



การพัฒนาวิธีการประมาณการกักเก็บคาร์บอนของป่าเต็งรังด้วยอากาศยานไร้คนขับและการเรียนรู้ของเครื่อง

Development of Carbon Sequestration Estimation Methods for Dry Dipterocarp Forest using Unmanned Aerial Vehicles and Machine Learning

ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ^{1*}, สาธิต แสงประดิษฐ์², ทินกร อังคะฮาด³, นฤเศรษฐ์ ประเสริฐศรี⁴,
ธนัทเดช โรจนกุล⁵, จุมพล อิศระวิสุทธิ⁶ และ พัชรินทร์ เสริมการดี⁷

Teerawong Laosuwan^{1*}, Satith Sangpradid², Thinnakon Angkahad³,
Narueset Prasertsri⁴, Tanutdech Rotjanakusol⁵ and Patcharin Sermkarndee⁶

^{1,5,6} อาจารย์, ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

^{1,5,6} Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University.

^{2,4} อาจารย์, ภาควิชาภูมิสารสนเทศ, คณะวิทยาการสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

^{2,4} Lecturer, Department of Geoinformatics, Faculty of Informatics, Mahasarakham University.

³ นิสิตระดับปริญญาโท, ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ Master's degree students, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University.

⁷ อาจารย์, สาขาวิชาสังคมศึกษา, คณะศึกษาศาสตร์และศิลปศาสตร์, มหาวิทยาลัยหาดใหญ่

⁷ Lecturer, Department of Social Studies, Faculty of Education and Liberal Arts, Hatyai University.

*Corresponding author, E-mail: teerawong@msu.ac.th

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในปัจจุบันมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ อย่างไรก็ตามป่าไม้มีบทบาทสำคัญในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาวิธีการประมาณการกักเก็บคาร์บอนของป่าเต็งรังด้วยอากาศยานไร้คนขับและการเรียนรู้ของเครื่อง วิธีการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การสำรวจป่าเต็งรังด้วยการตรวจวัดกายวิภาคของต้นไม้ 2) การสำรวจป่าเต็งรังด้วยอากาศยานไร้คนขับ และ 3) การพัฒนาแบบจำลองด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง 3 แบบจำลองผลการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลจากภาคสนามพบพรรณไม้ทั้งสิ้น 1,241 ต้น 39 ชนิด สามารถประเมินปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเท่ากับ 213,525.96 kgCO₂e ผลจากการเรียนรู้ด้วยเครื่องด้วยเทคนิค Canopy Height Model พบว่ามีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนอยู่ที่ 212,513.92 kgCO₂e ผลจากการเรียนรู้ด้วยเครื่องด้วยเทคนิค Deepness พบว่ามีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนอยู่ที่ 217,933.89 kgCO₂e และผลจากการเรียนรู้ด้วยเครื่องด้วยเทคนิค Segment Mean Shift พบว่ามีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนอยู่ที่ 207,006.90 kgCO₂e จากการดำเนินการสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง Canopy Height Model



มีความแม่นยำสูงที่สุดในการประมาณค่าความหนาแน่นของคาร์บอนเมื่อเทียบกับการตรวจวัดภาคสนาม นอกจากนี้เมื่อนำผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง Canopy Height Model มาวิเคราะห์ความแม่นยำก็พบว่ามี Accuracy เท่ากับ 0.597, Precision เท่ากับ 0.902, Recall เท่ากับ 0.638, F1-score ที่ 0.747 และมีความถูกต้องโดยรวมเท่ากับ 74.737%

คำสำคัญ: บริการทางระบบนิเวศ, ภาวะโลกร้อน, มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

Abstract

The current climate change is attributed to the increase of carbon dioxide in the atmosphere. However, forests play a crucial role in effectively absorbing these carbon dioxide emissions. The objective of this research was to develop a method for estimating carbon sequestration in dry dipterocarp forests using unmanned aerial vehicles (UAVs) and machine learning. The research methodology was divided into three main parts: 1) surveying the dry dipterocarp forest by measuring the anatomical characteristics of trees, 2) surveying the forest using UAVs, and 3) developing models through machine learning, comprising three models. Field survey and data analysis identified a total of 1,241 trees from 39 species, with an estimated carbon sequestration of 213,525.96 kgCO₂e. Machine learning results utilizing the Canopy Elevation Model technique showed a carbon sequestration amount of 212,513.92 kgCO₂e, while the Deepness technique indicated 217,933.89 kgCO₂e, and the Segment Mean Shift technique showed 207,006.90 kgCO₂e. It can be concluded that the Canopy Elevation Model demonstrated the highest accuracy in estimating carbon density compared to field measurements. Furthermore, the analysis of the Canopy Elevation Model's accuracy yielded an accuracy rate of 0.597, a precision of 0.902, a recall of 0.638, an F1-score of 0.747, and an overall correctness of 74.737%

Keywords: Ecosystem services, global warming, aboveground biomass

บทนำ

ภาวะโลกร้อนคือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศโลก ทั้งในชั้นบรรยากาศใกล้พื้นผิวโลกและในน้ำในมหาสมุทร สาเหตุหลักมาจากก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การอุตสาหกรรม การเกษตร และการทำลายป่าไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่มีสัดส่วนมากที่สุด (Marsh and McLennan, 2022; Laosuwan et al., 2023; Uttaruk et al., 2024) จากข้อมูล Revised 1996 IPCC ได้จำแนกแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกเป็น 6 แหล่ง ได้แก่ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจาก (1) ภาคพลังงาน (2) ภาคกระบวนการอุตสาหกรรม



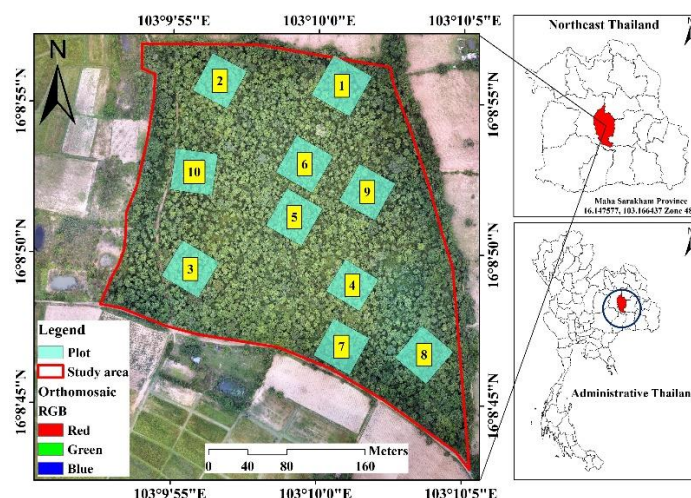
(3) สารละลายและการใช้ผลิตภัณฑ์ (4) ภาคเกษตรกรรม (5) การใช้ที่ดินจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน และป่าไม้ และ (6) ภาคการจัดการของเสีย (IPCC, 1996) นอกจากนี้ในการประเมินของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) เมื่อปี 2557 พบว่าในช่วงสามทศวรรษที่ผ่านมาพื้นผิวโลกอุ่นขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยช่วงเวลาระหว่างปี 1983 ถึง 2012 เป็นช่วงเวลา 30 ปีที่อุ่นที่สุดในช่วง 1400 ปีที่ผ่านมาในซีกโลกเหนือ โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีปริมาณการเพิ่มขึ้นมากที่สุดประมาณ 67% ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการใช้พลังงานฟอสซิลเป็นสำคัญ (IPCC, 2014) อีกทั้งผลจากการตัดไม้และทำลายป่าทำให้การเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศประมาณร้อยละ 20 เกิดจากการสูญเสียคาร์บอนที่เก็บกักในรูปเนื้อไม้ (Jundang et al., 2010) คาร์บอนถูกเก็บและหมุนเวียนอยู่ภายในองค์ประกอบต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า “วัฏจักรของคาร์บอน” (Carbon Cycle) วัฏจักรนี้ประกอบด้วยหลายขั้นตอน เช่น การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศโดยพืชผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง และการปลดปล่อยคาร์บอนกลับสู่บรรยากาศผ่านการหายใจของสิ่งมีชีวิตและการสลายตัวของสารอินทรีย์ (Wang et al., 2013) อนึ่ง ต้นไม้มีบทบาทสำคัญในการกักเก็บและดูดซับคาร์บอนจากบรรยากาศด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงให้อยู่ในรูปของมวลชีวภาพ (Biomass) ของต้นไม้ การลดจำนวนป่าไม้จึงเป็นการลดแหล่งกักเก็บคาร์บอนและทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนจากแหล่งกักเก็บสู่ระบบบรรยากาศ (UNECE, 2025) ซึ่งนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) และภาวะโลกร้อน (Global warming) ดังนั้นข้อมูลปริมาณคาร์บอนกักเก็บในป่าไม้จึงมีความสำคัญในการวางแผนการลดปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโลก (Penn State Extension, 2025) ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ป่าไม้ โดยปกติแล้วปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในต้นไม้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ามวลชีวภาพ (Biomass) ซึ่งเป็นค่ามวลรวมขององค์ประกอบทุกส่วนของต้นไม้ได้แก่ ลำต้น (Stem) กิ่ง (Branch) ใบ (Leaf) และ ราก (Root) (Uttarak & Laosuwan, 2020; Repo et al., 2021; He et al., 2022; Alongi, 2022) ดังนั้นข้อมูลลักษณะทางกายวิภาคของต้นไม้ เช่น ความสูง ขนาดของลำต้น ความกว้างของทรงพุ่ม จึงสามารถนำไปใช้ในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในต้นไม้ได้โดยการใช้สมการแอลโลเมตริก (Allometry Equation) ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและลักษณะโครงสร้างของต้นไม้ (Mason et al., 2014; Romero et al., 2020; Fradette et al., 2021; Livingston & Lincoln, 2023; Oumas et al., 2024) ทั้งนี้ ข้อมูลลักษณะโครงสร้างต้นไม้นั้นสามารถวัดได้จากการสำรวจข้อมูลในภาคสนาม และถึงแม้ว่าวิธีการสำรวจในภาคสนามจะได้ข้อมูลโครงสร้างและรูปทรงของต้นไม้ที่มีความถูกต้องสูง แต่ทว่าวิธีการนี้จำเป็นต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในงานสนามและยังเป็นวิธีการที่สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก (Larjavaara et al., 2013; Lu, et al., 2014; Jurjević et al., 2020) โดยเฉพาะหากพื้นที่ศึกษาปกคลุมด้วยพืชพรรณธรรมชาติหนาแน่นและอยู่ห่างไกลจากชุมชนวิธีการสำรวจในภาคสนามอาจกระทำไม่ได้ไม่สะดวกและข้อมูลที่ได้อาจมีความผิดพลาดสูง (Durfee et al., 2019; Huang et al., 2023; KC, et al., 2024)

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลในปัจจุบัน ทำให้มีการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับและข้อมูลจากดาวเทียมที่มีรายละเอียดสูง ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างและความหนาแน่นของพืชพรรณธรรมชาติของพื้นที่ป่า (Ahlsweide et al., 2021; Magnússon et al., 2021; Papp et al., 2021) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่ามวลชีวภาพจากสมการแอลโลเมตริก และคำนวณหาปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บอยู่ในพื้นที่ป่าต่อไปได้ (Daba & Soromessa, 2019; Vorster et al., 2020; Pothong et al., 2022) การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการประมาณการกักเก็บคาร์บอนของป่าเต็งรังด้วยอากาศยานไร้คนขับและการเรียนรู้ของเครื่อง โดยสาเหตุที่เลือกพื้นที่ศึกษาเป็นป่าเต็งรัง เนื่องจากมีลักษณะทางชีวภาค (Biosphere) และโครงสร้างของสังคมพืชพรรณในป่าไม่ซับซ้อนมากนัก จึงสามารถใช้ในการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองการประเมินคาร์บอนจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อเป็นต้นแบบ (Prototype) และแนวทางประยุกต์สำหรับพื้นที่อื่นๆ ที่มีความซับซ้อนของพืชพรรณมากขึ้นต่อไป เช่น พื้นที่ป่าธรรมชาติ เป็นต้น โดยผลจากการศึกษาจะสามารถเป็นต้นแบบในการประเมินปริมาณคาร์บอนกักเก็บของป่าไม้ในบริเวณอื่น ๆ สำหรับประเทศไทยต่อไปได้

วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาได้แก่ป่าเต็งรัง (ภาพที่ 1) ตั้งอยู่ที่ตำบลท่าสองคอน อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม มีพื้นที่แบ่งตามเขตการดูแลของบ้านหินลาด โดยประมาณ 32 ไร่ หรือ 5.12 เฮกตาร์ และบ้านหินลาดพัฒนา 34 ไร่ หรือ 5.44 เฮกตาร์ ชุมชนทั้ง 2 ชุมชน มีพื้นที่ป่ารวมอยู่ที่ 66 ไร่ หรือ 10.66 เฮกตาร์ อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปี 27.4°C อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 22.4°C และอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 33.7°C โดยป่าเต็งรังแห่งนี้มีพรรณไม้ประกอบไปด้วย ไม้แดง ไม้เต็ง ไม้รัง ไม้พรวง และไม้ชนิดอื่น ๆ ซึ่งมีค่าจำนวนมากและมีของป่ามากมายกับทรัพยากรธรรมชาติอื่นด้วย



ภาพที่ 1 ป่าเต็งรัง ตำบลท่าสองคอน อำเภอเมืองมหาสารคาม



การสำรวจภาคสนาม

เป็นการเก็บข้อมูลของต้นไม้แต่ละต้นโดยตรง ซึ่งรวมถึง ชื่อพันธุ์ไม้ เส้นรอบวงของต้นไม้ ความสูงของต้นไม้ ทิศทางการวัด (North-South, East-West) พิกัดตำแหน่งของต้นไม้ของต้นไม้ทุกต้นในแปลงตัวอย่าง รวมถึงการใช้กล้องวัดระยะในการเก็บข้อมูลความสูงของต้นไม้ และไม้วางแปลงตัวอย่างในพื้นที่การแปลงตัวอย่าง มีขนาด 40x40 เมตร จำนวน 10 แปลง โดยเลือกตำแหน่งของแปลงตัวอย่างด้วยวิธีสุ่ม (random sampling) สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ที่ระดับอกอยู่นอกแปลงตัวอย่างนั้น ผู้วิจัยได้ทำการสร้างพารามิเตอร์การวิเคราะห์ด้วยวิธี regression analysis และใช้สมการความสัมพันธ์แบบ linear regression ดังสมการที่ 1 (Angkahad et al., 2024)

$$y = (-16.292) + (6.633 * x_1) + (5.915 * x_2) + (2.038 * x_3) \quad (1)$$

เมื่อ y คือ การประมาณการ DBH (เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก) (ซม.)

x_1 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นไม้ตามแกนทิศเหนือ-ใต้ (NS) (ซม.)

x_2 คือ ค่าขนาดทรงพุ่มของต้นไม้ตามแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (EW) (ซม.)

x_3 คือ ค่า High tree ขนาดความสูงทรงพุ่มต้นไม้ (Canopy) (ม.)

การสำรวจป่าเต็งรังด้วยการตรวจวัดกายวิภาคของต้นไม้

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการสำรวจในพื้นที่ 10 แปลงที่เลือกมาเป็นตัวอย่าง สำหรับการคำนวณมวลชีวภาพของต้นไม้โดยใช้ allometry equation ซึ่งเป็นสมการที่ช่วยให้เราสามารถประมาณค่ามวลชีวภาพจากขนาดและลักษณะทางกายภาพของต้นไม้ได้ สำหรับป่าเต็งรังในการศึกษานี้ได้เลือกใช้สมการที่พัฒนาโดย Ogawa et al., (Ogawa et al., 1965) (สมการที่ 2) โดยสมการนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ที่ระดับอก (1.30 เมตร) และความสูงของต้นไม้ ซึ่งเป็นข้อมูลหลักในการประเมินความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนดังสมการที่ 3 ต่อไป

$$W_s = 0.0396 DBH^2 H_t^{0.9326}$$

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

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

มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ประกอบด้วยมวลชีวภาพของลำต้น กิ่ง และใบของต้นไม้ ดังนี้

$$W_{ct} = W_s + W_b + W_i \quad (3)$$

เมื่อ w_s คือ มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (กิโลกรัม)

w_b คือ มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง (กิโลกรัม)

w_i คือ มวลชีวภาพส่วนของใบ (กิโลกรัม)

ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในต้นไม้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณมวลชีวภาพ (biomass) ซึ่งเป็นค่ามวลรวมขององค์ประกอบทางโครงสร้างของพืชทั้งส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินดังสมการที่ 4



$$C_j = W_{ct} * FC \quad (4)$$

เมื่อ C_j คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ (กิโลกรัม)

W_{ct} คือ ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ (กิโลกรัม)

FC คือ สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อมวลชีวภาพของต้นไม้ (กำหนดให้เท่ากับ 0.47)

การสำรวจป่าเต็งรังด้วยอากาศยานไร้คนขับ

การวิจัยนี้ใช้โดรน DJI Phantom 4 PRO ซึ่งมีกล้องความละเอียด 20 MP ในการสำรวจพื้นที่ครั้งนี้ใช้กล้องแบบ RGB และได้วางแผนแนวนบินที่ความสูง 100 เมตร จากพื้นดิน การบินสำรวจนี้มีการตั้งค่าให้มีการซ้อนทับของภาพ ร้อยละ 85 และการซ้อนทับด้านข้างร้อยละ 70 โดยความแม่นยำของกล้องอยู่ที่ 10 เมตร มุมเอียงของกล้องมีค่าความแม่นยำ 2 องศา ใช้เส้นทางการบินแบบตาราง สำหรับสร้างแผนที่สองมิติ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จะมีนามสกุลไฟล์ .JPG ขนาด 5,472 x 3,648 pixel รวมทั้งหมดของพื้นที่ทำการบันทึกทั้งสิ้น 321 ภาพ การประมวลผลภาพจากโดรนดำเนินการด้วยโปรแกรม Agisoft Photo Scan ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (Point Cloud) ที่แสดงตำแหน่งของพื้นที่ในพิกัด X, Y, Z ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้าง Digital Surface Model (DSM), Digital Elevation Model (DEM) และ Orthophoto ต่อไป

การสร้างแบบจำลองด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

1. Canopy Height Model: ได้สร้างแบบจำลองทรงพุ่มของเรือนยอดของต้นไม้ และการหาความสูงในพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลอากาศยานไร้คนขับ (UAV) การตรวจจับยอดไม้ (Tree top Detection) ซึ่งสามารถทำได้โดย ค่าความแตกต่างของความสูงระหว่างข้อมูลจาก DSM และ DEM ผลการวิเคราะห์ทราบถึงความสูงของวัตถุที่อยู่บนพื้นผิวโลกจากสมการที่ 5 จากโมเดลเพื่อจำแนกข้อมูลเรือนยอด และการวิเคราะห์ค่าความยาวและความกว้างของเรือนยอด

$$CHM = DSM - DEM \quad (5)$$

เมื่อ CHM = แบบจำลองความสูงเรือนยอด

DSM = แบบจำลองความสูงปกคลุมพื้นผิว

DEM = แบบจำลองความสูงภูมิประเทศ

2. Deepness Model: งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองค่าความยาวและความสูงของ polygons ทรงพุ่มของต้นไม้จาก Deepness Model (Guo et al., 2023) โดยใช้เครื่องมือ Minimum Bounding Geometry ซึ่งเป็นการสร้างคุณลักษณะที่มีรูปหลายเหลี่ยมซึ่งแสดงถึงรูปทรงของเรขาคณิตขอบเขต (Mendes et al., 2023) ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปเทียบแบบจำลองรูปของทิศทรงพุ่มได้ (NE,EW) มีหน่วยเป็นเมตร (m) ทั้งนี้ผลลัพธ์ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โมเดล Deepness คือ ค่าทรงพุ่ม (NE, EW) และค่าความสูงทรงพุ่ม Canopy Height Model (CHM) ของแต่ละ polygons ในพื้นที่ป่า

3. Segment Mean Shift: แบบจำลอง Segment Mean Shift เป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ภาพ RGB ที่ได้มาจากอากาศยานไร้คนขับ โดยเลือกใช้ชุดข้อมูลแบบ Raster ที่ถูกแบ่งส่วน



เพื่อตรวจสอบรายละเอียดสเปกตรัมที่ระดับ 20 และรายละเอียดเชิงพื้นที่ ซึ่งหน่วยวัดเป็น Pixel ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของภาพ RGB ในการสร้างตัวอย่างการเรียนรู้และการแบ่งประเภทข้อมูลนั้นได้จัดเตรียมตัวอย่างการเรียนรู้ (Training Sample) โดยใช้วิธีการจำแนก (Classify) ประเภททรงพุ่มของเรือนยอดต้นไม้ โดยผลการจำแนกประเภทเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วยเทคนิค train Support Vector Machine Classifier หลังจากการจำแนกประเภทแล้วก็นำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ Classify Raster และคำนวณค่าความกว้างและความยาวของจุดกึ่งกลางของ Polygons โดยใช้เครื่องมือ Minimum Bounding Geometry นำผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองรูปทรงพุ่มในทิศทางต่าง ๆ (เช่น NE, EW) ขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความสูงของข้อมูลในแต่ละ Polygons ภายในพื้นที่ศึกษาจากโมเดล Canopy Elevation Model โดยใช้วิธีการสกัดค่าความสูงเฉลี่ยผ่านเทคนิค Spatial Analysis Tool และใช้รูปแบบของ Zonal Statistics as Tool เพื่อให้ได้ข้อมูลความสูงที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

การวิเคราะห์ความแม่นยำ

ผลลัพธ์สำหรับข้อมูลการประเมินผลในแต่ละช่วงของค่า Histogram เกณฑ์ความน่าจะเป็นของโมเดล อธิบายถึงความแม่นยำโดยรวมโดยพิจารณาจากทั้งความแม่นยำและคะแนนการเรียกคืน เมตริกทั้งสามนี้คำนวณจากผลบวกที่แท้จริง (TP เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบได้อย่างถูกต้อง) ผลบวกเท็จ (FP เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบโดยผิดพลาด) และผลลบเท็จ (FN เรือนยอดต้นไม้ถูกละเว้น) สมการของความแม่นยำ คะแนนการเรียกคืน และคะแนน F1 ผู้วิจัยวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ผลทรงพุ่มข้อมูลภาคสนามและการเรียนรู้ด้วยเครื่อง (สมการที่ 6-9)

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (6)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

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

$$\text{F1_Score} = \frac{2PR}{P+R} \quad (9)$$

เมื่อ TP (True Positive) คือ เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบได้อย่างถูกต้อง

FP (False Positive) คือ เรือนยอดต้นไม้ตรวจพบโดยผิดพลาด

FN (False Negative) คือ เรือนยอดต้นไม้ถูกละเว้น

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการการสำรวจป่าเต็งรังด้วยการตรวจวัดกายวิภาคของต้นไม้

จากการสำรวจภาคสนามจากแปลงตัวอย่างภายในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 10 แปลง พบต้นไม้ทั้งหมด 1241 ต้น และพบชนิดพรรณไม้ 39 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพรรณไม้ที่พบในแปลงสำรวจ



เรียงลำดับตามจำนวนที่พบมากที่สุดจำนวน 10 ชนิด ทั้งนี้จากการสำรวจภาคสนามได้พบว่า ภายในพื้นที่ศึกษาพบความสูงและเส้นรอบวงของต้นไม้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7 เมตร และ 38 เซนติเมตร ตามลำดับ ความยาวของทรงพุ่มตามแนวเหนือ-ใต้ (NS) และตามแนวตะวันออก-ตะวันตก (EW) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.06 และ 3.14 เมตรตามลำดับ ซึ่งข้อมูลภาคสนามเหล่านี้จะถูกใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์แบบ regression analysis ดังสมการ 1 เพื่อใช้ในการคำนวณและประมาณค่าเส้นรอบวงของต้นไม้จากศานาไรคนขับ โดยเส้นรอบวงของต้นไม้จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความสูงต้นไม้ (m) ความยาวทรงพุ่มตามแนวเหนือ-ใต้ (NS) และตามแนวตะวันออก-ตะวันตก (EW)

ตารางที่ 1 ข้อมูลพรรณไม้ในแปลงสำรวจ

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

จากตารางที่ 1 ข้อมูลพรรณไม้ในแปลงสำรวจที่ได้รับไว้ จะเห็นได้ว่าการบันทึกชนิดของพืชทั้งสิ้น 10 ชนิด โดยชนิดที่มีจำนวนมากที่สุดคือ ต้นแดง ซึ่งมีจำนวนถึง 457 ต้น แสดงให้เห็นถึงความอุดมสมบูรณ์และความพิเศษของต้นไม้ชนิดนี้ในพื้นที่สำรวจ ในขณะที่ ต้นเต็ง มาเป็นอันดับสองด้วยจำนวน 224 ต้น ชนิดไม้ที่มีจำนวนเท่ากันคือ ต้นพลองเหมือด และ ต้นอ้อยช้าง ซึ่งแต่ละชนิดมีจำนวน 56 ต้น เป็นไปได้ว่าไมทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการปรับตัวกับสภาพแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน ส่วน ต้นขาเป็ย มีจำนวน 54 ต้น และ ต้นรัง และ มะม่วงหาวแมงวัน มีจำนวนเท่ากันที่ 40 ต้น แสดงถึงความหลากหลายทางชีวภาพในพื้นที่ นอกจากนี้ ต้นยอป่า และ ต้นหนาม มีจำนวน 34 และ 26 ต้นตามลำดับ ขณะที่ต้นกระมอ มีจำนวนน้อยที่สุดคือ 23 ต้น ซึ่งอาจต้องการการดูแลพิเศษในการอนุรักษ์ ข้อมูลนี้สะท้อนถึงความหลากหลายทางชีวภาพของพืชในพื้นที่สำรวจและความสำคัญของการอนุรักษ์พันธุ์ไม้ที่มีจำนวนไม่มากในพื้นที่นี้เพื่อรักษาความสมดุลของระบบนิเวศในระยะยาว สำหรับผลการคำนวณมวลชีวภาพของต้นไม้โดยใช้ allometry equation และการคำนวณการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ศึกษา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

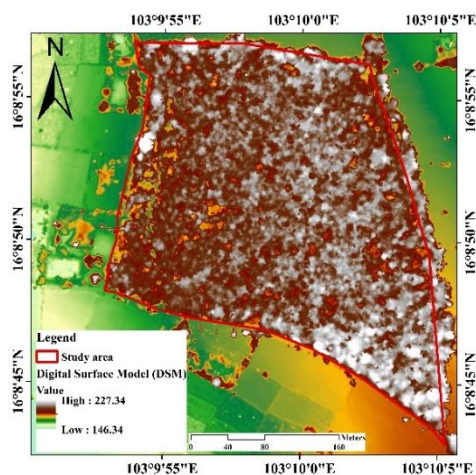


ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอน

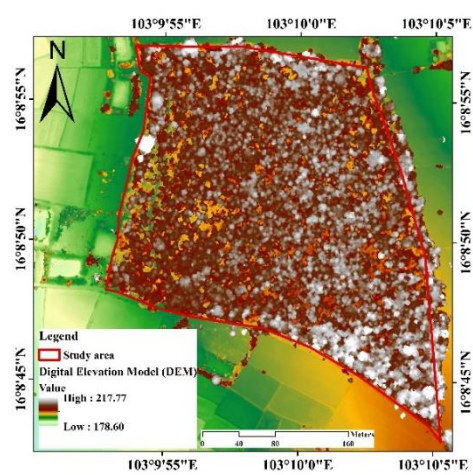
มวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอน	ปริมาณคาร์บอน
มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (kg)	328,010.49
มวลชีวภาพส่วนของใบ (kg)	110,627.12
มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง (kg)	15,672.94
ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ (kg)	454,310.55
สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อมวลชีวภาพของต้นไม้ (kgCO_2e)	213,525.96
ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรวม (tCO_2)	213.53
เฉลี่ยตันคาร์บอนต่อไร่ ($\text{tCO}_2\text{e/rai}$)	3.24

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอนจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนของมวลชีวภาพในส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ ซึ่งมีความสำคัญในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ ในการศึกษาพบว่า มวลชีวภาพส่วนของลำต้นมีค่าสูงที่สุดที่ 328,010.49 kg รองลงมาคือมวลชีวภาพส่วนของใบที่ 110,627.12 kg และสุดท้ายคือมวลชีวภาพส่วนของกิ่งที่ 15,672.94 kg เมื่อรวมมวลชีวภาพทั้งหมดเหนือพื้นดินของต้นไม้ พบว่ามีปริมาณรวมทั้งสิ้น 454,310.55 kg ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่สามารถกักเก็บได้ในต้นไม้เหล่านี้ นอกจากนี้ สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อมวลชีวภาพของต้นไม้คือ 213,525.96 kgCO_2e ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของต้นไม้ในการกักเก็บคาร์บอนในรูปแบบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรวมที่ 213.53 tCO_2 การที่มีการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อต้นต่อไร่ที่ 3.24 ton ยังเป็นการชี้ให้เห็นว่า การปลูกและรักษาต้นไม้มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับภูมิภาคและระดับโลก

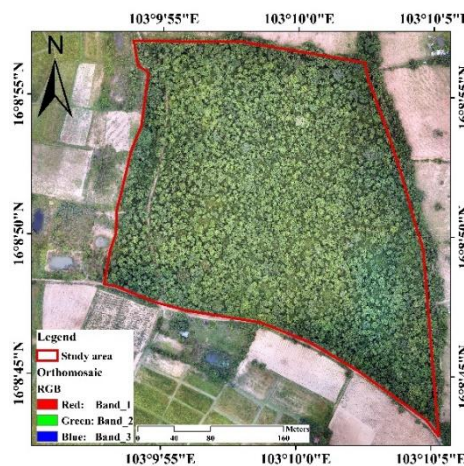
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับผลการศึกษากำหนดปริมาณการกักเก็บคาร์บอนพื้นที่ป่าเต็งรัง ด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อหาเพื่อประมาณปริมาณการกักเก็บคาร์บอน ทั้งนี้จากการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2 DSM



ภาพที่ 3 DEM



ภาพที่ 4 ผลภาพ Orthophoto

ภาพที่ 2 ผลแบบจำลอง Digital Surface Model เป็นการแสดงผลการจับภาพทั้งคุณลักษณะทางธรรมชาติและสิ่งก่อสร้าง หรือเทียบเท่าเรือนยอดของต้นไม้ของสภาพแวดล้อมทั้งหมดที่อยู่เหนือพื้นดิน โดยในพื้นที่ศึกษาพบความสูงอยู่ที่ช่วง 181.19 ถึง 227.34 ค่าที่มีความสูงที่สุดคือ พื้นที่ที่มีสีแดง มีความสูงเท่ากับ 227.34 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง เป็นบริเวณที่ปกคลุมไปด้วยความหนาแน่น ของพรรณไม้ที่มีความสูงจากระดับพื้นดิน และพื้นที่ที่เป็นสีเขียว มีความสูงอยู่ที่ 181.19 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ผู้วิจัยจัดให้เป็นพื้นที่ต่ำเป็นระดับพื้นดิน สำหรับภาพที่ 3 ผลแบบจำลอง (Digital Elevation Model) ซึ่งเป็นการแสดงพื้นผิวโลก โดยลักษณะทางธรรมชาติและสิ่งก่อสร้างทั้งหมดออกไป โดยในพื้นที่ศึกษาพบความสูงอยู่ที่ช่วง 183.47 ถึง 217.77 ค่าที่มีความสูงที่สุดคือ พื้นที่ที่มีสีแดง มีความสูงเท่ากับ 217.77 เมตรจากระดับทะเลปานกลางเป็นบริเวณที่ความสูง และพื้นที่ที่เป็นสีเขียว มีความสูงอยู่ที่ 183.47 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ผู้วิจัยจัดให้เป็นพื้นที่ที่มีความสูงต่ำ เช่น เส้นทางน้ำในพื้นที่ศึกษา และในภาพที่ 4 ผลภาพ Orthophoto หรือ ภาพ RGB ซึ่งเป็นภาพชุดข้อมูลที่ประกอบไปด้วยช่วงค่าของสี ซึ่งมีทั้ง 3 สีด้วยกันคือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) ทำให้เราสามารถมองเห็นภาพที่มีความชัดเจนเพิ่มมากขึ้นจากภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ที่ผ่านกระบวนการ



ปรับแก้ (Orthorectification) ซึ่งเป็นการปรับแก้ความผิดเพี้ยนทางตำแหน่งอันเนื่องมาจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ และการเอียงของกล้องบันทึกข้อมูล โดยใช้ข้อมูลความสูงต่ำของภูมิประเทศในการปรับแก้เปลี่ยนตำแหน่ง รวมถึงอ้างอิงระบบพิกัดกริดของแผนที่โลก (UTM)

ผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนด้วยแบบจำลองจากการเรียนรู้ด้วยเครื่อง

สำหรับผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนด้วยแบบจำลองจากการเรียนรู้ด้วยเครื่องทั้ง 3 แบบจำลอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 ทั้งนี้ จากข้อมูลในตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนด้วยแบบจำลองจากการเรียนรู้ด้วยเครื่อง สามารถสรุปได้ว่าในแง่ของการกักเก็บคาร์บอนรวมและเฉลี่ยต้นคาร์บอนต่อไร่ โดยผลการดำเนินการพบว่าการเรียนรู้ด้วยเครื่องด้วยเทคนิค Canopy Height Model ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดในการกักเก็บคาร์บอนเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัดในภาคสนาม รองลงมาได้แก่ Deepness Model และ Segment Model เมื่อพิจารณาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินก็พบว่า Canopy Height Model, Deepness Model และ Segment Model มีปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 452,157.27, 463,689.13, และ 440,440.21 กิโลกรัม (kg) ตามลำดับ สำหรับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรวมก็พบว่า Canopy Height Model, Deepness Model และ Segment Model มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเท่ากับ 212.51, 217.93 และ 207.01 ตันคาร์บอน (tCO₂e) ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อนำผล Deepness Model มาวิเคราะห์การตรวจสอบความแม่นยำก็พบว่ามีค่า Accuracy เท่ากับ 0.597, Precision เท่ากับ 0.902, Recall เท่ากับ 0.638, F1-score ที่ 0.747 และมีความถูกต้องโดยรวมเท่ากับ 74.737% ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนด้วยแบบจำลองจากการเรียนรู้ด้วยเครื่อง

มวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอน	ปริมาณคาร์บอน (ภาคสนาม)	ปริมาณการกักเก็บคาร์บอน ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ด้วยเครื่อง		
		Canopy Height Model	Deepness Model	Segment Model
มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (kg)	328,010.49	344,078.86	328,489.62	311,264.74
มวลชีวภาพส่วนของใบ (kg)	110,627.12	92,419.54	119,207.44	113,983.42
มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง (kg)	15,672.94	15,658.88	15,992.08	15,192.05
ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ของต้นไม้ (kg)	454,310.55	452,157.27	463,689.13	440,440.21
สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อมวล ชีวภาพของต้นไม้ (kgCO ₂ e)	213,525.96	212,513.92	217,933.89	207,006.90
ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรวม (ตันคาร์บอน) (tCO ₂ e)	213.53	212.51	217.93	207.01
เฉลี่ยต้นคาร์บอนต่อไร่ (tCO ₂ e/rai)	3.24	3.22	3.30	3.15



จากข้อมูลในตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนด้วยแบบจำลองจากการเรียนรู้ด้วยเครื่อง สามารถสรุปได้ว่าในแง่ของการกักเก็บคาร์บอนรวมและเฉลี่ยต้นคาร์บอนต่อไร่ โดยผลการดำเนินการพบว่าการเรียนรู้ด้วยเครื่องด้วยเทคนิค Canopy Height Model ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกักเก็บคาร์บอนเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัดในภาคสนาม รองลงมาได้แก่ Deepness Model และ Segment Model เมื่อพิจารณาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินก็พบว่า Canopy Height Model, Deepness Model และ Segment Model มีปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 452,157.27, 463,689.13, และ 440,440.21 กิโลกรัม (kg) ตามลำดับ สำหรับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรวมก็พบว่า Canopy Height Model, Deepness Model และ Segment Model มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเท่ากับ 212.51, 217.93 และ 207.01 ตันคาร์บอน (tCO₂e) ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำผล Deepness Model มาวิเคราะห์การตรวจสอบความแม่นยำก็พบว่ามีค่า Accuracy เท่ากับ 0.597, Precision เท่ากับ 0.902, Recall เท่ากับ 0.638, F1-score ที่ 0.747 และมีความถูกต้องโดยรวมเท่ากับ 74.737% ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบความแม่นยำ

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

สรุป

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณการกักเก็บคาร์บอนของป่าเต็งรังด้วยการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับและการเรียนรู้ของเครื่อง การดำเนินการออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การสำรวจป่าเต็งรังด้วยการวัดกายวิภาคของต้นไม้ การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ และการพัฒนาแบบจำลองผ่านการเรียนรู้ของเครื่องใน 3 แบบจำลอง ได้แก่ Canopy Height Model, Deepness Model และ Segment Model ผลการดำเนินการจากการสำรวจป่าเต็งรังด้วยการวัดกายวิภาคของต้นไม้ พบพรรณไม้ 1,241 ต้นจาก 39 ชนิด และสามารถประเมินการกักเก็บคาร์บอนได้ 213,525.96 kgCO₂e ในขณะการวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองการกักเก็บคาร์บอนด้วยการเรียนรู้ด้วยเครื่อง 3 แบบจำลองนั้น พบว่าแบบจำลอง Canopy Height Model มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการวิเคราะห์กักเก็บคาร์บอนโดยมีระดับความแม่นยำ 74.737% วิธีการที่พัฒนาขึ้นมานี้จะช่วยลดเวลาและต้นทุนได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องสำรวจทุกต้นไม้ในพื้นที่จริง ข้อมูลที่ได้รับสามารถนำไปใช้ในการบริหารจัดการป่าอย่างยั่งยืนได้



แม้ว่าความแม่นยำของโมเดลจะยังไม่ถึง 100% และอาจมีความผิดพลาดในการตรวจจับต้นไม้บางส่วน จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากภาคสนามมาประกอบเพื่อเพิ่มความถูกต้อง ทั้งนี้ ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ เช่น แสง เงา หรือความละเอียดของภาพ การศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการสนับสนุนการบริหารป่า และช่วยติดตามการเปลี่ยนแปลงของป่า รวมถึงวิเคราะห์การเติบโตของต้นไม้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่อื่นได้ โดยใช้อากาศยานไร้คนขับและการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งสามารถช่วยวิเคราะห์และบริหารจัดการป่าได้แม่นยำขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Ahlswede, S., Asam, S., & Röder, A. (2021). Hedgerow object detection in very high-resolution satellite images using convolutional neural networks. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(018501).
- Alongi, D.M. (2022). Impacts of climate change on blue carbon stocks and fluxes in mangrove forests. *Forests*, 13(149).
- Angkahad, T., Laosuwan, T., Sangpradid, S., Prasertsri, N., Uttaruk, Y., Phoophathong, T., & Nuchthapho, J. (2024). An empirical analysis of above-ground biomass and carbon sequestration utilizing UAV photogrammetry and machine learning techniques. *IEEE Access*, 1–1.
- Daba, D.E., & Soromessa, T. (2019). The accuracy of species-specific allometric equations for estimating aboveground biomass in tropical moist montane forests: Case study of *Albizia grandibracteata* and *Trichilia dregeana*. *Carbon Balance and Management*, 14, 1–13.
- Durfee, N., Ochoa, C.G., & Mata-Gonzalez, R. (2019). The use of low-altitude UAV imagery to assess western juniper density and canopy cover in treated and untreated stands. *Forests*, 10(296).
- Fradette, O., Marty, C., Tremblay, P., Lord, D., & Boucher, J.-F. (2021). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in afforested open woodlands with black spruce and jack pine, in the eastern Canadian boreal forest. *Forests*, 12(59).
- Guo, Y., Xiao, Y., Hao, F., Zhang, X., Chen, J., de Beurs, K., & Fu, Y.H. (2023). Comparison of different machine learning algorithms for predicting maize grain yield using UAV-based hyperspectral images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 124, 103528.



- He, G., Zhang, Z., Zhu, Q., Wang, W., Peng, W., & Cai, Y. (2022). Estimating carbon sequestration potential of forest and its influencing factors at fine spatial-scales: A case study of Lushan City in Southern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9184).
- Huang, T., Ou, G., Wu, Y., Zhang, X., Liu, Z., Xu, H., Xu, X., Wang, Z., & Xu, C. (2023). Estimating the aboveground biomass of various forest types with high heterogeneity at the provincial scale based on multi-source data. *Remote Sensing*, 15(3550).
- IPCC. (1996). Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- Jundang, W., Puangchit, L., & Diloksumpun, S. (2010). Carbon storage of dry dipterocarp forest and eucalypt plantation at Mancha Khiri Plantation, Khon Kaen Province. *Thai Journal of Forestry*, 29, 36–44.
- Jurjević, L., Liang, X., Gašparović, M., & Balenović, I. (2020). Is field-measured tree height as reliable as believed – Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote sensing in a deciduous forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 277–241.
- KC, Y.B., Liu, Q., Saud, P., Gaire, D., & Adhikari, H. (2024). Estimation of above-ground forest biomass in Nepal by the use of airborne LiDAR, and forest inventory data. *Land*, 13(213).
- Larjavaara, M., & Muller-Landau, H.C. (2013). Measuring tree height: A quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, 13, 320–328.
- Laosuwan, T., Uttaruk, Y., Sangpradid, S., Butthep, C., & Leammanee, S. (2023). The carbon sequestration potential of silky oak (*Grevillea robusta* A.Cunn. ex R.Br.), a high-value economic wood in Thailand. *Forests*, 14(1824).
- Livingston, C., & Lincoln, N.K. (2023). Determining allometry and carbon sequestration potential of breadfruit (*Artocarpus altilis*) as a climate-smart staple in Hawai‘i. *Sustainability*, 15(15682).



- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2014). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9, 63–105.
- Magnússon, R.Í., Limpens, J., Kleijn, D., van Huissteden, K., Maximov, T.C., Lobry, S., & Heijmans, M.M. (2021). Shrub decline and expansion of wetland vegetation revealed by very high resolution land cover change detection in the Siberian lowland tundra. *Science of the Total Environment*, 782, 146877.
- Mason, N.W.H., Beets, P.N., Payton, I., Burrows, L., Holdaway, R.J., & Carswell, F.E. (2014). Individual-based allometric equations accurately measure carbon storage and sequestration in shrublands. *Forests*, 5, 309–324.
- Marsh and McLennan. (2022). The Climate Action Navigator. Retrieved from <https://www.marshmclennan.com/insights/publications/2022/april/the-climate-action-navigator.html>
- Mendes, P.A., Coimbra, A.P., & de Almeida, A.T. (2023). Forest vegetation detection using deep learning object detection models. *Forests*, 14(1787).
- Ogawa, H., Yoda, K., Ogino, K., & Kira, T. (1965). Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. II. Plant biomass. *Plant Biomass*, 4, 49–80.
- Oumasst, A., Tioudji, F.E., Tabi, S., Zahidi, A., El Mousadik, A., El Finti, A., Aitlhaj, A., & Hallam, J. (2024). Development of allometric equations to determine the biomass of plant components and the total storage of carbon dioxide in young Mediterranean Argan trees. *Sustainability*, 16(4592).
- Papp, L., Van Leeuwen, B., Szilassi, P., Tobak, Z., Szatmári, J., Árvai, M., Mészáros, J., & Pásztor, L. (2021). Monitoring invasive plant species using hyperspectral remote sensing data. *Land*, 10(29).
- Penn State Extension. (2025). How Forests Store Carbon. Retrieved from <https://extension.psu.edu/how-forests-store-carbon>
- Pothong, T., Elliott, S., Chairuangsi, S., et al. (2022). New allometric equations for quantifying tree biomass and carbon sequestration in seasonally dry secondary forest in northern Thailand. *New Forests*, 53, 17–36.
- Repo, A., Rajala, T., Henttonen, H.M., Lehtonen, A., Peltoniemi, M., & Heikkinen, J. (2021). Age-dependence of stand biomass in managed boreal forests based on the Finnish National Forest Inventory data. *Forest Ecology and Management*, 498, 119507.



- Romero, F.M.B., Jacovine, L.A.G., Ribeiro, S.C., Torres, C.M.M.E., Silva, L.F.d., Gaspar, R.d.O., Rocha, S.J.S.S.d., Staudhammer, C.L., & Fearnside, P.M. (2020). Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the southwestern Amazon: A case study. *Forests*, 11(874).
- UNECE. (2025). Carbon Sinks and Sequestration. Retrieved from <https://unece.org/forests/carbon-sinks-and-sequestration>
- Uttaruk, Y., & Laosuwan, T. (2020). Methods of estimation for above-ground carbon stock in Nongbua-nonmee Community Forest, Maha Sarakham Province, Thailand. *Agriculture and Forestry*, 66, 183–195.
- Uttaruk, Y., Laosuwan, T., Sangpradid, S., Butthep, C., Rotjanakusol, T., Sittiwong, W., & Nilrit, S. (2024). Thailand's urban forestry programs are assisted by calculations of their ecological properties and economic values. *Land*, 13(1440).
- Vorster, A.G., Evangelista, P.H., Stovall, A.E.L., et al. (2020). Variability and uncertainty in forest biomass estimates from the tree to landscape scale: The role of allometric equations. *Carbon Balance and Management*, 15, 1–20.
- Wang, M., Xie, J., & Lyu, M. (2023). Forest soil carbon cycle in response to global change. *Forests*, 14(2242).