปลงตัวอย่างมีขนาด 40x40 เมตร จำนวน 10 แปลง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10 ของพื้นที่ศึกษา โดยเลือกตำแหน่งของแปลงตัวอย่างด้วยวิธีสุ่ม (Random sampling) แต่เนื่องจากไม่สามารถทราบเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ที่ระดับอกที่อยู่นอกแปลงตัวอย่างได้ ผู้วิจัยจึงทำการสร้างพารามิเตอร์การวิเคราะห์โมเดลด้วยวิธีการวิเคราะห์ผล Regression analysis ดังสมการ (1) ผู้วิจัยใช้สมการความสัมพันธ์แบบ linear regression การศึกษานี้อ้างอิงจากสมการใน [5] ดังสมการที่ 1

$$y=\beta_1 x_1+\beta_2 x_2+\beta_3 x_3+\varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ

y คือ การประมาณการ DBH (เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก)

β คือ Coefficients ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการประมาณการ

x_1 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นไม้ตามแกนทิศเหนือ-ใต้ (NS)

x_2 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นไม้ตามแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (EW)

x_3 คือ ค่า High tree ขนาดความสูงทรงพุ่มต้นไม้ (Canopy)

ε คือ ค่าคงที่

*หมายเหตุ สูตรการคำนวณ y = (-16.292)+(6.633*x_1)+(5.915*x_2)+(2.038*x_3)

โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกใช้ในการประเมินปริมาณชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้จากข้อมูลภาคสนาม จากนั้นจะมีการใช้ regression analysis การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจาก UAV และข้อมูลสำรวจภาคสนาม

3. การสร้างแบบจำลองเรือนยอดต้นไม้ (Canopy Modeling) จากข้อมูลจาก UAV

ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดของต้นไม้ และการหาความสูงในพื้นที่ศึกษาจากข้อมูลจาก UAV การตรวจจับยอดไม้ (Tree top detection) ซึ่งสามารถหาได้โดย ค่าความแตกต่างของความสูงระหว่างข้อมูลจาก DSM และ DEM ผลการวิเคราะห์ทราบถึงความสูงของวัตถุที่อยู่บนพื้นผิวโลก จากสมการที่ 2 จากโมเดลเพื่อจำแนกข้อมูลเรือนยอด (Training classification - Canopy model) และการวิเคราะห์ค่าความยาวและความกว้างของเรือนยอด

$$CHM=DSM-DEM \quad (2)$$

เมื่อ

CHM = แบบจำลองความสูงเรือนยอด

DSM = แบบจำลองความสูงปกคลุมพื้นผิว

DEM = แบบจำลองความสูงภูมิประเทศ

วิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์ทรงพุ่มของเรือนยอดด้วยวิธีการ Classification เป็นกระบวนการที่ใช้ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ที่พบเรือนยอดของพรรณไม้ในพื้นที่ศึกษา ด้วยวิธีการจำแนก

ของเทคนิคการ Classification ที่สามารถช่วยในการระบุและประเมินทรงพุ่มของต้นไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักของทรงพุ่ม ได้แก่ 1) ทรงพุ่มของเรือนยอดที่สามารถแปลด้วยสายตาได้ เป็นทรงพุ่มที่มีลักษณะเด่นชัด สามารถระบุได้ง่ายด้วยการสังเกตด้วยสายตา 2) ทรงพุ่มของเรือนยอดที่มีความหนาแน่นน้อย เห็นช่องว่างระหว่างกิ่งก้านชัดเจน และ 3) พื้นที่ถนนหรือพื้นที่โล่ง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่มีการปกคลุมด้วยทรงพุ่มของต้นไม้ จากการสร้างตัวอย่างฝึก Training sample ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องระบุคุณลักษณะที่ชัดเจนของแต่ละประเภท เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์โมเดล โดยเฉพาะการใช้เทคนิค Train Support Vector Machine (SVM) classifier ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อน ขั้นตอนต่อมาคือการวิเคราะห์ค่าสถิติของการจำแนกประเภท โดยใช้เทคนิค SVM classifier เพื่อสร้างไฟล์ผลโมเดลของการจำแนก ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์ใช้ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ Classify raster ของ Canopy model และการวิเคราะห์รูปทรงใช้เครื่องมือ Minimum bounding geometry เพื่อสร้างรูปหลายเหลี่ยมที่แสดงถึงรูปทรงของเรขาคณิตขอบเขต ในรูปแบบของ Polygon นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาค่าความกว้างและความยาวของจุดกึ่งกลางของ Polygons ได้ ผลการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองรูปทรงพุ่มในทิศทางต่าง ๆ เช่น ทิศเหนือ-ตะวันตก (NS) และทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการศึกษารูปทรงพุ่มของเรือนยอดต้นไม้ในพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด รวมถึงข้อมูลความสูงของแต่ละ Polygons ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร และสามารถวิเคราะห์คำนวณหาค่าเส้นรอบวงของเรือนยอดต้นไม้ของ Canopy model รวมถึงประเมินปริมาณชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้จากแบบจำลอง UAV ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในพื้นที่ศึกษา

2.3 การวิเคราะห์คาร์บอนเหนือพื้นดิน

การประมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ การศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ ซึ่งสามารถแปลงเป็นปริมาณคาร์บอนที่ต้นไม้สามารถกักเก็บได้ เทคนิคการวิเคราะห์มวลชีวภาพ คือเทคนิคสมการแอลโลเมตรี (Allometry equation) ซึ่งเป็นสมการที่ช่วยในการคำนวณมวลชีวภาพของต้นไม้ โดยสมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ที่ระดับอก (Diameter at breast height หรือ DBH) และความสูงของต้นไม้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินมวลชีวภาพ ทั้งหมด 10 แปลง (ดังรูปที่ 1) รวมถึงการใช้โมเดลแบบจำลองทรงพุ่ม หรือ Canopy Elevation Model (CHM) ในการประเมินพื้นที่ป่าชุมชน เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของเรือนยอดของต้นไม้ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคำนวณการกักเก็บคาร์บอน การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้สมการของป่าเต็งรัง ซึ่งเป็นประเภทของป่าที่มีลักษณะเฉพาะ การศึกษานี้อ้างอิงจากสมการของ Ogawa ใน [22] ที่เป็นการยอมรับว่าเป็นสมการที่มีประสิทธิภาพในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและลักษณะทางกายภาพของต้นไม้ ดังรูปแบบ ตามสมการที่ (4) - (7)

$$W_s = 0.0396 DBH^2 H_t^{0.9326} \quad (3)$$

$$W_b = 0.0348 DBH^2 H_t^{1.0270} \quad 4)$$

$$W_l = \left(\frac{28.0}{W_s + W_b} \right) 0.025^{-1} \quad (5)$$

โดยมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ประกอบด้วยมวลชีวภาพของลำต้น กิ่ง และใบของต้นไม้ ดังนี้

$$W_{ct} = W_s + W_b + W_l \quad (6)$$

เมื่อ

w_s คือ มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (กิโลกรัม)

w_b คือ มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง (กิโลกรัม)

w_l คือ มวลชีวภาพส่วนของใบ (กิโลกรัม)

ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในต้นไม้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณมวลชีวภาพ (Biomass) ซึ่งเป็นค่ามวลรวมขององค์ประกอบทางโครงสร้างของพืชทั้งส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ดังนี้

$$C_j = W_{ct} * FC \quad (7)$$

เมื่อ

C_j คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ (กิโลกรัม)

W_{ct} คือ ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ (กิโลกรัม)

FC คือ สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อมวลชีวภาพของต้นไม้ (กำหนดให้เท่ากับ 0.47) [23]

2.4 การวิเคราะห์ความแม่นยำ

ผลลัพธ์สำหรับข้อมูลการประเมินผลในแต่ละช่วงของค่า Histogram เกณฑ์ความน่าจะเป็นของโมเดลอธิบายถึงความแม่นยำโดยรวม โดยพิจารณาจากทั้งความแม่นยำและคะแนนการเรียกคืน เมตริกทั้งสามนี้คำนวณจากผลบวกที่แท้จริง (TP เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบได้อย่างถูกต้อง) ผลบวกเท็จ (FP เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบโดยผิดพลาด) และผลลบเท็จ (FN เรือนยอดต้นไม้ถูกละเว้น) สมการของความแม่นยำ คะแนนการเรียกคืน และคะแนน F1 ผู้วิจัยวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ผลทรงพุ่มข้อมูลภาคสนาม และการเรียนรู้ด้วยเครื่องของโมเดล [24] - [27]

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (8)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (9)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP}{TP+FN+FP} \quad (10)$$

$$\text{F1_Score} = \frac{2PR}{P+R} \quad (11)$$

เมื่อ

TP (True Positive) คือ เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบได้อย่างถูกต้อง

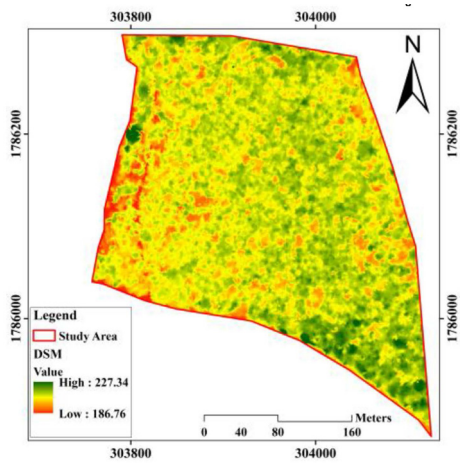
FP (False Positive) คือ เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบโดยผิดพลาด

FN (False Negative) คือ เรือนยอดต้นไม้ถูกละเว้น

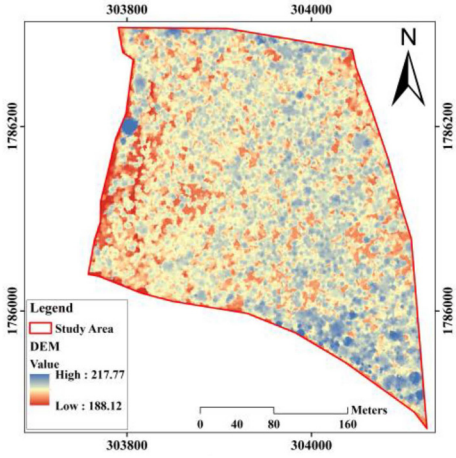
3. ผลและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจาก UAV

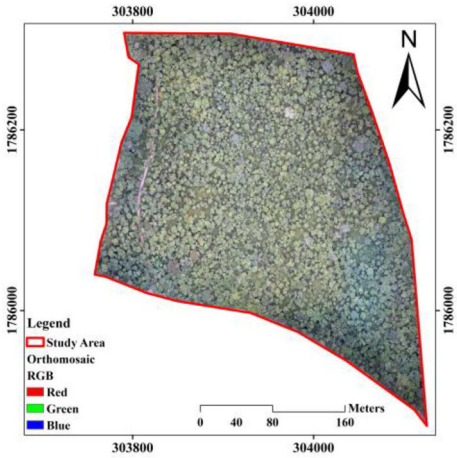
ผลการศึกษาการวิเคราะห์ของข้อมูลในพื้นที่ป่าชุมชนนี้ ผู้วิจัยใช้เทคโนโลยี UAV เพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากพื้นที่ป่าชุมชนบ้านหินลาดและบ้านหินลาดพัฒนา โดยนำข้อมูลมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณคาร์บอนที่ถูกกักเก็บในพื้นที่ป่า ช่วยให้การศึกษามีความแม่นยำและสามารถประเมินได้อย่างละเอียดโดยไม่จำเป็นต้องลงพื้นที่เก็บข้อมูลด้วยมือทุกจุด ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3 - 6 ดังนี้



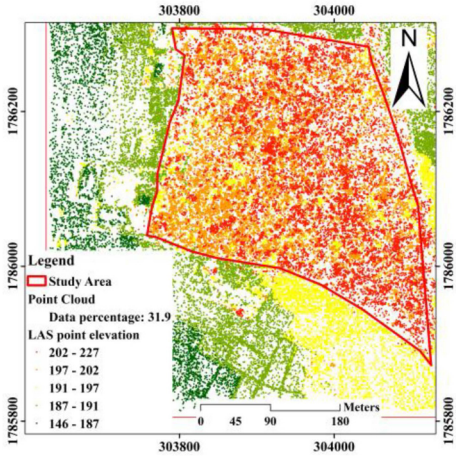
รูปที่ 3 DSM



รูปที่ 4 DEM



รูปที่ 5 ผลภาพออร์โธ (Orthophoto)



รูปที่ 6 ผลข้อมูล Point Cloud

รูปที่ 3 ผลแบบจำลองความสูงปกคลุมพื้นผิว Digital Surface Model (DSM) เป็นแบบจำลองที่แสดงระดับความสูงขององค์ประกอบต่าง ๆ บนพื้นดิน เช่น ต้นไม้และสิ่งก่อสร้าง ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีความสูงมากที่สุดอยู่ที่ 227.34 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง โดยเป็นบริเวณที่มีเรือนยอดของต้นไม้สูง พื้นที่ที่มีความหนาแน่นของพรรณไม้มากมีความสูงเฉลี่ย 204.26 เมตร แสดงเป็นสีน้ำตาล ส่วนพื้นที่ที่มีต้นไม้ขนาดเล็กหรือพืชพรรณเตี้ย มีความสูงประมาณ 1 - 2 เมตร แสดงเป็นสีส้ม ขณะที่พื้นที่ต่ำที่สุดมีความสูง 181.19 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง แสดงเป็นสีเขียว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นดินหรือมีพืชพรรณระดับต่ำ

รูปที่ 4 ผลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ผลการวิเคราะห์ DEM ในพื้นที่ศึกษาพบว่า ความสูงอยู่ระหว่าง 183.47 - 217.77 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง โดยสามารถจำแนกลักษณะภูมิประเทศออกเป็น 3 พื้นที่หลัก ได้แก่ พื้นที่สีขาว 217.77 เมตร เป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของพรรณไม้สูงและป่าอุดมสมบูรณ์ อีกทั้งเกิดกระบวนการสะสมอินทรีย์สารตามธรรมชาติ เช่น การย่อยสลายของใบไม้โดยปลวก พื้นที่สีน้ำตาล 198.18 เมตร เป็นพื้นที่ที่มีการทับถมของพรรณไม้และอินทรียวัตถุมาเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสะสมของหน้าดินทั่วไป พื้นที่สีเขียว 183.47 เมตร เป็นพื้นที่ต่ำสุด มีการทับถมน้อยและมีลักษณะของการไหลของน้ำ เช่น เส้นทางน้ำที่เกิดจากฝนหรือกิจกรรมของมนุษย์และสัตว์ ทั้งกระบวนการทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศในพื้นที่ดังกล่าว

รูปที่ 5 ผลภาพออร์โธ (Orthophoto) หรือภาพ RGB เป็นภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ผ่านกระบวนการปรับแก้ความผิดเพี้ยน (Orthorectification) โดยอ้างอิงข้อมูลความสูงต่ำของภูมิประเทศและระบบพิกัด UTM ทำให้ภาพมีความถูกต้องทั้งตำแหน่ง ขนาด และรูปร่างของวัตถุ ภาพ RGB ประกอบด้วย 3 สีหลัก ได้แก่ แดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ซึ่งช่วยให้มองเห็นภาพ

ที่ชัดเจนขึ้น ข้อมูลภาพถ่ายที่มีคุณภาพสูงและแม่นยำนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และพัฒนาโมเดลการเรียนรู้ด้วยเครื่องได้หลากหลายรูปแบบ และรูปที่ 6 ผลข้อมูล Point Cloud เป็นข้อมูลจุด 3 มิติ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ภูมิประเทศและโครงสร้างพื้นผิว ในพื้นที่ศึกษามี 106,360 จุด หรือเฉลี่ย 66 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองภูมิประเทศที่มีความละเอียดสูงและแม่นยำมากขึ้น

3.2 ผลการวิเคราะห์และสำรวจข้อมูลภาคสนาม

จากการสำรวจภาคสนามในแปลงตัวอย่าง พบพรรณไม้ทั้งหมด 22 วงศ์ 39 ชนิด รวม 1,241 ต้น หรือเฉลี่ย 124 ต้นต่อแปลง วงศ์ที่พบมากที่สุด ได้แก่ FABACEAE 475 ต้น DIPTEROCARPACEAE 291 ต้น และ RUBIACEAE 117 ต้น วงศ์ที่พบน้อยที่สุด อย่างละ 1 ต้น ได้แก่ BIGNONIACEAE, CELASTRACEAE และ LEGUMINOSAE โดยมีการจัดอันดับ 10 ชนิดที่พบมากที่สุดตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 1

เนื่องจากไม่สามารถระบุจำนวนต้นไม้ที่อยู่นอกแปลงตัวอย่างได้ ผู้วิจัยจึงใช้ Regression Analysis เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล 3 ส่วน ได้แก่ เส้นรอบวงระดับอกของต้นไม้ (DBH, เซนติเมตร) ความสูงต้นไม้ (H, เมตร) และขนาดทรงพุ่ม (NS, EW, เมตร) การวิเคราะห์นี้ช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างลักษณะทางกายภาพของต้นไม้ และสามารถใช้คาดการณ์ลักษณะของพรรณไม้ในพื้นที่ที่ไม่ได้สำรวจได้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ภาคสนามแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อมูลพรรณไม้ในแปลงสำรวจ

ลำดับ	ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวน
1	ต้นแดง	*Xylia xylocarpa var.* kerrii.	457
2	ต้นเต็ง	*Shorea obtusa Wall. ex* Blume.	224
3	ต้นพลองเหมือด	*Memecylon edule* Roxb.	56
4	ต้นอ้อยช้าง	*Lannea coromandelica (Houtt.)* Merr.	56
5	ต้นขาเปีย	*Hymenopyramis parvifolia* Moldenke	54
6	ต้นรัง	*Shorea siamensis* Miq.	40
7	มะม่วงหัวแมงวัน	*Buchanania lanzan* Spreng	40
8	ต้นยอป่า	*Morinda coreia* Ham.	34
9	ต้นหนามเค็ด	*Catunaregam tomentosa* (Blume ex DC.) Triveng.	26
10	ต้นกระมอบ	*Gardenia obtusifolia* Roxb.exKurz	23

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

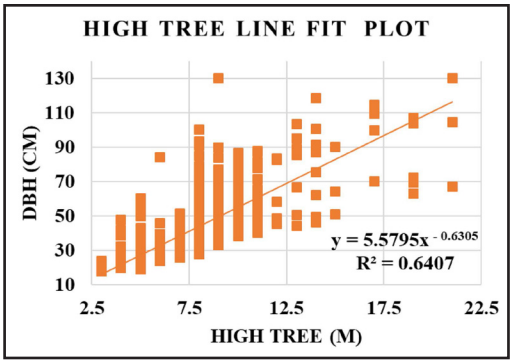
Regression Statistics	
Multiple R	0.809111057
R Square	0.654660703
Adjusted R Square	0.653823178
Standard Error	12.35636358
Observations	1241

จากตารางแสดงที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (DBH) ความสูงของต้นไม้ และทิศทางของเรือนยอด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.6547$ ซึ่งบ่งชี้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้มีประสิทธิภาพ ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่ค่อนข้างดี การวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อ DBH เพิ่มขึ้น ความสูงของต้นไม้และขนาดเรือนยอดก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสะท้อนถึงการเติบโตของต้นไม้ทั้งในด้านลำต้นและกิ่งก้าน การใช้โมเดลการถดถอยช่วยให้สามารถคาดการณ์ลักษณะของต้นไม้ แม้ในพื้นที่ที่ไม่ได้สำรวจ โดยค่าคงที่ของโมเดลมีความสำคัญในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและช่วยในการทำนายแนวโน้มการเติบโตของต้นไม้ดังแสดงในตารางที่ 3

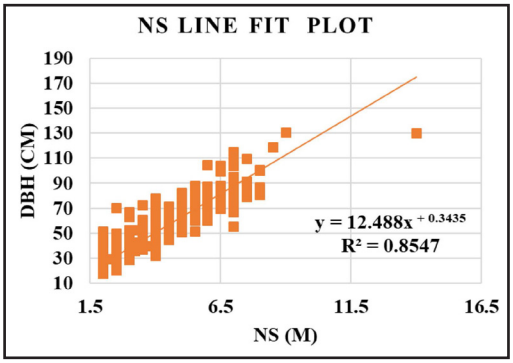
จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางระดับอก (DBH) ความสูงของต้นไม้ (H) และข้อมูลทรงพุ่ม (NE, EW) โดยค่าจุดตัดแกนอยู่ที่ -16.2766 ซึ่งเป็นค่าคงที่ในสมการถดถอย ค่า Standard Error 1.3076 บ่งชี้ถึงความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย และแสดงระดับความกระจายตัวของข้อมูล ค่า SE ที่ต่ำหมายถึงความแม่นยำที่สูงขึ้นของสมการถดถอย สมการที่ได้ถูกพัฒนาโดยใช้แบบจำลอง Machine learning ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับยอดไม้ Tree-tops detection และการแบ่งส่วนทรงพุ่ม Canopy model ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อกัน Positive correlation และสามารถใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อแสดงการเชื่อมโยงของข้อมูลในตัวแปรต่าง ๆ โดยกราฟดังกล่าวแสดงผลที่สอดคล้องกับสมการที่สร้างขึ้นจากการวิเคราะห์โมเดลดังรูปที่ 7 - 9 ดังนี้

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ทรงพุ่มโมเดลจาก UAV

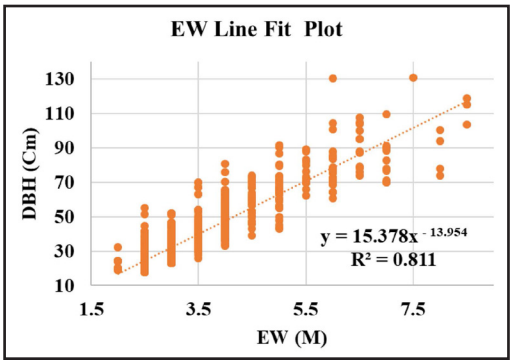
ผลวิเคราะห์ทรงพุ่ม		**ทรงพุ่มต้นไม้ (ตร.ม.)**
		Canopy Model (area m^2)
True Positive	TP	24,423.84
False Negative	FP	2,639.37
False Positive	FN	13,872.39



รูปที่ 7 เส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับความสูงของต้นไม้



รูปที่ 8 เส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับทิศเหนือ-ใต้ (NS)



รูปที่ 9 เส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW)

รูปที่ 7 แสดงเส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับความสูงของต้นไม้ พบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 = 0.6406 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับปานกลางถึงสูง มีทิศทางเชิงบวก หมายความว่าเมื่อลำต้นโตขึ้น DBH เพิ่มขึ้นความสูงของต้นไม้ก็มักจะเพิ่มขึ้นด้วย การเจริญเติบโตของต้นไม้มีความสัมพันธ์กันทั้งในแนวตั้ง (H) และแนวนอน (DBH) ซึ่งสะท้อนถึงกระบวนการสะสมมวลชีวภาพของต้นไม้

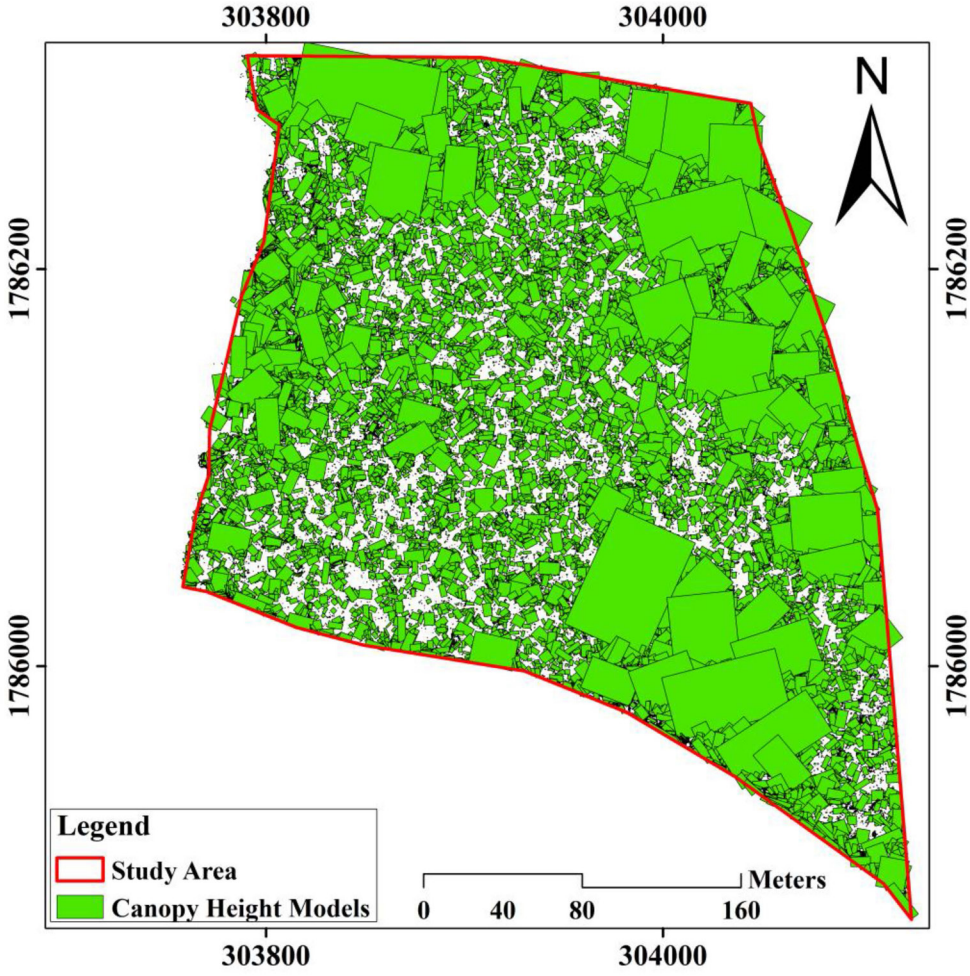
รูปที่ 8 แสดงเส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับขนาดเรือนยอดในทิศเหนือ-ใต้ (NS) พบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 = 0.8547 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงมีทิศทางเชิงบวก หมายความว่าเมื่อ DBH เพิ่มขึ้น ขนาดเรือนยอดในทิศเหนือ-ใต้ก็ขยายตัวขึ้น แสดงถึงพฤติกรรมการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่เมื่อมีการสะสมมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น ลำต้นและทรงพุ่มจะขยายตัวไปพร้อมกัน การขยายเรือนยอดในแนวนี้ช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสงแดดและประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง

รูปที่ 9 แสดงเส้นรอบวงระดับอก (DBH) กับขนาดเรือนยอดในทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) พบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 = 0.8111 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงมีทิศทางเชิงบวก หมายความว่าเมื่อ DBH เพิ่มขึ้น ขนาดทรงพุ่มในทิศตะวันออก-ตะวันตกก็ขยายตัวตาม ความสัมพันธ์นี้แสดงถึงกระบวนการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่สมดุลกันทั้งแนวนอนและแนวตั้ง โดยเฉพาะการตอบสนองต่อปัจจัยแสงแดด ลม และพื้นที่ว่างทรงพุ่มในแนวตะวันออก-ตะวันตกขยายตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงในสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเจริญเติบโต

ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง DBH ความสูงของต้นไม้ และทรงพุ่มในแนวต่าง ๆ มีแนวโน้มเป็นบวกทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าต้นไม้ที่มีลำต้นใหญ่ขึ้นมักจะสูงขึ้นและมีทรงพุ่มที่ขยายกว้างขึ้นทั้งในแนวเหนือ-ใต้และตะวันออก-ตะวันตก ข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างป่าไม้ ปริมาณคาร์บอน และการจัดการทรัพยากรป่าไม้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการเรียนรู้ด้วยเครื่อง

การใช้ UAV ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับและวิเคราะห์ลักษณะของทรงพุ่มต้นไม้ เช่น ขนาดเรือนยอดและความสูงของต้นไม้ จากการวิเคราะห์พบว่า โมเดลสามารถระบุขอบเขตของทรงพุ่มต้นไม้ได้อย่างแม่นยำ มีความคลาดเคลื่อนต่ำเมื่อเทียบกับข้อมูลที่เก็บจากภาคสนาม ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 Canopy Model

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์ผลการตรวจสอบความถูกต้องของทรงพุ่มโมเดลจาก UAV

ID	Canopy Model
Precision	0.902
Recall	0.638
Accuracy	0.597
F1- Score	0.747
Percent	74.737%

จากรูปที่ 10 เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดต้นไม้ (CHM) จากข้อมูลอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ถูกแปลงเป็นแบบจำลองเชิงพื้นที่ความละเอียดสูงด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงพื้นที่แสดงพิกัดและความสูงของทรงพุ่ม พบทรงพุ่มทั้งหมด 123,555 Polygons โดยแต่ละ Polygon แทนทรงพุ่มที่ตรวจจับได้ วิเคราะห์ด้วยวิธี Classification และคำนวณค่ากว้าง-ยาวของจุดกึ่งกลาง Polygon ขนาดทรงพุ่มเฉลี่ย 5 เมตร สะท้อนระดับการเติบโต ขนาดเรือนยอดเฉลี่ย NS 0.77 ซม., EW 0.42 ซม., และเส้นรอบวงระดับอก (DBH) 15 ซม. แสดงอัตราการเจริญเติบโตของลำต้น

3.4 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบความแม่นยำ

ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบความแม่นยำระหว่างข้อมูลภาคสนาม และผลข้อมูลจากการวิเคราะห์โมเดลของทรงพุ่มเรือนยอดต้นไม้ ซึ่งกำหนดความสูงของการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ ความสูงจากระดับพื้นดินอยู่ที่ 3 เมตร เพื่อให้ข้อมูลมีความสอดคล้องกับข้อมูลของภาคสนาม ดังตารางที่ 3 จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทรงพุ่มโมเดลจากข้อมูลจาก UAV แสดงความแม่นยำสูงและสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม โดยเปรียบเทียบขนาดทรงพุ่มกับข้อมูลจริง (Ground truth) ผ่านเทคนิค Intersection เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดังตารางที่ 4 จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบความถูกต้องของทรงพุ่มโมเดล Canopy Model โดยใช้เมตริกต่าง ๆ เช่น Precision, Recall, Accuracy, F1-Score, และ Percent ช่วยในการประเมินความแม่นยำ และประสิทธิภาพของการจำลองทรงพุ่มในแต่ละโมเดล ร่วมกับข้อมูลภาคสนาม โมเดลนี้มีความสามารถวิเคราะห์ต้นไม้ แสดงถึงความแม่นยำในการจำแนกรูปทรงพุ่มที่ถูกต้อง รวมถึงสามารถค้นหาต้นไม้หรือทรงพุ่ม

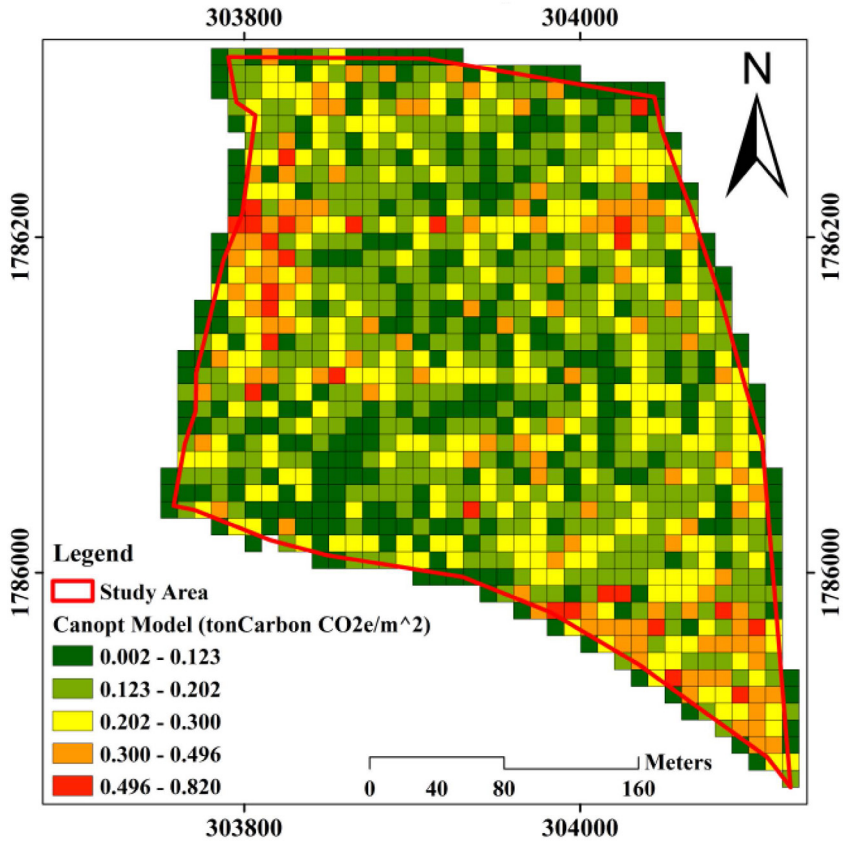
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลคาร์บอนเหนือพื้นดิน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินแสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยใช้การวิเคราะห์ผ่าน Machine learning ร่วมกับสมการแอลโลเมตรี เพื่อประเมินมวลชีวภาพและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ โดยพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (DBH) ความสูง และชนิดของต้นไม้ การประยุกต์ใช้ Machine learning ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยข้อมูลภาคสนามถูกนำมาใช้เพื่อวัดปริมาณคาร์บอนจริง ในขณะที่ข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลอง Canopy model ถูกนำมาใช้เพื่อจำแนกโครงสร้างของต้นไม้ในพื้นที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนต่อพื้นที่ ซึ่งได้จาก Canopy model แสดงไว้ในตารางที่ 6 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่วิเคราะห์ได้อยู่ที่ -0.48% และค่าความแตกต่างของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรวมอยู่ที่ 0.001020 $kgCO_2e/m^2$

ผลการศึกษาด้วยสมการแอลโลเมตรีสามารถนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบเชิงพื้นที่ของ Canopy Model รูปแบบ Polygon รูปทรงสี่เหลี่ยม เป็นการใช้พื้นที่

ย่อยขนาด 10 ตารางเมตร (0.001 เฮกตาร์) เป็นหน่วยวิเคราะห์ช่วยให้สามารถเข้าใจการกระจายตัวของคาร์บอนในระดับที่ละเอียดและเจาะจงมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 ผลความหนาแน่นคาร์บอนต่อพื้นที่ของ Canopy Model ผลการศึกษาพบว่า ความหนาแน่นของคาร์บอนในพื้นที่ 10 ตารางเมตร อยู่ในช่วง 0.0-0.820 tonCO_2e/m² โดยพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูงสุด 0.496-0.820 tonCO_2e/m² เป็นบริเวณที่มีพรรณไม้หนาแน่นและเรือนยอดสูง ตามข้อมูลจาก UAV ส่วนพื้นที่ที่มีความหนาแน่นต่ำสุด 0.000-0.123 tonCO_2e/ m² มีทรงพุ่มบาง พบต้นไม้ขนาดเล็กเส้นรอบวง <15 ซม. และพืชพื้นล่างหนาแน่น ความหนาแน่นเฉลี่ยของพื้นที่อยู่ที่ 0.0625 tonCO_2e/m² หรือ 0.01 t/ha



รูปที่ 11 ความหนาแน่นคาร์บอน Canopy Model

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการแอลโลเมตรีและ Machine Learning

Carbon sequestration		Plant component	Biomass quantity		Carbon sequestration capacity		Carbon sequestration capacity (kg/ha)	Percentage proportion
			Average (tCO_2e/ha)	Per area ($kgCO_2e/m^2$)	Average (tCO_2e/ha)	Per area ($kgCO_2e/m^2$)		
Field data	Plant part	Trunk	0.000311	3.106160	0.022120	1.459895	0.000146	24.35
		Leaf	0.000105	1.047605	0.007460	0.492374	0.492374	8.21
		Twig	0.000015	0.148418	0.001057	0.069756	0.069756	1.16
Machine learning	Canopy Model	Trunk	0.000326	3.258323	0.023203	1.531412	1.531412	25.55
		Leaf	0.000088	0.875185	0.006232	0.411337	0.411337	6.86
		Twig	0.000015	0.148285	0.001056	0.069694	0.069694	1.16
total			0.001275	12.754811	0.090830	5.994761	4.535012	100

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนปริมาณการกักเก็บคาร์บอนต่อพื้นที่

Carbon Sequestration	Carbon density per area (field data)	Carbon Sequestration Canopy Model
tCO_2e	213.53	212.51
$kgCO_2e/m^2$	2.022026	2.012442
tCO_2e/ha	0.002022	0.000201
Error (%)	100	0.48%
Carbon sequestration total quantity difference carbon density per area ($kgCO_2e/m^2$)		0.001020

4. สรุป

การประเมินปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอนของป่าชุมชนด้วยเทคนิคของข้อมูลจาก UAV จากปัจจุบันพบปัญหาด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ในพื้นที่ป่าชุมชนในจังหวัดมหาสารคาม ขนาดพื้นที่ 66 ไร่ หรือ 10.56 เฮกตาร์ โดยใช้ UAV ถ่ายภาพพื้นที่ป่าด้วยระบบ RGB ร่วมกับการประมวลผลจากซอฟต์แวร์ Agisoft Photo Scan วิเคราะห์ภาพ เก็บข้อมูลต้นไม้ภาคสนาม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก UAV ใช้โมเดลการเรียนรู้ด้วยเครื่อง (Machine learning) ในรูปของ Canopy model เพื่อตรวจจับเรือนยอดต้นไม้ ผลการศึกษาพบว่า ป่าชุมชนสามารถกักเก็บคาร์บอนได้ประมาณ 2.02 $kgCO_2e/m^2$ ความแม่นยำของโมเดลพบค่า Precision = 0.902, Recall = 0.638, Accuracy = 0.597, F1-Score = 0.747, และ Percent = 74.737% จากการวิเคราะห์ประเมินคาร์บอนในป่าได้แม่นยำกว่าการสำรวจแบบดั้งเดิม ลดเวลาและต้นทุน ไม่ต้องลงพื้นที่สำรวจทุกต้น ใช้ข้อมูลเพื่อบริหารจัดการป่าอย่างยั่งยืน โดยที่ความแม่นยำของโมเดลยังไม่ถึง 100% มีโอกาสพลาดในการตรวจจับต้นไม้บางส่วนต้องใช้ข้อมูลภาคสนามมาประกอบเพื่อเพิ่มความถูกต้อง และขึ้นอยู่กับคุณภาพของภาพถ่ายจาก UAV เช่น แสง เงา หรือความละเอียดของภาพ เป็นต้น จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการสนับสนุนการบริหารป่าชุมชน วางแผนการอนุรักษ์หรือปลูกป่าเพิ่ม ช่วยติดตามการเปลี่ยนแปลงของป่า วิเคราะห์การเติบโตของต้นไม้ ใช้เป็นต้นแบบสำหรับพื้นที่อื่นในการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนด้วยข้อมูลจาก UAV และ Machine learning สามารถช่วยวิเคราะห์และบริหารจัดการป่าได้แม่นยำขึ้น แม้จะยังมีข้อจำกัดเรื่องความแม่นยำของโมเดล แต่ก็เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพในการช่วยลดโลกร้อนผ่านการประเมินคาร์บอนจากป่าอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าเทคโนโลยี UAV และ Machine learning จะช่วยให้การศึกษาป่าชุมชนแม่นยำขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำของโมเดล ข้อจำกัดของข้อมูล และปัจจัยสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ควรพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ ผสานข้อมูลหลายแหล่ง และเพิ่มการฝึกอบรมให้ชุมชน เพื่อให้การนำเทคโนโลยีไปใช้เกิดประโยชน์สูงสุด

5. เอกสารอ้างอิง

[1] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte *et al.*, Eds., Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2021.

[2] C. Le Quéré *et al.*, "Global Carbon Budget 2022," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 14, pp. 2671 - 2740, 2022.

[3] L. Liu, B. Li, Z. Chen, and J. Liu, "Global Warming and Its Impact on Human Health: A Review," *IJERPH*, vol. 19, p. 6695, 2022.

[4] J. Rogelj *et al.*, "Pathways Limiting Global Warming to 1.5°C," vol. 9, pp. 713 - 718, 2019.

[5] T. Angkahad *et al.*, "An Empirical Analysis of Above-Ground Biomass and Carbon Sequestration Utilizing UAV Photogrammetry and Machine Learning Techniques," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 186740 - 186752, 2024.

[6] W. Jundang, L. Puangchit, and S. Diloksumpun, "Carbon Storage of Dry Dipterocarp Forest and Eucalypt Plantation at Mancha Khiri Plantation," *Thai J. Forestry*, vol. 29, no. 3, pp. 36 - 44, 2010.

[7] T. Laosuwan, Y. Uttaruk, and T. Rotjanakusol, "Atmospheric Environment Monitoring in Thailand via Satellite Remote Sensing: A Case Study of Carbon Dioxide," *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 32, no. 4, pp. 3645 - 3651, 2023.

[8] Y. Uttaruk, P.V. Khao, and T. Laosuwan, "A Guideline for Greenhouse Gas Emission Reduction and Carbon Sequestration in Forest Sector Based on Thailand Voluntary Emission Reduction Programme," *Sains Malays.*, vol. 53, pp. 477 - 486, 2024.

[9] T. Laosuwan, Y. Uttaruk, S. Nakapan, J. Itsarawisut, and C. Plybour, "Evaluation of Tree Biomass and Carbon Sequestration through Remote Sensing and Field Methods," *Geogr. Tech.*, vol. 20, no. 1, pp. 33 - 43, 2025.

[10] Y. Uttaruk and T. Laosuwan, "Development of Prototype Project for Carbon Storage and Greenhouse Gas Emission Reduction from Thailand's Agricultural Sector," *Sains Malays.*, vol. 48, no. 10, pp. 2083 - 2092, 2019.

[11] Y. Uttaruk, P. V. Khao, and T. Laosuwan, "A Guideline for Greenhouse Gas Emission Reduction and Carbon Sequestration in Forest Sector Based on Thailand Voluntary Emission Reduction Programme," *Sains Malays.*, vol. 53, no. 3, pp. 477 - 486, 2024.

[12] T. Laosuwan, Y. Uttaruk, S. Nakapan, J. Itsarawisut, and C. Plybour, "Evaluation of Tree Biomass and Carbon Sequestration through Remote Sensing and Field Methods," *Geogr. Tech.*, vol. 20, no. 1, pp. 33 - 43, 2025.

[13] Y. Uttaruk, and T. Laosuwan, "Development of Prototype Project for Carbon Storage and Greenhouse Gas Emission Reduction from Thailand's Agricultural Sector," *Sains Malays.*, vol. 48, no. 10, pp. 2083 - 2092, 2019.

[14] T. Pothong, S. Elliott, S. Chairuangsri, W. Chanthorn, D. P. Shannon, and P. Wangpakapattanawong, "New Allometric Equations for Quantifying Tree Biomass and Carbon Sequestration in Seasonally Dry Secondary Forest in Northern Thailand," *New Forests*, vol. 53, pp. 17 - 36, 2022.

[15] F. Noulèkoun, J. B. Naab, J. P. A. Lamers, S. Baumert, and A. Khamzina, "Sapling Biomass Allometry and Carbon Content in Five Aforestation Species on Marginal Farmland in Semi-arid Benin," *New Forests*, vol. 49, pp. 363 - 382, 2018.

[16] T. S. Chinembiri, O. Mutanga, and T. Dube, "Landsat-8 and Sentinel-2 Based Prediction of Forest Plantation C Stock Using Spatially Varying Coefficient Bayesian Hierarchical Models," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 22, p. 5676, 2022.

[17] B. M. Gramig, J. M. Barnard, and L. S. Prokopy, "Farmer Beliefs About Climate Change and Carbon Sequestration Incentives," *Clim. Res.*, vol. 56, no. 2, pp. 157 - 167, 2013.

[18] J. D. Watts, R. L. Lawrence, P. Miller, and C. Montagne, "An Analysis of Cropland Carbon Sequestration Estimates for North Central Monana," *Clim. Change*, vol. 108, pp. 301 - 331, 2011.

[19] P. Saengpradit, S. Sangpradid, and T. Laosuwan, "Estimation of Above-Ground Biomass using Hybrid Machine Learning based on Satellite Imagery," *IJTPE,* vol. 16, no. 61, pp. 7 - 13, 2024.

[20] W. Vattanavongsiri, S. Sangpradid, W. Chokkuea, and T. Laosuwan, "Estimation of Above-Ground Carbon Sequestration in the National Reserved Forest using Vegetation Indices and Gradient Boosting Machine Learning," *IJTPE,* vol. 16, no. 60, pp. 361 - 366, 2024.

[21] Y. Uttaruk and T. Laosuwan, "Comparison of Carbon Storage Measurement Methods on Agroforestry Systems in Sakon Nakhon Province," Northeast Thailand, *Sci. J. King Faisal Univ.*, vol. 21, pp. 95 - 99, 2020.

[22] H. Ogawa, K. Yoda, K. Ogino, and T. Kira, "Comparative Ecological Studies on Three Main Type of Forest Vegetation in Thailand. II. Plant Biomass," *Nature and Life in South East Asia,* vol. 4, pp. 49 - 80, 1965.

[23] M. Doraisami, G. M. Domke, and A. R. Martin, "Improving Wood Carbon Fractions for Multiscale Forest Carbon Estimation," *Carbon Balance Manag.*, vol. 19, no. 25, 2024.

[24] N. Ahmad *et al.*, "Comparative Analysis of Remote Sensing and Geo-Statistical Techniques to Quantify Forest Biomass," *Forests,* vol. 14, no. 2, p. 379, 2023.

[25] C. Wu *et al.*, "Building Damage Detection Using U-Net with Attention Mechanism from Pre- and Post-Disaster Remote Sensing Datasets," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 5, p. 905, 2021.

[26] R. M. Alzoman and M. J. F. Alenazi, "A Comparative Study of Traffic Classification Techniques for Smart City Networks," *Sensors,* vol. 21, no. 14, p. 4677, 2021.

[27] A. Jierula, S. Wang, T. - M. Oh, and P. Wang, "Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, p. 2314, 2021.