

บทความวิจัย

การประเมินความถูกต้องของการประมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินในสวนปาล์มน้ำมันด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับเชิงภูมิสารสนเทศ

จิรวัดณ์ จันทองพูน พรนรายณ์ บุญราศรี ญัฐภัทร ห้วนแจ่ม อิดารัตน์ ใหม่แก้ว ลักษิกา หมุดดิน และ ภูวิศะ กัมตัน*
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 3183 7350 อีเมล: mrphuvisa.k@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.007
รับเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2569 แก้ไขเมื่อ 30 มีนาคม 2569 ตอบรับเมื่อ 17 เมษายน 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 15 กันยายน 2569
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การประเมินปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินมีความสำคัญต่อการจัดทำบัญชีคาร์บอนและการทวนสอบคาร์บอนเครดิต ทั้งนี้ การวัดความสูงต้นไม้ภาคสนามมีข้อจำกัดในพื้นที่ที่มีเรือนยอดหนาแน่น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินความถูกต้องของวิธีการประมาณความสูงต้นปาล์ม น้ำมันและคาร์บอนเหนือพื้นดินในช่วงอายุที่แตกต่างกัน โดยใช้ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ การศึกษาดำเนินการในสวนปาล์มน้ำมันอายุ 6 ปี 8 ปี และ 10 ปี โดยมีจำนวนตัวอย่าง 39 54 และ 43 ต้น (รวม 136 ต้น) ใช้ข้อมูลภาพถ่ายร่วมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model; DSM) แบบจำลองภูมิประเทศ (Digital Terrain Model; DTM) และแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม (Canopy Height Model; CHM) และตรวจสอบความถูกต้องเปรียบเทียบกับค่าจากกล้องประมวลผลรวม ผลการศึกษาพบว่าแปลงอายุ 6 ปี และ 10 ปี มีความสอดคล้องในระดับดี ($R^2 = 0.703$ และ 0.731 ; RMSE = 0.972 และ 0.843 เมตร) ขณะที่แปลงอายุ 8 ปี มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุด (RMSE = 1.076 เมตร) จากการซ้อนทับของเรือนยอดและความไม่แน่นอนของแบบจำลองภูมิประเทศ ในด้านคาร์บอนพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง แม้อยู่ในช่วง 0.84–1.08 เมตร แต่ยังคงอยู่ในระดับยอมรับได้ และสามารถใช้สนับสนุนระบบ MRV และการประเมินคาร์บอนเครดิตในระดับแปลงได้

คำสำคัญ: คาร์บอนเหนือพื้นดิน ชีวมวลปาล์มน้ำมัน แบบจำลองความสูงทรงพุ่ม โฟโตแกรมเมตรีจากอากาศยานไร้คนขับ ระบบภูมิสารสนเทศจากอากาศยานไร้คนขับ

การอ้างอิงบทความ: จิรวัดณ์ จันทองพูน, พรนรายณ์ บุญราศรี, ญัฐภัทร ห้วนแจ่ม, อิดารัตน์ ใหม่แก้ว, ลักษิกา หมุดดิน และ ภูวิศะ กัมตัน*, “การประเมินความถูกต้องของการประมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินในสวนปาล์มน้ำมันด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับเชิงภูมิสารสนเทศ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 36, ฉบับที่ 4, หน้า 1–18, ต.ค.-ธ.ค. 2569. เลขที่บทความ 264-018343, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.007.



Research Article

Accuracy Assessment of Above-Ground Carbon Estimation in Oil Palm Plantations Using UAV-Based Geo-Information Technology

Jirawat Jantongpoon, Pornarai Boonrasi, Nutthaphat Hounjam, Thidarat Maikew, Laksika Muddeen and Phuwsa Kimtan*

Survey Engineering Program, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 3183 7350, E-mail: mrphuwsa.k@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.007

Received 10 February 2026; Revised 30 March 2026; Accepted 17 April 2026; Published online: 15 September 2026

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Accurate estimation of above-ground carbon is essential for carbon accounting and carbon credit verification. However, field-based tree height measurements are constrained in areas with dense canopy cover. This study aims to develop and evaluate the accuracy of a method for estimating oil palm tree height and above-ground carbon across different age classes Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) data. The study was conducted in oil palm plantations aged 6, 8, and 10 years in Phatthalung Province, Thailand, with sample sizes of 39, 54 and 43 trees, respectively (a total of 136 trees). UAV imagery combined with Global Navigation Satellite System (GNSS) data was used to generate a Digital Surface Model (DSM), Digital Terrain Model (DTM), and Canopy Height Model (CHM), and accuracy was assessed by comparison with total station measurements. The results indicate that the 6 year and 10 year plantations showed good agreement ($R^2 = 0.703$ and 0.731 ; $RMSE = 0.972$ and 0.843 m, respectively), whereas the 8-year plantation exhibited the highest error ($RMSE = 1.076$ m), mainly due to canopy overlap and uncertainties in the terrain model. In terms of carbon, the estimated values were 3,317.565, 10,362.015 and 8,761.218 kg C, with the highest value observed in the 8 year plantation. The findings suggest that although the height estimation errors ranged from 0.84 to 1.08 m, they remain within an acceptable level and can support MRV systems and plot-level carbon credit assessment.

Keywords: Above-Ground Carbon, Oil Palm Biomass, Canopy Height Model (CHM), UAV Photogrammetry, UAV-based GIS

Please cite this article as: J. Jantongpoon, P. Boonrasi, N. Hounjam, T. Maikew, L. Muddeen, and P. Kimtan, "Accuracy assessment of above-ground carbon estimation in oil palm plantations using uav-based geo-information technology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 4, pp. 1–18, Oct.–Dec. 2026 (in Thai), Art. no. 264-018343, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.007.

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในบรรยากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับโลก ส่งผลให้การประเมินคาร์บอนเหนือพื้นดินมีบทบาทสำคัญต่อการจัดทำบัญชีคาร์บอนและระบบตรวจวัด รายงาน และทวนสอบ (MRV) ในบริบทของประเทศไทยปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีพื้นที่ปลูกมากกว่า 6 ล้านไร่ โดยส่วนใหญ่กระจุกตัวในภาคใต้ และมีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนสูง เนื่องจากการเจริญเติบโตที่รวดเร็วและการสะสมชีวมวลอย่างต่อเนื่อง [1], [2] โดยมีรายงานว่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ $37.8\text{--}42.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์) [3] และอายุการให้ผลผลิตยาวนาน โดยทั่วไปการประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (Above-Ground Carbon; AGC) อาศัยสมการแอลโลเมตริก (Allometric Equation) ซึ่งเชื่อมโยงตัวแปรโครงสร้างของต้นไม้ เช่น ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และความหนาแน่นเนื้อไม้ กับมวลชีวภาพ [4], [5] ในกรณีของปาล์มน้ำมันตัวแปรความสูงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความต้องการของการประมาณค่าชีวมวล และปริมาณกักเก็บคาร์บอน แต่ทว่าวิธีการวัดความสูงภาคสนาม เช่น การใช้กล้องประมวลผลรวม แม้ให้ค่าความแม่นยำสูง [6]–[8] แต่มีข้อจำกัดด้านแรงงาน เวลา และความยากลำบากในการปฏิบัติงาน โดยเฉพาะในแปลงที่มีเรือนยอดหนาแน่นหรือมีการซ้อนทับของทรงพุ่ม ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเก็บข้อมูลในระดับพื้นที่ขนาดใหญ่

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายเชิงโฟโตแกรมเมตรีได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้าง

ของพืชพรรณอย่างแพร่หลาย โดยสามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิว แบบจำลองภูมิประเทศ และแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม เพื่อใช้ในการประมาณค่าความสูง และตัวแปรเชิงโครงสร้างของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่าการใช้ข้อมูล UAV สามารถให้ค่าความแม่นยำในระดับสูง (R^2 มากกว่า 0.7–0.9 และ RMSE ต่ำกว่า 1 เมตร) ในการประมาณความสูงและโครงสร้างเรือนยอดของพืช [9], [10] รวมถึงสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองประมาณมวลชีวภาพและคาร์บอนเหนือพื้นดินได้โดยตรง [10] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงทรงพุ่มจาก UAV ในการวิเคราะห์ลักษณะเชิงโครงสร้างของพืชพรรณในระบบนิเวศต่าง ๆ โดยแสดงให้เห็นว่าความแม่นยำของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับทั้งปัจจัยทางชีวภาพ เช่น รูปแบบเรือนยอด และปัจจัยทางเทคนิค เช่น รูปแบบการบิน ความสูงบิน และจำนวนภาพถ่ายที่ใช้ในการประมวลผล [11], [12] อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นในระบบป่าไม้หรือพื้นที่ปลูกป่าที่มีโครงสร้างเรือนยอดค่อนข้างสม่ำเสมอ ขณะที่การประยุกต์ใช้ในพืชสวนหรือพืชเศรษฐกิจแบบแปลงปลูก เช่น สวนปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีลักษณะเรือนยอดซ้อนทับกันอย่างหนาแน่นในบางช่วงอายุ ยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในด้านความแม่นยำของแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม และความไม่แน่นอนของแบบจำลองภูมิประเทศได้ทรงพุ่ม แม้ว่าจะงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงศักยภาพของแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ ในการประมาณชีวมวลและคาร์บอนเหนือพื้นดิน แต่การศึกษาส่วนใหญ่มักมีข้อจำกัด 3 ข้อ ได้แก่ 1) การประเมินความถูกต้องในระดับภาพรวมของพื้นที่โดยไม่แยกวิเคราะห์ตามช่วงอายุของพืช

2) การใช้อุปกรณ์ภาคสนามที่มีความแม่นยำจำกัดเป็นข้อมูลอ้างอิง และ 3) การขาดการวิเคราะห์เชิงระบบที่เชื่อมโยงโครงสร้างเรือนยอด การซ้อนทับของทรงพุ่มและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองภูมิประเทศกับความไม่แน่นอนของการประมาณคาร์บอนในระดับแปลงเพาะปลูก

ในการศึกษาของสวนปาล์มน้ำมันโครงสร้างเรือนยอดมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามช่วงอายุอย่างชัดเจน ตั้งแต่ระยะเรือนยอดโปร่งในช่วงอายุน้อยไปจนถึงระยะที่ทรงพุ่มซ้อนทับกันอย่างหนาแน่นในช่วงอายุกลาง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถของอัลกอริทึมในการตรวจจับตำแหน่งยอด และความถูกต้องของแบบจำลองภูมิประเทศได้ทรงพุ่ม ดังนั้นจึงเกิดคำถามสำคัญว่าความแม่นยำของการประมาณความสูง และปริมาตรกักเก็บคาร์บอนจากแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับมีความแตกต่างกันตามช่วงอายุของปาล์มน้ำมันหรือไม่ และความแตกต่างดังกล่าวมีผลต่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลในบริบท MRV เพียงใด จากช่องว่างทางองค์ความรู้ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาและนำเสนอกระบวนการประเมินความสูงต้นปาล์มน้ำมันด้วยข้อมูลจาก UAV ที่สามารถดำเนินการได้อย่างเป็นระบบในระดับแปลงเพาะปลูก 2) ตรวจสอบความถูกต้องของค่าความสูงจากแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ โดยเปรียบเทียบกับค่าความสูงอ้างอิงจากกล้องประมวลผลรวมในสวนปาล์มน้ำมันอายุ 6 ปี 8 ปี และ 10 ปี และ 3) ประเมินผลกระทบของความคลาดเคลื่อนด้านความสูงต่อการประมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินภายใต้สมการแอลโลเมตริกเพื่อเป็นแนวทางการบูรณาการเทคโนโลยี UAV, GNSS และ GIS [12]–[14] ที่นำเสนอในงานนี้มุ่งสนับสนุน

การประเมินกักเก็บคาร์บอนในระดับแปลงเพาะปลูก และพัฒนาการประยุกต์ใช้ข้อมูลภูมิสารสนเทศในงานคาร์บอนเครดิตและเกษตรแม่นยำในพืชยืนต้น

2. วิธีการทดลอง

2.1 เครื่องมือที่ใช้

2.1.1 อากาศยานไร้คนขับ รุ่น Phantom 4 Advanced กล้องดิจิทัลความละเอียด 20 ล้านจุดภาพ เซ็นเซอร์ขนาด 1 นิ้ว มีเซ็นเซอร์กันชนด้านหน้า รัศมีการบิน และส่งภาพไกลสูงสุด 7 กิโลเมตรบินได้นานสูงสุด 30 นาที

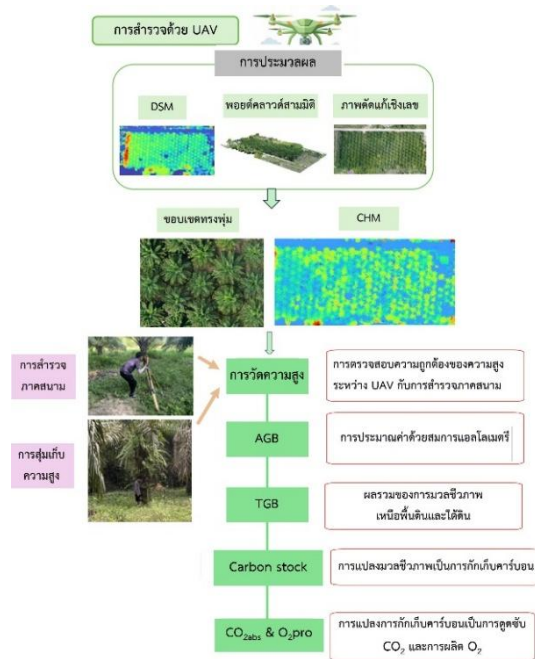
2.1.2 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ CHC รุ่น i80 เป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS สำหรับการสำรวจรังวัด รองรับสัญญาณ GNSS ได้ทุกระบบ (GPS Glonass Beidou และ Galileo) ในทุกคลื่นความถี่ (L1 L2 L5) ที่ให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งสูงถึงระดับ 1 ถึง 4 เซนติเมตร ใช้ในการรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน

2.1.3 กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ยี่ห้อ Topcon รุ่น ES-105 มีความละเอียดถูกต้องของการวัดมุม 5 พิลิปดา และสามารถอ่านค่ามุมสูงได้โดยอัตโนมัติเป็นระบบ Liquid Dual-Axis Compensator มีช่วงการทำงาน ± 3 ลิปดา สำหรับใช้รังวัดมุม และค่าระยะพร้อมโปรแกรมในการคำนวณค่าต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นเครื่องมืออ้างอิงมาตรฐานสำหรับวัดความสูงต้นไม้ [15]

2.2 วิธีการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความถูกต้องของการประมาณความสูงต้นปาล์มน้ำมัน และปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้ข้อมูลจาก UAV ร่วมกับการตรวจสอบภาคสนาม กระบวนการวิจัย

ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การกำหนดพื้นที่ศึกษา 2) การวัดความสูงต้นปาล์มภาคสนาม 3) การบินถ่ายภาพและสร้าง แบบจำลองความสูงทรงพุ่ม 4) การประเมินความถูกต้องของค่าความสูง และ 5) การคำนวณชีวมวลและปริมาณการกักเก็บคาร์บอน อัตราการดูดซับ CO₂ และการผลิต O₂ ดังแสดงในรูปที่ 1

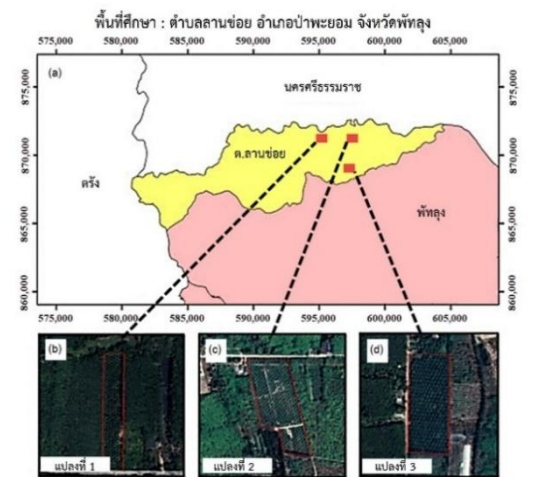


รูปที่ 1 ระเบียบวิธีการวิจัย

จากรูปที่ 1 เป็นรายละเอียดของระเบียบวิธีวิจัย ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียด ดังนี้

2.2.1 พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในตำบลลานข่อย อำเภอ ป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง ดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วยสวนปาล์มน้ำมันพันธุ์เทนเอร่า (Tenera) จำนวน 3 แปลง ซึ่งอยู่ในพื้นที่เดียวกันเพื่อควบคุมตัวแปรด้าน สายพันธุ์และสภาพแวดล้อม โดยแบ่งตามช่วงอายุ ได้แก่ 1) แปลงที่ 1 อายุ 6 ปี พื้นที่ประมาณ 11 ไร่ จำนวน 255 ต้น 2) แปลงที่ 2 อายุ 8 ปี พื้นที่ประมาณ 18 ไร่ จำนวน

357 ต้น และ 3) แปลงที่ 3 อายุ 10 ปี พื้นที่ประมาณ 16 ไร่ จำนวน 282 ต้น โดยคิดเป็นความหนาแน่นประมาณ 23.18, 19.83 และ 17.63 ต้นต่อไร่ หรือประมาณ 144.88, 123.94 และ 110.19 ต้นต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ พื้นที่ศึกษามีลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบถึงราบ ลูกคลื่นเล็กน้อย โดยมีความลาดชันไม่เกินร้อยละ 12 สภาพดินเป็นดินร่วนปนดินเหนียว และดินเหนียว (กลุ่ม ชุดดิน 26 26gm และ 53B) ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และ มีการระบายน้ำอยู่ในระดับดีถึงปานกลาง ซึ่งเหมาะสม ต่อการเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมัน ระยะปลูกของแต่ละแปลงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยแปลงที่ 1 และ แปลงที่ 3 ใช้ระยะปลูก 10 × 10 × 10 เมตร ขณะที่ แปลงที่ 2 ใช้ระยะปลูก 9.5 × 9.5 × 9.5 เมตร



รูปที่ 2 พื้นที่ศึกษา

2.2.2 การสุ่มตัวอย่างต้นปาล์มน้ำมัน การคัดเลือก ต้นปาล์มตัวอย่างในแต่ละแปลงดำเนินการโดยใช้วิธีการ สุ่มแบบเป็นระบบ (Systematic Sampling) เพื่อให้ ครอบคลุมพื้นที่แปลงอย่างสม่ำเสมอและลดอคติในการ เลือกตัวอย่าง โดยกำหนดจุดเริ่มต้นแบบสุ่ม (Random Starting Point) จากนั้นเลือกต้นปาล์มในตำแหน่งที่มี



ระยะห่างคงที่ตามแนวแถวปลูก โดยอ้างอิงจากระยะปลูกของแต่ละแปลง การสุ่มตัวอย่างครอบคลุมทั้งบริเวณขอบแปลงและภายในแปลง เพื่อสะท้อนความแปรผันของโครงสร้างเรือนยอดในระดับพื้นที่ โดยหลีกเลี่ยงต้นปาล์มที่มีลักษณะผิดปกติ เช่น ต้นที่ล้ม ต้นที่มีความเสียหายจากโรคหรือแมลง และต้นที่ถูกบดบังจากสิ่งปลูกสร้างหรือพืชชนิดอื่น เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความเป็นตัวแทนของสภาพแปลงปลูกจริง จำนวนต้นตัวอย่างในแต่ละแปลงถูกกำหนดให้สอดคล้องกับขนาดพื้นที่ และความหนาแน่นของต้นปาล์ม โดยมีจำนวน 39 54 และ 43 ต้น สำหรับแปลงอายุ 6 ปี 8 ปี และ 10 ปี ตามลำดับ ด้วยหลักการสุ่มตัวอย่างตามสัดส่วนประชากร

2.2.3 การกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) แต่ละแปลงกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินอย่างน้อย 4 จุด เพื่อใช้ในการปรับแก้เชิงพิกัดของภาพถ่าย UAV ให้มีความถูกต้องทางราบและทางตั้ง พิกัดอ้างอิงได้จากสถานีรับสัญญาณดาว (CORS) ของกรมที่ดิน ในระบบพิกัด WGS84 UTM Zone 47N โดยทำการรังวัดด้วยระบบ RTK Network เป็นเวลา 60 วินาที จำนวน 3 ครั้งต่อจุด ตามระเบียบกรมที่ดิน พ.ศ. 2558 [16]

2.2.4 การวัดความสูงต้นปาล์มน้ำมันภาคสนามด้วยกล้องประมวลผลรวม ซึ่งมีความแม่นยำเชิงมุมประมาณ ± 5 มิลลิปดา และความแม่นยำเชิงระยะประมาณ $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D)$ โดยที่ D คือ ระยะการวัด (เมตร) ในการสำรวจครั้งนี้ระยะการวัดเฉลี่ยจากจุดตั้งกล้องถึงต้นปาล์มอยู่ในช่วงประมาณ 10–50 เมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เครื่องมือสามารถให้ค่าความแม่นยำสูง และใช้ฟังก์ชัน Remote Elevation Measurement (REM) ซึ่งคำนวณความสูงจากระยะลาดและมุมติ่งตามสมการที่ (1) และ (2)

$$H_r = h_1 + h_2 \quad (1)$$

$$h_2 = S(\sin\theta z_1)(\cot\theta z_2) - S(\cos\theta z_1) \quad (2)$$

เมื่อ

H_r คือ ความสูงของวัตถุที่รังวัด (เมตร)

S คือ ระยะลาดจากแนวแกนกล้องไปยังจุดกึ่งกลางของเป้าสะท้อน (เมตร)

h_1 คือ ค่าความสูงจากพื้นดินไปยังจุดกึ่งกลางของเป้าสะท้อน (เมตร)

h_2 คือ ค่าความสูงจากเป้าสะท้อนไปยังปลายสูงสุดของวัตถุ (เมตร)

θz_1 คือ มุมติ่งจากแนวแกนกล้องไปยังจุดกึ่งกลางของเป้าสะท้อน

θz_2 คือ มุมติ่งจากแนวแกนกล้องไปยังปลายสูงสุดของวัตถุ

ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งต่อต้น จากตำแหน่งตั้งกล้องที่ต่างกัน แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นค่าความสูงอ้างอิง

2.2.5 การบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ดำเนินการถ่ายภาพด้วย UAV รุ่น Phantom 4 Advanced กำหนดระดับความสูงบินของแต่ละแปลงถูกปรับให้ค่า GSD ใกล้เคียงกัน แม้พื้นที่แปลงมีขนาดต่างกัน ซึ่งในแต่ละแปลงจะทำการบินเก็บข้อมูลทั้งหมด 3 ไฟท์ โดยมีมุมกล้องที่แตกต่างกัน คือ 90° 75° และ 60° ที่ทำให้สามารถมองเห็นทรงพุ่มของต้นปาล์มมากยิ่งขึ้น และรายละเอียดพารามิเตอร์อื่น ๆ แสดงในตารางที่ 1

2.2.6 การประมวลผลแบบจำลองพื้นผิว แบบจำลองภูมิประเทศ และแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากภาพถ่าย UAV ถูกประมวลผลในโปรแกรม Pix4D Mapper เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) และพอยต์คลาวด์สามมิติ ส่วนแบบจำลองภูมิประเทศสร้างขึ้นใหม่ในโปรแกรม QGIS โดยใช้เทคนิค

Ground Filtering ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) เพื่อสกัดเฉพาะจุดที่เป็นพื้นดิน จากนั้นการสร้างแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3 (ค) ด้วยสมการที่ (3)

$$CHM = DSM - DTM \quad (3)$$

การวัดความสูงต้นปาล์มจากแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม ใช้อัลกอริทึมจุดค่าสูงสุดเฉพาะที่ (Local Maxima Algorithm) เพื่อระบุตำแหน่งยอดเรือนยอด

2.2.7 การประเมินความถูกต้องของค่าความสูงจาก UAV ประเมินโดยเปรียบเทียบกับค่าความสูงจากกล้องประมวลผลรวม โดยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (*RMSE*) ดังสมการที่ (4) พร้อมคำนวณค่า Mean Absolute Error (MAE) และ Bias เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการประเมินค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าจริง

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (H_{UAV,i} - H_{TS,i})^2} \quad (4)$$

เมื่อ

$H_{UAV,i}$ คือ ความสูงการวัดด้วยแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ (เมตร)

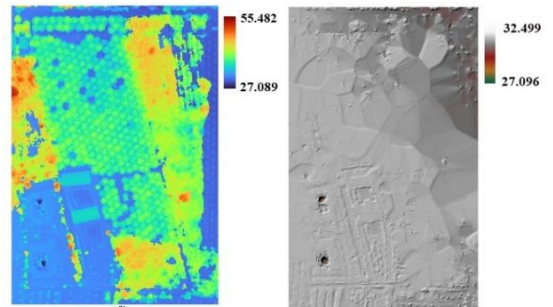
$H_{TS,i}$ คือ ความสูงการวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม (เมตร)

ตารางที่ 1 รายละเอียดการถ่ายภาพเชิงโฟโตแกรมเมตรีด้วยอากาศยานไร้คนขับ

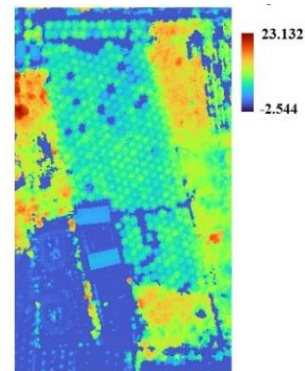
รายละเอียดการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ					
ลำดับ	รายละเอียด	แปลง 1	แปลง 2	แปลง 3	หน่วย
1	ความสูงบิน	130	140	110	เมตร
2	Overlap	80	80	80	ร้อยละ
3	Sidelap	70	70	70	ร้อยละ

ตารางที่ 1 รายละเอียดการถ่ายภาพเชิงโฟโตแกรมเมตรีด้วยอากาศยานไร้คนขับ (ต่อ)

รายละเอียดการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ					
ลำดับ	รายละเอียด	แปลง 1	แปลง 2	แปลง 3	หน่วย
4	GSD	3.35	3.31	3.23	ซม/จุดภาพ
5	รูปแบบการบิน	กริด			
6	GCP	5	6	4	จุด



(ก) แบบจำลองพื้นผิว (DSM) (ข) แบบจำลองภูมิประเทศ DTM)



(ค) แบบจำลองความสูงทรงพุ่ม (CHM)

รูปที่ 3 แบบจำลองพื้นผิว แบบจำลองภูมิประเทศแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ

2.2.8 มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (W_T) คำนวณจากสมการแอลโลเมตรี [17] ดังสมการที่ (5) และปริมาณ

คาร์บอนเหนือพื้นดิน (C_i) คำนวณจากสมการที่ (6) โดยใช้สัดส่วนคาร์บอนในเนื้อไม้แห้ง 41.3% [18], [19] และมวลชีวภาพใต้ดินประมาณด้วย Root-to-Shoot Ratio เท่ากับ 0.41 [18]

$$W_T = 0.666 + 12.82 (H)^{0.5} \ln (H) \quad (5)$$

$$C_i = W_T \times 0.413 \quad (6)$$

เมื่อ

W_T คือ มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)

H คือ ความสูงของต้นปาล์ม (เมตร)

C_i คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอน (กิโลกรัมคาร์บอน)

2.2.9 การแปลงค่าการกักเก็บคาร์บอนเป็นปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_{2abs}) คำนวณจากสมการที่ (7) และปริมาณการผลิออกซิเจน (O_{2pro}) คำนวณจากสมการที่ (8)

$$CO_{2abs} = \Sigma C_i \times 3.67 \quad (7)$$

$$O_{2pro} = \Sigma C_i \times 2.67 \quad (8)$$

โดยค่าคงที่ 3.67 และ 2.67 คำนวณได้จากอัตราส่วนมวลโมเลกุลของ CO_2/C และ O_2/C ตามลำดับ [20]

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย UAV

การประมวลผลภาพถ่าย UAV สำหรับแปลงอายุ 6 8 และ 10 ปี ตามลำดับ ภาพทั้งหมดผ่านการตรวจสอบคุณภาพเชิงเรขาคณิต และหลังการปรับแก้ด้วย GCP มีความคลาดเคลื่อนทางราบไม่เกิน ± 4 เซนติเมตร และทางตั้งไม่เกิน ± 6 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการสร้างแบบจำลองพื้นผิว และ

แบบจำลองความสูงทรงพุ่มในระดับแปลงเพาะปลูก ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการเก็บข้อมูล และการควบคุม GSD (3.23–3.35 เซนติเมตร/จุดภาพ) สามารถรักษาความสม่ำเสมอของความละเอียดเชิงพื้นที่ระหว่างแปลงที่มีขนาดแตกต่างกันได้ แสดงผลในรูปแบบแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศของแต่ละแปลงประกอบด้วยแปลงตัวอย่างของต้นปาล์ม ช่วงอายุ 6 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) ช่วงอายุ 8 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) และช่วงอายุ 10 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) ซึ่งแสดงลักษณะการจัดเรียงต้นปาล์ม ความหนาแน่นของเรือนยอด และสภาพแวดล้อมโดยรอบที่แตกต่างกันในแต่ละแปลง



(ก) แปลงตัวอย่างที่ 1

(ข) แปลงตัวอย่างที่ 2



(ค) แปลงตัวอย่างที่ 3

รูปที่ 4 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศของแปลงตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลการวัดความสูงของต้นปาล์มด้วยการสำรวจภาคสนาม

ลำดับ	N (m)	E (m)	Z (m)	S (m)	θ_{z1}	θ_{z2}	H_1 (m)	H_2 (m)	H_t (m)
P1-11	871320.506	595352.518	44.091	30.576	91.0053	86.5206	1.300	2.395	3.695
P1-16	871370.436	595351.904	42.609	54.180	89.4652	87.0733	1.500	2.264	3.764
P1-20	871409.666	595318.359	42.549	13.188	89.2136	82.2908	1.500	1.604	3.104
P1-35	871570.727	595325.304	39.547	22.909	92.2223	85.0839	1.300	2.857	4.157
P2-1	871212.811	597484.425	30.725	12.621	91.4945	65.3757	1.300	6.112	7.412
P2-24	871036.660	597601.514	31.136	44.137	89.4837	81.2913	1.300	6.363	7.663
P2-33	871138.918	597552.273	30.662	27.389	89.4554	78.1659	1.300	5.478	6.778
P2-54	871049.845	597606.119	30.854	51.661	90.2045	82.4107	1.300	7.068	8.368
P3-4	868293.920	596583.472	33.268	14.931	89.4441	65.4901	1.500	6.662	8.162
P3-26	868342.616	596517.838	33.236	48.406	89.5406	82.1046	1.500	6.325	7.825
P3-38	868278.697	596538.715	33.288	31.410	90.2401	77.2935	1.300	7.214	8.514
P3-43	868269.542	596543.899	33.421	16.206	89.1912	62.5758	1.300	8.179	9.479

3.2 ผลการวัดความสูงภาคสนามและรูปแบบการเจริญเติบโต

จากการสุ่มการวัดความสูงของต้นปาล์มน้ำมันในพื้นที่การศึกษาทั้ง 3 แปลง เพื่อนำข้อมูลการวัดไปคำนวณเฉลี่ยความสูงของต้นปาล์มน้ำมันประกอบด้วยแปลงตัวอย่างที่ 1 มีจำนวนตัวอย่าง 39 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) แปลงตัวอย่างที่ 2 มีจำนวนตัวอย่าง 54 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) แปลงตัวอย่างที่ 3 มีจำนวนตัวอย่าง 43 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) และตารางที่ 2

จากข้อมูลในตารางที่ 2 เป็นข้อมูลตัวอย่างการสำรวจภาคสนามประกอบด้วยข้อมูลพิกัดทางราบ และความสูงจากการวัดด้วยกล้องมุมผลรวม สามารถสรุปในภาพรวมได้ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าปาล์มในช่วงอายุ 6-8 ปี มีความสูงเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยจาก 3.91 เมตร เป็น 7.55 เมตร (+3.65 เมตร) หรือประมาณ 1.82 เมตร/ปี



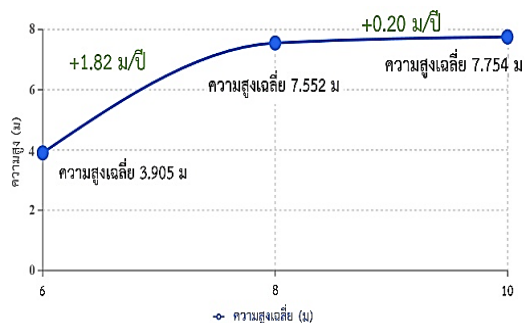
(ก) ตำแหน่งต้นปาล์ม แปลงตัวอย่างที่ 1 (ข) ตำแหน่งต้นปาล์ม แปลงตัวอย่างที่ 2



(ค) ตำแหน่งต้นปาล์มแปลงตัวอย่างที่ 3

รูปที่ 5 ตำแหน่งสุ่มของต้นปาล์มน้ำมันแต่ละแปลงตัวอย่าง

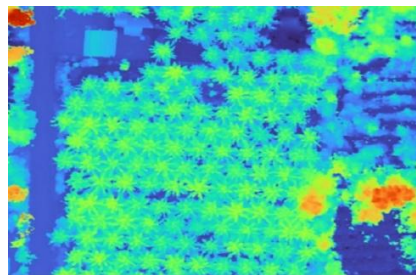
ถือเป็นช่วงเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ต่อมาในช่วงอายุ 8–10 ปี มีความสูงเพิ่มขึ้นจาก 7.55 เมตร เป็น 7.75 เมตร (+0.20 เมตร) หรือประมาณ 0.10 เมตร/ปี และช่วงเข้าสู่อายุโตเต็มที่และมีความเติบโตชะลอตัว จากข้อสังเกตพบว่าต้นปาล์มมีการเติบโตแบบ sigmoidal (S-curve) [21] ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แนวโน้มการเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นปาล์ม

3.3 ผลการวัดความสูงของต้นปาล์มจากแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม

ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) (แสดงความแตกต่างของความสูงด้วยโทนสี) ของแต่ละแปลงร่วมกับข้อมูลพอยต์คลาวด์สามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) (แสดงเรือนยอดของต้นปาล์ม) มาวัดความสูงของต้นปาล์มในแต่ละจุด ในพื้นที่แปลงศึกษาทั้ง 3 แปลง ผู้วิจัยได้ใช้อัลกอริทึมจุดค่าสูงสุดเฉพาะที่ [22] เทคนิคดังกล่าวสามารถกำหนดตำแหน่งของต้นปาล์มจากกลุ่มความสูงในบริเวณเดียวกันที่มีความสูงต่างจากระดับพื้นผิวภูมิประเทศ จากนั้นจะทำการเลือกจุดที่มีความสูงที่มากที่สุด (เรือนยอดของต้นปาล์มน้ำมัน) เมื่อเทียบกับจุดอื่น ๆ (ความสูงสัมผัส) ในขอบเขตทรงพุ่มเรือนยอดของปาล์ม และสำหรับบางจุดที่มีการซ้อนทับกันระหว่างเรือนยอดอาจใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มาร่วมในการวัด



(ก) แบบจำลองความสูงทรงพุ่ม



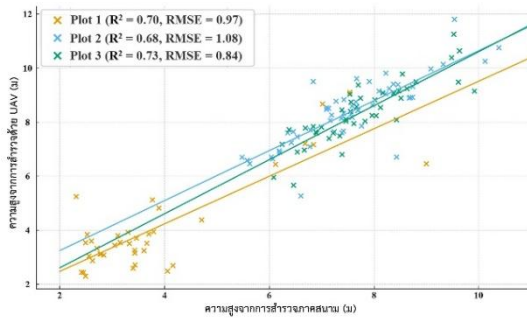
(ข) พอยต์คลาวด์สามมิติ

รูปที่ 7 แบบจำลองความสูงทรงพุ่ม และข้อมูลพอยต์คลาวด์สามมิติ โดย (ก) แบบจำลองความสูงทรงพุ่มที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิว แบบจำลองภูมิประเทศ และ (ข) พอยต์คลาวด์สามมิติของเรือนยอด

3.4 การตรวจสอบความถูกต้องระหว่างความสูงจากการสำรวจภาคสนามกับอากาศยานไร้คนขับ

การประเมินความถูกต้องของค่าความสูงต้นปาล์มน้ำมันที่ได้จากแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม ดำเนินการโดยเปรียบเทียบกับค่าความสูงอ้างอิงจากการรังวัดภาคสนามด้วยกล้องประมวลผลรวม ในแต่ละแปลงตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 8 และตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับสามารถประมาณค่าความสูงได้ในระดับที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) อยู่ในช่วง 0.684–0.731 และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองอยู่ในช่วง 0.843–1.076 เมตร ขึ้นอยู่กับช่วงอายุของปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 8 กราฟกระจายเปรียบเทียบความสูงต้นปาล์ม
น้ำมันจาก UAV และการวัดภาคสนาม (R^2)

ตารางที่ 3 การประเมินความถูกต้องของความสูงต้น
ปาล์มน้ำมันจาก UAV เทียบกับการวัด
ภาคสนามในช่วงอายุที่แตกต่างกัน

แปลง ตัวอย่าง	จำนวนส้ม (N)	R^2	RMSE (m)	MAE (m)	Bias (m)
Plot-1	39	0.703	0.972	0.706	+0.260
Plot-2	54	0.684	1.076	0.942	+0.829
Plot-3	43	0.731	0.843	0.737	+0.610

เมื่อพิจารณาแยกตามแปลงตัวอย่างพบว่าแปลง
อายุ 10 ปี ให้ค่าความแม่นยำดีที่สุด โดยมีค่า RMSE
เท่ากับ 0.843 เมตร และ R^2 เท่ากับ 0.731 ขณะที่
แปลงอายุ 8 ปี มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุด (RMSE
= 1.076 เมตร) แม้จะมีค่า R^2 ใกล้เคียงกับแปลงอื่น
ความแตกต่างดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากลักษณะ
โครงสร้างเรือนยอดที่อยู่ในช่วงเปลี่ยนผ่านของการ
เจริญเติบโต โดยแปลงอายุ 8 ปี มีการซ้อนทับของทรงพุ่ม
ในระดับสูงและมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรง ส่งผลให้
เกิดความยากในการจำแนกจุดพื้นดินออกจากจุดทรงพุ่ม
ในกระบวนการสร้างแบบจำลองภูมิประเทศ ซึ่งนำไปสู่
ความไม่แน่นอนของค่าระดับพื้นดิน และส่งผลต่อค่า
ความสูงจากแบบจำลองความสูงทรงพุ่มโดยตรง นอกจากนี้

การซ้อนทับของทางใบยังอาจทำให้การตรวจจับตำแหน่ง
ยอดเรือนยอด มีความคลาดเคลื่อนส่งผลให้ค่าความสูง
ถูกประเมินสูงเกินจริงในบางตำแหน่ง

ค่าความเอนเอียง (Bias) ในทุกแปลงมีค่าเป็นบวก
แสดงแนวโน้มที่แบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศ
ยานไร้คนขับ ประเมินค่าความสูงสูงกว่าค่าจริงเล็กน้อย
โดยเฉพาะในแปลงอายุ 8 ปี ซึ่งมี Bias สูงที่สุด ซึ่งอาจ
เกิดจากการตรวจจับตำแหน่งยอดเรือนยอดที่คลาด
เคลื่อนในพื้นที่ที่มีการซ้อนทับของทางใบอย่างหนาแน่น
ส่งผลให้ค่าจุดค่าสูงสุดเฉพาะที่ถูกประเมินสูงเกินจริง
นอกจากนี้ ความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลองภูมิประเทศ
ได้ทรงพุ่มที่หนาแน่นอาจมีส่วนทำให้ค่าความสูง
(แบบจำลองพื้นผิว-แบบจำลองภูมิประเทศ) สูงกว่า
ความเป็นจริง ในแปลงอายุ 6 ปี แม้โครงสร้างเรือนยอด
ยังไม่ซ้อนทับกันมาก แต่ค่าความคลาดเคลื่อนยังอยู่ใน
ระดับประมาณ 0.972 เมตร ซึ่งอาจเกิดจากความไม่
สม่ำเสมอของพื้นผิวดินและผลกระทบจากเงา (Shadow
Effect) ในช่วงเวลาบินถ่ายภาพ ขณะที่แปลงอายุ 10 ปี
แม้มีความหนาแน่นของเรือนยอดสูง แต่การจัดการสวน
และรูปทรงยอดที่ค่อนข้างเสถียรอาจช่วยให้การตรวจจับ
ตำแหน่งยอดมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลให้ค่า
RMSE ต่ำกว่าแปลงอายุ 8 ปี

โดยรวมแล้วผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบ
จำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ สามารถ
ประมาณค่าความสูงต้นปาล์มน้ำมันในระดับแปลง
เพาะปลูกได้ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับ
ยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้งานประเมินชีวมวล
และปริมาณกักเก็บคาร์บอน อย่างไรก็ตามความแม่นยำ
มีความแปรผันตามลักษณะโครงสร้างเรือนยอดในแต่ละ
ช่วงอายุ ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงทรงพุ่ม

จากอากาศยานไร้คนขับในสวนปาล์มน้ำมันควรพิจารณาปัจจัยด้านความซับซ้อนของทรงพุ่มและคุณภาพของแบบจำลองภูมิประเทศควบคู่กัน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการประเมินในเชิงปริมาณ ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9], [10] ที่พบว่าความแม่นยำของแบบจำลองความสูงทรงพุ่มมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างเรือนยอดและความหนาแน่นของพืช

3.5 ผลกระทบของความคลาดเคลื่อนด้านความสูงต่อคาร์บอน

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.4 ที่พบว่าแปลงอายุ 8 ปี มีค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงสูงที่สุด เนื่องจากการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในงานวิจัยนี้อาศัยสมการแอลโลเมตรีที่ใช้ความสูงเป็นตัวแปรหลักความคลาดเคลื่อนของค่าความสูงจากแบบจำลองแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ จึงส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของการประเมินคาร์บอน โดยเฉพาะเมื่อสมการมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งความสูงของต้นไม้ถูกนำไปอยู่ในรูปฟังก์ชันกำลังและลอการิทึม ทำให้ความคลาดเคลื่อนของความสูงไม่ได้ส่งผลในลักษณะเชิงเส้นต่อค่ามวลชีวภาพ แต่ถูกขยายผลตามรูปแบบของสมการ กล่าวคือ ความคลาดเคลื่อนของความสูงแม้เพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่ามวลชีวภาพเปลี่ยนแปลงในสัดส่วนที่สูงกว่า โดยเฉพาะในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับชีวมวลมีความชันสูง

ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า RMSE ของความสูงจาก UAV อยู่ในช่วง 0.84–1.08 เมตร หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 10–15 ของความสูงเฉลี่ยในแปลงอายุ 8 ปี เมื่อแทนค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวในสมการแอลโลเมตรี

พบว่าความไม่แน่นอนของมวลชีวภาพและคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่สูงกว่า โดยเฉพาะในช่วงอายุ 6–8 ปี ซึ่งเป็นระยะเร่งการเจริญเติบโตและมีความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับชีวมวลสูง

แปลงอายุ 8 ปีซึ่งมีค่า RMSE สูงที่สุด จึงแสดงความแปรปรวนของคาร์บอนมากกว่าแปลงอายุ 6 และ 10 ปี สะท้อนให้เห็นว่าความซับซ้อนของเรือนยอดมีผลทั้งต่อความแม่นยำของแบบจำลองความสูงทรงพุ่ม และต่อระดับความไม่แน่นอนของการประเมินคาร์บอนในเชิงปริมาณ โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงประมาณ ± 1 เมตร ในช่วงความสูงเฉลี่ย 7–8 เมตร อาจทำให้ค่ามวลชีวภาพและคาร์บอนเปลี่ยนแปลงราวร้อยละ 12–18 ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ข้อมูลในระบบตรวจวัด รายงาน และทวนสอบ โดยเฉพาะในระดับพื้นที่ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ผลลัพธ์ดังกล่าวยังชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับในงานประเมินคาร์บอนควรคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างเรือนยอดและช่วงอายุของพืชเป็นปัจจัยสำคัญ เพื่อควบคุมความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ในเชิงปริมาณ

3.6 ผลจากการวิเคราะห์ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นปาล์มน้ำมัน

การคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของต้นปาล์มน้ำมันดำเนินการโดยใช้ค่าความสูงที่ผ่านการปรับแก้และตรวจสอบความถูกต้องแล้วแทนค่าในสมการแอลโลเมตรี (สมการที่ (5) และ (6)) เพื่อประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และแปลงเป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอน ตามลำดับ ผลการคำนวณในระดับแปลงพบว่าแปลงอายุ 6 ปี (255 ต้น) มีปริมาณคาร์บอน

รวม 3,317.565 กิโลกรัมคาร์บอน แผลงอายุ 8 ปี (357 ต้น) มีปริมาณคาร์บอนรวม 10,362.015 กิโลกรัมคาร์บอน และแผลงอายุ 10 ปี (282 ต้น) มีปริมาณคาร์บอนรวม 8,761.218 กิโลกรัมคาร์บอน เมื่อพิจารณาในระดับต่อต้านพบว่าแผลงอายุ 6 ปี มีค่าคาร์บอนเฉลี่ย 13.010 กิโลกรัมคาร์บอนต่อต้น โดยมีความสูงเฉลี่ย 3.634 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) ขณะที่แผลงอายุ 8 ปี มีค่าคาร์บอนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 29.025 กิโลกรัมคาร์บอนต่อต้น และมีความสูงเฉลี่ย 7.401 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) ส่วนแผลงอายุ 10 ปี มีค่าคาร์บอนเฉลี่ย 31.068 กิโลกรัมคาร์บอนต่อต้น และมีความสูงเฉลี่ย 7.936 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9 (ค) ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนต่อต้านมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความสูงในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือ แม้ความสูงเฉลี่ยระหว่างอายุ 8 ปี และ 10 ปี เพิ่มขึ้นเพียงประมาณ 0.535 เมตร แต่ค่าคาร์บอนต่อต้านยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับรูปแบบการสะสมชีวมวลในช่วงเข้าสู่ระยะโตเต็มที่ของปาล์มน้ำมัน [21]

ในเชิงเปรียบเทียบแผลงอายุ 8 ปี ให้ค่าการกักเก็บคาร์บอนรวมสูงที่สุด เนื่องจากมีทั้งจำนวนต้นมากที่สุด และอยู่ในช่วงเร่งการสะสมชีวมวล แต่สำหรับแผลงอายุ 10 ปี มีค่าคาร์บอนเฉลี่ยต่อต้านสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าศักยภาพการสะสมคาร์บอนของต้นเดี่ยวเพิ่มขึ้นตามอายุแม้ความหนาแน่นของต้นในแปลงจะลดลงก็ตาม ประเด็นนี้สะท้อนว่าการประเมินคาร์บอนในระดับพื้นที่ควรพิจารณาทั้งโครงสร้างประชากรต้นไม้ และลักษณะการเจริญเติบโตเชิงสัณฐานวิทยาควบคู่กัน และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนกับความสูง ซึ่งแสดงผลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 10

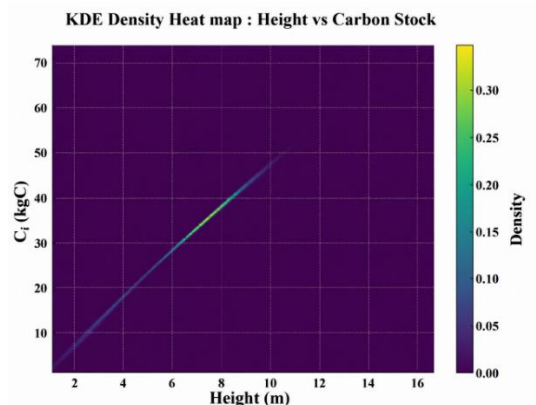


(ก) ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรายต้นของแปลงที่ 1 (ข) ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรายต้นของแปลงที่ 2



(ค) ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนรายต้นของแปลงที่ 3

รูปที่ 9 แผนที่ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของต้นปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 10 แผนภาพความหนาแน่นเชิงสถิติ (KDE) ของความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและปริมาณการกักเก็บคาร์บอน



จากรูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในลักษณะต่อเนื่อง โดยพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูงกระจุกตัวอยู่ในช่วงความสูงประมาณ 7-8 เมตร และค่าคาร์บอนประมาณ 33-38 กิโลกรัมคาร์บอนต่อตัน รูปแบบการกระจายตัวดังกล่าวแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงบวกที่ชัดเจนระหว่างความสูงและคาร์บอน โดยมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงในช่วงค่ากลาง และมีการกระจายตัวกว้างขึ้นในช่วงความสูงต่ำกว่า 4 เมตร ซึ่งอาจสะท้อนความแปรปรวนของการเจริญเติบโตในช่วงอายุน้อย การใช้ KDE ช่วยลดผลกระทบจากจุดข้อมูล outline และทำให้เห็นแนวโน้มเชิงโครงสร้างของข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสนับสนุนว่าความสูงเป็นตัวแปรทำนายที่มีประสิทธิภาพสำหรับการประมาณปริมาณคาร์บอนในสวนปาล์มน้ำมัน อย่างไรก็ตามจากผลในหัวข้อก่อนหน้านี้ความคลาดเคลื่อนของค่าความสูงจากแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ อาจส่งผลต่อการประมาณคาร์บอนในระดับที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะในช่วงอายุที่มีความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและชีวมวลสูง ดังนั้นการปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองความสูงและการรายงานค่าความไม่แน่นอนควบคู่กับค่าประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนจึงมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ข้อมูลในบริบทคาร์บอนเครดิตและระบบ MRV

3.7 การนำปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไปใช้ประโยชน์

ในพื้นที่แปลงตัวอย่างทั้ง 3 แปลง สำหรับการแปลงค่าการกักเก็บคาร์บอนเป็นการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และมีผลดังตารางที่ 4

การแปลงเพื่อหาค่าการผลิตออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) และมีผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 การแปลงค่าการกักเก็บคาร์บอนเป็นการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แปลงตัวอย่าง	จำนวน (ตัน)	ปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม คาร์บอน)	ปริมาณคาร์บอนใต้พื้นดิน (กิโลกรัม คาร์บอน)	ค่าคงที่มวล โมเลกุล	การดูดซับก๊าซ CO ₂ (กิโลกรัม คาร์บอนไดออกไซด์)
Plot-1	255	3,317.565	1,360.201	3.67	17,167.401
Plot-2	357	10,362.015	4,248.426		53,620.319
Plot-3	282	8,761.218	3,592.099		45,336.675

ตารางที่ 5 การแปลงค่าการกักเก็บคาร์บอนเป็นการผลิตออกซิเจน

แปลงตัวอย่าง	จำนวน (ตัน)	ปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม คาร์บอน)	ปริมาณคาร์บอนใต้พื้นดิน (กิโลกรัม คาร์บอน)	ค่าคงที่มวล โมเลกุล	การผลิต O ₂ (กิโลกรัม ออกซิเจน)
Plot-1	255	3,317.565	1,360.201	2.67	12,489.635
Plot-2	357	10,362.015	4,248.426		39,009.878
Plot-3	282	8,761.218	3,592.099		32,983.356

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากข้อมูลอากาศยานไร้คนขับสามารถนำมาใช้ประเมินความสูงต้นปาล์มน้ำมันในระดับแปลงเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถสะท้อนรูปแบบการสะสมชีวมวลตามช่วงอายุได้อย่างสอดคล้อง โดยค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงจากแบบจำลองความสูงทรงพุ่มจากอากาศยานไร้คนขับ (RMSE $\approx$ 0.84-1.08 เมตร) อยู่ในช่วงเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 1 เมตร ความคลาดเคลื่อน

ดังกล่าวมีสาเหตุหลักจากความซับซ้อนของโครงสร้างเรือนยอดในแต่ละช่วงอายุ โดยเฉพาะการซ้อนทับของทรงพุ่ม ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองภูมิประเทศ และการตรวจนับตำแหน่งยอดเรือนยอด รวมถึงข้อจำกัดของข้อมูลภาพถ่าย UAV ทั้งในด้านความละเอียดและมุมมองของการถ่ายภาพ ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง

นอกจากนี้แม้ค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงจะอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่สามารถส่งผลกระทบต่อปริมาณชีวมวลและปริมาณคาร์บอนในลักษณะขยายผลตามสมการแอลโลเมตรี ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นการทำความเข้าใจกลไกดังกล่าวมีความสำคัญต่อการตีความผลลัพธ์และการประเมินความไม่แน่นอนของคาร์บอนในเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลองภูมิประเทศภายใต้ทรงพุ่มหนาแน่น ความไวของผลลัพธ์ต่อความละเอียดของข้อมูล UAV และข้อจำกัดในการตรวจนับตำแหน่งยอดเรือนยอดในพื้นที่ที่มีโครงสร้างพืชซับซ้อน ในเชิงประยุกต์แนวทางที่นำเสนอสามารถใช้สนับสนุนการติดตามการกักเก็บคาร์บอนของพืชยืนต้นในระดับแปลง และมีศักยภาพในการขยายผลสู่ระดับพื้นที่ หากมีการกำหนดขั้นตอนการควบคุมคุณภาพข้อมูลและการรายงานความไม่แน่นอนอย่างเป็นระบบสำหรับการพัฒนาในอนาคต ควรมีการบูรณาการข้อมูลจากแหล่งอื่น เช่น LiDAR หรือข้อมูลหลายช่วงเวลา รวมถึงการปรับปรุงอัลกอริทึมในการจำแนกจุดพื้นดิน และการตรวจนับตำแหน่งยอดเรือนยอด เพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลองในพื้นที่ที่มีโครงสร้างเรือนยอดซับซ้อน ผลการศึกษานี้จึงมีนัยสำคัญต่อการพัฒนาแนวทาง MRV ที่มีความน่าเชื่อถือในพืชเศรษฐกิจ และ

การประเมินคาร์บอนเชิงพื้นที่ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ได้สนับสนุนงบวิจัยรายได้ รหัสโครงการ 202858 และสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือสำรวจ และทรัพยากรสำหรับใช้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Migolet, K. Goïta, A. Ngomanda, and A. P. M. Biyogo, "Estimation of aboveground oil palm biomass in a mature plantation in the Congo Basin," *Forests*, vol. 11, no. 5, May 2020, Art. no. 544, doi: 10.3390/f11050544.
- [2] D. J. Murphy, "Carbon sequestration by tropical trees and crops: A case study of oil palm," *Agriculture*, vol. 14, no. 7, Jul. 2024, Art. no. 1133, doi: 10.3390/agriculture14071133.
- [3] N. Khasanah, M. van Noordwijk, and H. Ningsih, "Aboveground carbon stocks in oil palm plantations and the threshold for carbon-neutral vegetation conversion on mineral soils," *Cogent Environmental Science*, vol. 1, no. 1, Dec. 2015, Art. no. 1119964, doi: 10.1080/23311843.2015.1119964.
- [4] B. Liu, W. Bu, and R. Zang, "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of younger secondary tropical forests," *Global Ecology and Conservation*, vol. 41, Jan.



- 2023, Art. no. e02359, doi: 10.1016/j.gecco.2022.e02359.
- [5] E. Alvarez, A. Duque, J. Saldarriaga, K. Cabrera, G. de las Salas, I. del Valle, A. Lema, F. Moreno, S. Orrego, and L. Rodríguez, "Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia," *Forest Ecology and Management*, vol. 267, pp. 297–308, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.for-eco.2011.12.013.
- [6] T. Ma, C. Zhang, L. Ji, Z. Zuo, M. Beckline, Y. Hu, X. Li, and X. Xiao, "Development of forest aboveground biomass estimation, its problems and future solutions: A review," *Ecological Indicators*, vol. 159, Feb. 2024, Art. no. 111653, doi: 10.1016/j.ecolind.2024.111653.
- [7] F. Gonçalves, R. Treuhaft, B. Law, A. Almeida, W. Walker, A. Baccini, J. R. D. Santos, and P. Graça, "Estimating aboveground biomass in tropical forests: Field methods and error analysis for the calibration of remote sensing observations," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 1, Jan. 2017, Art. no. 47, doi: 10.3390/rs9010047.
- [8] T. Huynh, D. J. Lee, G. Applegate, and T. Lewis, "Field methods for above and belowground biomass estimation in plantation forests," *MethodsX*, vol. 8, 2021, Art. no. 101192, doi: 10.1016/j.mex.2020.101192.
- [9] X.-L. Jin, Y. Liu, and X.-B. Yu, "UAV-RGB-image-based aboveground biomass equation for planted forest in semi-arid inner Mongolia, China," *Ecological Informatics*, vol. 81, Jul. 2024, Art. no. 102574, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102574.
- [10] R. Juan-Ovejero, A. Elghouat, C. J. Navarro, M. P. Reyes-Martin, M. N. Jiménez, F. B. Navarro, D. Alcaraz-Segura, and J. Castro, "Estimation of aboveground biomass and carbon stocks of *Quercus ilex* L. saplings using UAV-derived RGB imagery," *Annals of Forest Science*, vol. 80, no. 1, Nov. 2023, Art. no. 44, doi: 10.1186/s13595-023-01210-x.
- [11] J. Lin, M. Wang, M. Ma, and Y. Lin, "Aboveground tree biomass estimation of sparse subalpine coniferous forest with UAV oblique photography," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 11, Nov. 2018, Art. no. 1849, doi: 10.3390/rs10111849.
- [12] L. Pádua, P. Marques, T. Adão, J. Hruška, E. Peres, R. Morais, A. Sousa, and J. J. Sousa, "UAS-based imagery and photogrammetric processing for tree height and crown diameter extraction," in *Proceedings of the International Conference on Geoinformatics and Data Analysis (ICGDA'*

- 18), *Association for Computing Machinery, New York, NY, USA*, 2018, pp. 87–91. doi: 10.1145/3220228.3220241.
- [13] A. Almeida, F. Gonçalves, G. Silva, R. Souza, R. Treuhaft, W. Santos, D. Loureiro, and M. Fernandes, “Estimating structure and biomass of a secondary Atlantic forest in Brazil using fourier transforms of vertical profiles derived from UAV photogrammetry point clouds,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 21, Oct. 2020, Art. no. 3560, doi: 10.3390/rs12213560.
- [14] A. L. M. Shin, W. Chen, T. Okuda, H. L. Sim, T. H. Tam, and W. C. Chew, “Performance analysis of forest canopy height model generated from UAV and InSAR”, *Journal of Advanced Geospatial Science & Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 86–105, Mar. 2024, doi: 10.11113/jagst.v4n1.88.
- [15] C. Li, J. Wang, S. Zhu, Z. Cui, L. Fang, and L. Sun, “Development and testing of a tree height measurement device,” *Forests*, vol. 16, no. 9, Sep. 2025, Art. no. 1464, doi: 10.3390/f16091464.
- [16] Department of Lands.(2015). Regulation of the department of lands on real-time kinematic (rtk network) surveying for specific cadastral tasks, B.E. 2558. Ministry of Interior, Bangkok, Thailand, 2015. [Online]. Available: <https://www.dol.go.th/media/716929789247754240/migration/2025/10/rKV4Wh2QcJimNoz5kafwDsA9.pdf> (in Thai).
- [17] T. Pearson, S. Walker, and S. Brown, “Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects,” *Washington, DC: World Bank*, 2013.
- [18] Handbook of tree species potential for promotion under the forest-sector Clean Development Mechanism (CDM) project, 1st ed., Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok, Thailand: Aksorn Siam Printing, 2011 (in Thai).
- [19] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). IPCC. Geneva, Switzerland. [Online]. Available: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- [20] S. N. Singkran, “Research report on carbon sequestration and oxygen production of urban park trees in Bangkok for sustainable city development and CO₂ emission reduction,” *Asia Research Center, Korea Foundation for Advanced Studies at Chulalongkorn niversity, Bangkok, Thailand, Rep.*, 2021 (in Thai).
- [21] J. Prommarat, “Growth and yield of oil palm under soil management using high-quality organic fertilizer,” *Land Development Department, Bangkok*,



Thailand, 2013 (in Thai).

- [22] M. Mohan, C. A. Silva, C. Klauberg, P. Jat, G. Catts, A. Cardil, A. T. Hudak, and M. Dia, "Individual tree detection from Unmanned

Aerial Vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest," *Forests*, vol. 8, no. 9, Sep. 2017, Art. no. 340, doi: 10.3390/f8090340.