

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าเบญจพรรณและเต็งรังด้วย ข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับและภูมิสารสนเทศ

ติณณ์ ธีรกุลโตมร^{1*}, อธิวัฒน์ ภิญโญยาง¹ และ วิลาวรรณ ประสมทรัพย์²

Above Ground Carbon Stock Estimation of Mixed Deciduous and Dry Dipterocarp Forest using Unmanned Aerial Vehicle Imagery and Geoinformatics

Tinn Thirakultomorn^{1*}, Athiwat Phinyoyang¹ and Wilawan Prasomsup²

¹ Faculty of Railway systems and Transportation. Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000

² Faculty of Engineering and Technology. Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000

* Corresponding author: Tinn.th@rmuti.ac.th

Received: March 24, 2023; Revised: May 15, 2023; Accepted: May 18, 2023

บทคัดย่อ

ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับถูกประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายประเภท โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายออร์โธ แบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข และแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข เช่นเดียวกันกับการศึกษานี้เป็นการบูรณาการข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับร่วมกับเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ การสำรวจและสร้างข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ และการพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าเบญจพรรณและเต็งรังด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย ตัวแปรตาม ได้แก่ ข้อมูลการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน และตัวแปรต้น ได้แก่ ข้อมูลค่าการสะท้อนแสงของข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับแบบหลายช่วงคลื่น คือ ช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (Blue) สีเขียว (Green) สีแดง (Red) ขอบสีแดง (Red edge) อินฟราเรดใกล้ (Near infrared) และข้อมูลค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณแบบนอร์มอลไลซ์ (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าเบญจพรรณและเต็งรังในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ค่า NDVI และแบบจำลองการประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เท่ากับ $“(2,293.12 \times \text{NDVI}) + 35.14”$ โดยมีค่า R^2 อยู่ที่ 71.5% ทั้งนี้ ผลการประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ศึกษา มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 31.72 ตัน/ไร่ และมีค่า RMSE เท่ากับ 3.99 ตัน/ไร่

คำสำคัญ: การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน, ข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ, ภูมิสารสนเทศ, การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

¹ คณะระบบรางและการขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

Abstract

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery was mainly applied to many missions, especially orthophotograph, digital surface model (DSM), and digital terrain model (DTM). This study integrated UAV data, Geoinformatics, and Multiple linear regression analysis into above ground carbon stock (AGC) estimation. The study's objectives were surveying with UAV and data processing of orthophoto and developing AGC estimation of mixed deciduous and dry dipterocarp forest with multiple linear regression analysis. The factors used in the study were dependent variables (carbon stock data) and independent variables (UAV imagery including blue, green, red, red edge and near infrared bands, and normalized difference vegetation index (NDVI)). As a result, the factor related to AGC was NDVI. The AGC model was “ $AGC = (2,293.12 \times NDVI) + 35.14$ ” with R^2 of 71.5%. The AGC value of the study area averaged about 31.72 tons/rai with RMSE of 3.99 tons/rai.

Keywords: Above Ground Carbon Stock, UAV imagery, Geoinformatics, Multiple Regression Linear Analysis

บทนำ

ป่าไม้เป็นสิ่งปกคลุมดินที่มีบทบาทสำคัญในการหมุนเวียนคาร์บอน (Carbon Cycle) ทั่วโลก เนื่องจากเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนขนาดใหญ่ที่ทั้งกักเก็บและปลดปล่อยคาร์บอนสู่ชั้นบรรยากาศ (Muukkonen and Heiskanen, 2007) วงจรคาร์บอนของภาคป่าไม้ คือ กระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสง และในกระบวนการเติบโตจะเปลี่ยนก๊าซให้เป็นคาร์บอนที่เป็นของแข็งซึ่งประกอบเป็นเปลือกไม้ เนื้อไม้ ใบไม้ และรากของต้นไม้ เมื่อต้นไม้ถูกตัดและเผาหรือปล่อยทิ้งให้ย่อยสลาย คาร์บอนที่เป็นของแข็งทางเคมีจะเปลี่ยนกลับเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่บรรยากาศ (Virgillo and Marshall, 2009) สำหรับประเทศไทยประเด็นเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจกถูกบรรจุอยู่ในยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. 2561–2580) ทั้งการสร้างการเติบโตอย่างยั่งยืนบนสังคมเศรษฐกิจสีเขียวด้วยการรักษาและเพิ่มพื้นที่สีเขียวที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และการสร้างการเติบโตอย่างยั่งยืนบนสังคมที่เป็นมิตรต่อสภาพภูมิอากาศ โดยการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2561) กล่าวโดยสรุป คือ ประเด็นนี้เกี่ยวข้องกับการสงวนรักษาพื้นที่สีเขียวทั้งด้านปริมาณและความสมบูรณ์ เพื่อประโยชน์ในการดูดซับก๊าซเรือนกระจกและการเพิ่มพื้นที่สีเขียวที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จากความสำคัญของป่าไม้ในด้านการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นหาวิธีการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของป่าไม้ ซึ่งปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าไม้จำนวนมาก คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC, 2006) ได้กำหนดแหล่งสะสมคาร์บอนในต้นไม้และดินออกเป็น 5 แหล่ง ได้แก่ แหล่งสะสมคาร์บอนเหนือพื้นดิน ใต้ดิน ไม้ยืนต้นตาย ซากพืช และในดิน โดยแหล่งสะสมคาร์บอนที่สำคัญที่สุดและมีการเปลี่ยนแปลงได้มากที่สุด คือ แหล่งสะสมคาร์บอนเหนือพื้นดิน ทั้งนี้ปริมาณคาร์บอนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ามวลชีวภาพ (Biomass) ที่เป็นค่ามวลรวมขององค์ประกอบทุกส่วนของต้นไม้ หรือน้ำหนักแห้งของพืชที่กำหนดต่อหน่วยพื้นที่ (พงษ์ศักดิ์, 2538 และ อุทิศ, 2542) ซึ่งมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในที่นี้จะน้ำหนักหรือมวลทั้งลำของต้นไม้ต้นหนึ่งหรือหลายต้นในพื้นที่ที่กำหนด น้ำหนักทั้งลำของต้นไม้ ได้แก่ ลำต้น กิ่ง ก้าน และใบ ทั้งนี้ไม่รวมถึงราก และตอที่เหลืออยู่หลังจากที่ตัดต้นไม้แล้ว (Edwards and Grubb, 1977) ดังนั้น ข้อมูลลักษณะทางกายวิภาคของต้นไม้ จึงสามารถนำไปใช้ในการประเมินค่าปริมาณมวลชีวภาพของต้นไม้ได้ โดยอาศัยสมการ Allometry ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและลักษณะโครงสร้างของ

ต้นไม้ ซึ่งลักษณะโครงสร้างต้นไม้สามารถวัดได้จากการสำรวจข้อมูลในภาคสนาม และคำนวณชีวภาพสามารถคำนวณเป็นค่าการกักเก็บคาร์บอนได้โดยการคูณด้วยค่าคงที่ 0.47 (Carbon conversion factor) (IPCC, 2006, Valli et al., 2014)

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชุมชน ซึ่งเป็นผืนป่าขนาดเล็กและพบกระจายอยู่ทั่วไปในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่มีความละเอียดสูงและทันสมัย และเลือกใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศมาเป็นเครื่องมือในการศึกษาและประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีเชิงพื้นที่ที่มีความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล อีกทั้งยังมีความเหมาะสมต่อการสำรวจและติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ได้เป็นอย่างดี

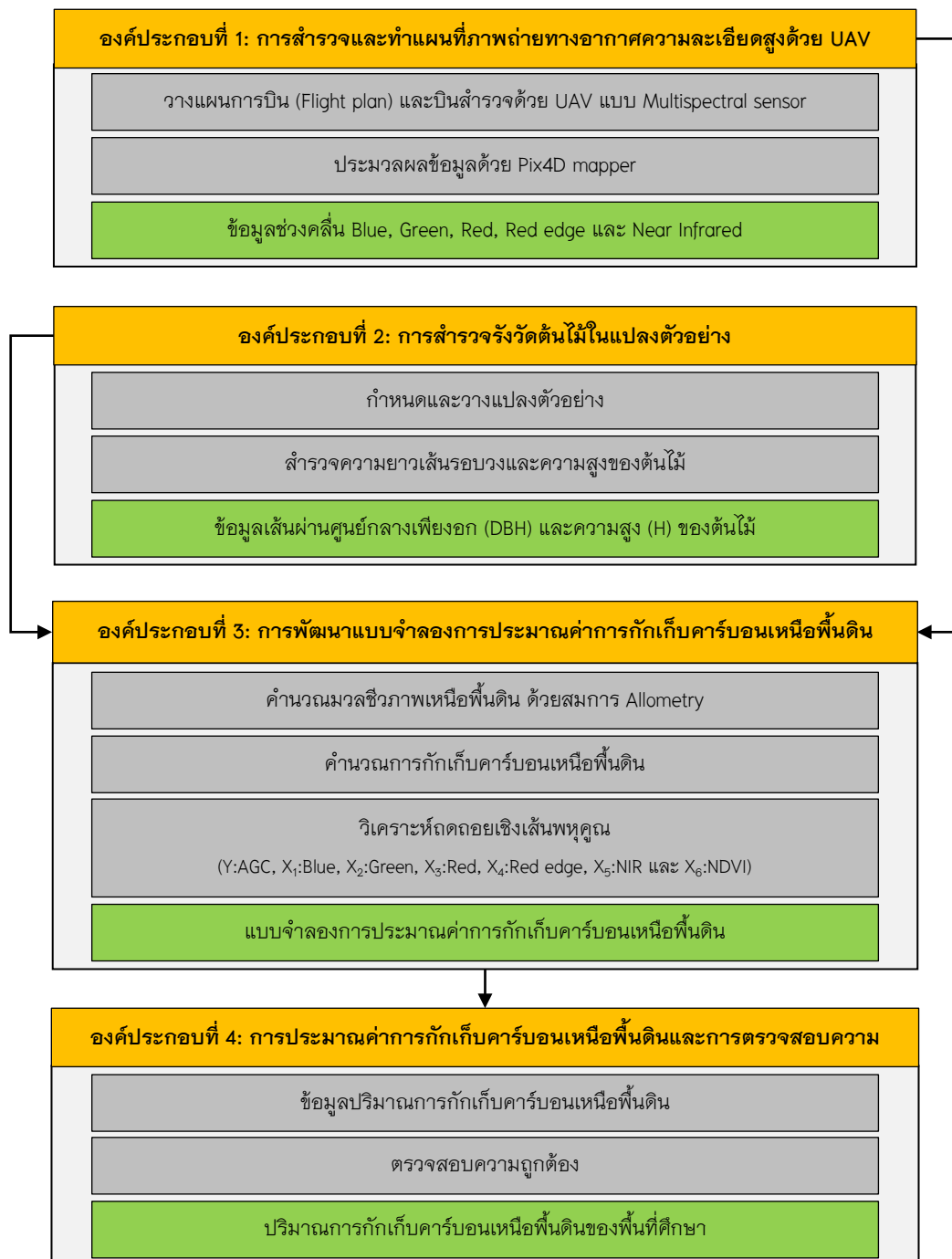
ท้ายที่สุดเป้าหมายของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาต้นแบบการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนและการจัดการป่าชุมชนอย่างยั่งยืนบนพื้นฐานของความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูล และเป็นต้นแบบที่สามารถทำให้การดำเนินการตามยุทธศาสตร์ชาติในเรื่องการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสำรวจและสร้างข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินด้วยอากาศยานไร้คนขับและภูมิสารสนเทศ มีวิธีการดำเนินการเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา แบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) การสำรวจและทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูงด้วยอากาศยานไร้คนขับ (2) การสำรวจจริงวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง (3) การพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน และ (4) การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินและการตรวจสอบความถูกต้อง โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การสำรวจและทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูงด้วยอากาศยานไร้คนขับ

การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) เป็นเครื่องมือที่สามารถบันทึกภาพถ่ายทางอากาศได้ในวันและเวลาที่ผู้วิจัยกำหนด ในการศึกษาครั้งนี้ใช้อากาศยานไร้คนขับรุ่น Phantom 4 RTK (Real Time Kinematics หรือการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์โดยทันที) กล้องบันทึกภาพแบบ Multispectral เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งสูง และให้ข้อมูลภาพถ่ายหลายช่วงคลื่น ประกอบด้วย ช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (Blue) สีเขียว (Green) สีแดง (Red) ขอบสีแดง (Red edge) และอินฟราเรดใกล้ (Near infrared, NIR) สำหรับช่วงคลื่น Red

และ NIR สามารถประยุกต์ใช้ศึกษาเรื่องพืชพรรณได้เป็นอย่างดี โดยพืชพรรณที่สมบูรณ์จะมีคลอโรฟิลล์ในใบไม้เป็นองค์ประกอบหลักที่ดูดกลืนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่น Red และมีโครงสร้างเซลล์ของใบไม้สะท้อนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่น NIR ได้สูง พืชต่างชนิดหรือพืชชนิดเดียวกันที่มีความสมบูรณ์ต่างกันจะสะท้อนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในสัดส่วนที่ต่างกัน พืชพรรณที่สมบูรณ์จะมีค่าสะท้อนในช่วงคลื่น NIR สูงกว่าช่วงคลื่น Red พืชพรรณที่ไม่สมบูรณ์จะมีค่าสะท้อนในช่วงคลื่น NIR ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าช่วงคลื่น Red

สำหรับการวางแผนการบิน กำหนดให้มีความสูงบินที่ให้ค่าระยะพื้นต่อจุดภาพ (Ground Sample Distance: GSD) เท่ากับ 8 เซนติเมตร กำหนดส่วนซ้อนของภาพประชิดในแนวนอน ไม่น้อยกว่า 75% ส่วนเกยของภาพระหว่างแนวนอนที่ประชิดกัน ไม่น้อยกว่า 60% กำหนดรูปแบบการบินแบบ Polygon เพื่อให้มีความยืดหยุ่นตามขอบเขตพื้นที่ศึกษา และใช้โหมดการบันทึกภาพ (Trigger mode) แบบ Equal distance หรือบินแล้วหยุดถ่ายทุก ๆ จุดกึ่งกลางภาพตามพื้นที่ของส่วนซ้อนที่กำหนด โดยทำการบินสำรวจวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2565

การประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อสร้างแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูง อาศัยซอฟต์แวร์ Pix4D mapper ในการประมวลผลข้อมูลภาพและพอยต์คลาวด์ (Point cloud) เพื่อสร้างข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) Initial Processing เป็นการคำนวณตำแหน่งของภาพ การปรับแก้ การจับคู่ภาพ เพื่อสร้างจุดโยงยึดสำหรับเชื่อมจุดภาพแบบอัตโนมัติ (Auto Tie Point) และการโยงยึดค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point, GCP) เพื่อให้ซอฟต์แวร์คำนวณปรับแก้จุดโยงยึดให้ถูกต้อง (2) Point Cloud and Mesh เป็นขั้นตอนการสร้างพอยต์คลาวด์ โดยการเพิ่มจำนวนของจุดโยงยึด และการสร้างข้อมูลพื้นผิวแบบเวกเตอร์ (Mesh Model) จากพอยต์คลาวด์ เพื่อใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ (Digital Surface Model, DSM) และ (3) Orthomosaic and Index เป็นขั้นตอนการสร้าง DSM ในรูปแบบราสเตอร์ และการสร้างภาพออร์โธจิง (True Orthophoto) เป็นการนำข้อมูล DSM และ DTM มาประมวลผลแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิตรวมทั้งการผสมสีภาพเข้าด้วยกันโดยวิธีโมเสก (Mosaic) และทำการแก้ไขสีของวัตถุภายในภาพ (ชาติชาย, 2563)

การสำรวจจริงวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่ป่าโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืช (อพ.สธ.) หนองระเวียง ตั้งอยู่ในพื้นที่ศูนย์การศึกษาหนองระเวียง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประกอบด้วยป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรัง มีพื้นที่ทั้งหมด 1,135 ไร่ การสำรวจจริงวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง ขนาด 5x5 เมตร จำนวน 40 แปลง โดยแปลงตัวอย่างกำหนดให้มีการกระจายตัวแบบสุ่มอย่างมีระบบ (Systematic sampling) เป็นวิธีการสุ่มตัวอย่างให้ทั่วพื้นที่ศึกษาอย่างสม่ำเสมอ (Congalton, 1988 อ้างถึงใน สุวิทย์, 2559) จากนั้นใช้เครื่องกำหนดพิกัดแบบพกพา (Handheld GPS) และเข็มทิศในการหาตำแหน่งและวางแปลงตัวอย่างในพื้นที่จริง ใช้หมุดและเชือกเพื่อกำหนดขอบเขตแปลงตัวอย่าง สำหรับการสำรวจวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง เป็นการสำรวจจริงวัดขนาดเส้นรอบวงของต้นไม้ในหน่วยเซนติเมตร ณ ความสูงเพียงอก หรือประมาณ 1.3 เมตร จากพื้นดิน เพื่อนำมาคำนวณค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ (Diameter at Breast height, DBH) ด้วยเทปวัดขนาดต้นไม้ (Diameter Tape) ส่วนการสำรวจจริงวัดความสูงของต้นไม้ (Tree height, H) ในหน่วยเมตร อาศัยกล้องวัดความสูงต้นไม้ (Laser Meter) ทั้งนี้ ต้นไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตรขึ้นไปจะต้องถูกรังวัดทุกต้น โดยที่ค่า DBH และ H ที่ได้จากการตรวจวัดจะนำไปใช้ในสมการ Allometry

การพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

การพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เป็นการพัฒนาจากวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นค่าที่แสดงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูล จำนวน 70% ของแปลงตัวอย่างทั้งหมดในการพัฒนาแบบจำลอง การศึกษาได้กำหนดตัวแปรตาม (Dependent Variable) คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินในแปลงตัวอย่าง ส่วนตัวแปรต้น (Independent Variable) คือ ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูง ช่วงคลื่น Blue, Green, Red, Red edge, Near Infrared และดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอร์มอลไลซ์ (NDVI) ซึ่งเป็นดัชนีที่คำนวณจากสัดส่วนความแตกต่างระหว่างช่วงคลื่น Red และ NIR ดัชนี NDVI นี้สามารถแสดงผลความสมบูรณ์ของพืชพรรณที่ปกคลุมในพื้นที่ได้ ซึ่งนิยมใช้ดัชนีนี้กับการประเมินความสมบูรณ์ของพืชพรรณและโครงสร้างสิ่งปกคลุมบนพื้นผิวโลก การประเมินกิจกรรมของพืช การสังเคราะห์แสง การตรวจสอบพืช และการจำแนกประเภทสิ่งปกคลุมดิน

NDVI จะมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่า NDVI ที่เข้าใกล้เลข 1 หมายถึง พืชพรรณที่ปกคลุมในพื้นที่ที่มีความสมบูรณ์สูง (Jensen, 2005, Xue and Su, 2017 และ Cao et al., 2018) NDVI สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 1

$$NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right) \quad (\text{สมการที่ 1})$$

โดย NDVI คือ ดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอร์มอลไลซ์

RED คือ ค่าการสะท้อนแสงช่วงคลื่นสีแดงของข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV

NIR คือ ค่าการสะท้อนแสงช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ของข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV

สำหรับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินคูณด้วยค่าคงที่ คือ 0.47 ดังนั้นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจะได้จากปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินซึ่งสามารถประมาณค่าได้ในหน่วยกิโลกรัมต่อ 25 ตารางเมตร โดยอาศัยสมการ Allometry ที่ตรงตามประเภทของป่าไม้ในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรัง ของ Ogawa et.al. (1965) (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2566) เป็นดังสมการที่ 2-5

$$W_S = 0.0396(D^2 H)^{0.933} \quad (\text{สมการที่ 2})$$

$$W_B = 0.00349(D^2 H)^{1.03} \quad (\text{สมการที่ 3})$$

$$W_L = (28.0 / (W_S + W_B + 0.025))^{-1} \quad (\text{สมการที่ 4})$$

$$W_T = W_S + W_B + W_L \quad (\text{สมการที่ 5})$$

โดย W_S คือ มวลชีวภาพของลำต้น (Stem)

W_B คือ มวลชีวภาพของกิ่ง (Branch)

W_L คือ มวลชีวภาพของใบ (Leaf)

W_T คือ มวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมด

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้

H คือ ความสูงของต้นไม้ (เมตร)

ที่ระดับความสูง 1.30 เมตร (เซนติเมตร)

สำหรับการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ จะใช้วิธีการเลือกตัวแปรโดยวิธีเพิ่มตัวแปรต้นแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการพิจารณาคัดเลือกตัวแปรต้นหรือตัวแปรพยากรณ์ที่ดีที่สุดนำไปสู่การได้ผลลัพธ์หรือโมเดลที่ใช้ตัวแปรต้นน้อยที่สุด ซึ่งลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise จะทำการทดสอบตัวแปรต้นที่เข้าสมการไปแล้วทุกครั้งที่มีการนำตัวแปรใหม่เข้าในสมการ หมายความว่า ตัวแปรต้นบางตัวที่เข้าไปในสมการแล้วก็สามารถถูกขจัดออกจากสมการได้ หากพบว่าตัวแปรต้นตัวนั้นไม่ได้ส่งผลให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหลายตัวกับตัวแปรตาม 1 ตัว เพื่อศึกษาว่ามีตัวแปรต้นตัวใดบ้างที่ร่วมกันทำนายหรือพยากรณ์หรืออธิบายการผันแปรของตัวแปรตามได้ ดังสมการที่ 6

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k \quad (\text{สมการที่ 6})$$

โดย Y คือ ค่าตัวแปรตาม

X_i คือ ค่าของตัวแปรต้นแต่ละตัว

b_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย

b_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรต้น

i คือ จำนวนตัวแปรต้น (1 ถึง k)

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินและการตรวจสอบความถูกต้อง

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เป็นการประมาณค่าโดยใช้แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะแสดงความน่าเชื่อถือด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) โดยค่า R^2 จะแสดงถึงสัดส่วนที่ตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้ ค่า R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0%–100% โดยค่าที่เข้าใกล้ 100% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตามได้เป็นอย่างดี สมการ R^2 แสดงดังสมการที่ 7–9

$$R^2 = \frac{RSS}{SST} \quad (\text{สมการที่ 7})$$

$$RSS = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (\text{สมการที่ 8})$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (\text{สมการที่ 9})$$

โดย R^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

RSS คือ Regression sum of squares การเปลี่ยนแปลงในตัวแปรตามที่อธิบายได้โดยตัวแปรต้น (Explained variation) โดย RSS เป็นผลรวมของระยะห่างยกกำลังสองระหว่างค่า Y ที่คาดการณ์กับค่าเฉลี่ยของ Y

SST คือ Total sum of squares การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในตัวแปรตาม (Total Variation) โดย SST เท่ากับผลรวมของความแตกต่างยกกำลังสองระหว่างค่า Y จริงกับค่าเฉลี่ยของ Y

ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ศึกษาทั้งหมดในหน่วยตันคาร์บอนต่อหน่วยพื้นที่ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่ได้จากแบบจำลองจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับข้อมูลการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของแปลงตัวอย่างที่ไม่ถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง จำนวน 30% ของแปลงตัวอย่างทั้งหมด และใช้ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) เป็นค่าความถูกต้อง โดยแบบจำลองที่มีค่า RMSE ยิ่งต่ำยิ่งเป็นแบบจำลองที่ดี สมการ RMSE แสดงดังสมการที่ 10

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Estimated\ value - Observed\ value]^2} \quad (\text{สมการที่ 10})$$

โดย *Estimated value* คือ ค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง

Observed value คือ ค่าที่ได้จากการสำรวจจริง

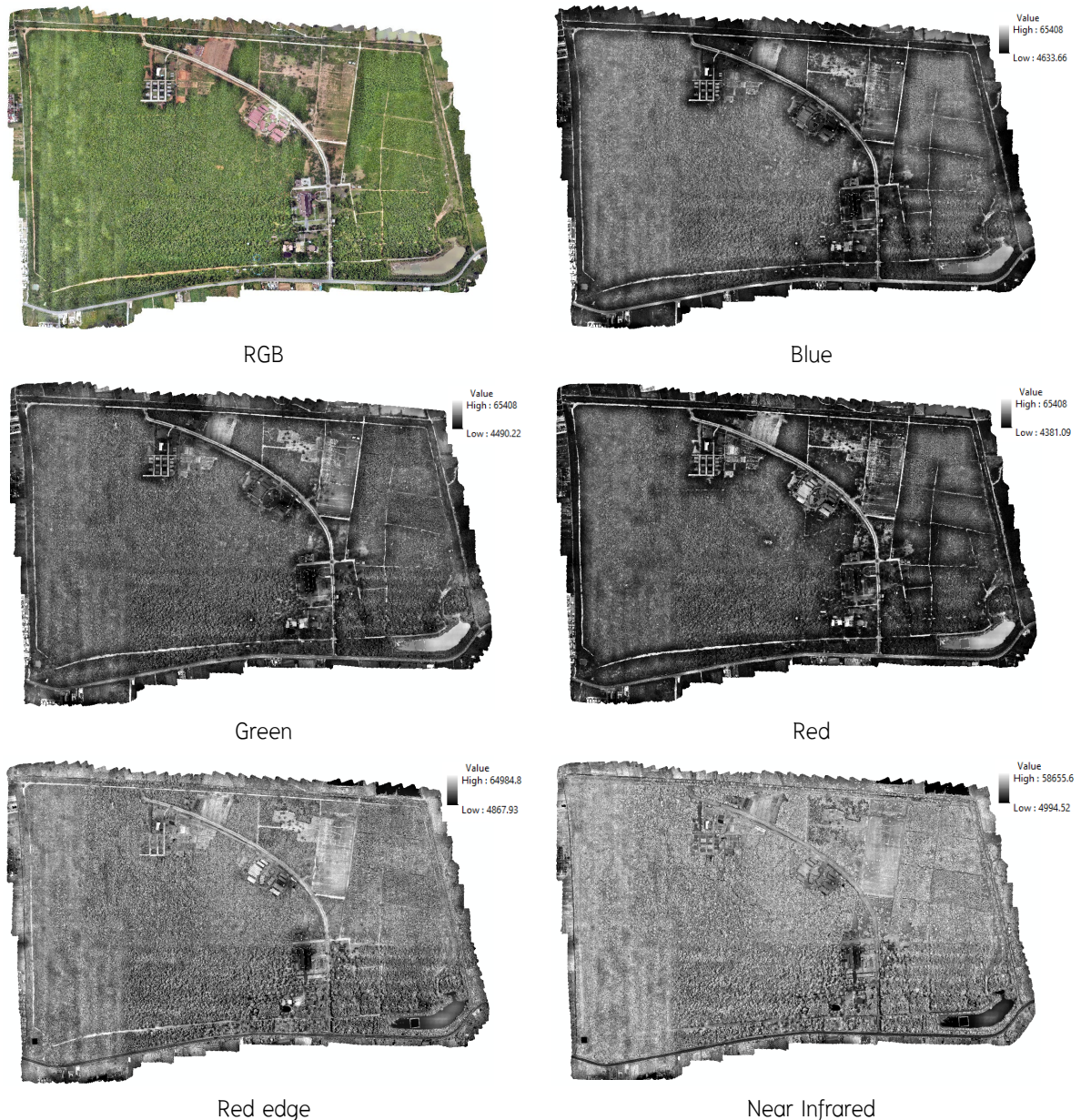
ผลการศึกษา

ผลการสำรวจและทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูงด้วยอากาศยานไร้คนขับ

การสำรวจด้วย UAV ในพื้นที่ศูนย์การศึกษาหนองระเวียง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 2,500 ไร่ ได้ข้อมูล 4,529 ภาพต่อช่วงคลื่น รวมทั้งหมด 5 ช่วงคลื่น 22,645 ภาพ การประมวลผลเพื่อสร้างแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูงด้วยซอฟต์แวร์ Pix4D mapper ได้ภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริง (RGB) และข้อมูลทุกช่วงคลื่น (Blue, Green, Red, Red edge, และ NIR) มีความละเอียดของจุดภาพ 8 เซนติเมตร และข้อมูลช่วงคลื่น Red และ NIR ถูกใช้สร้าง NDVI ได้ดังรูปที่ 2 สำหรับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศสีผสมจริง (RGB) และข้อมูลทุกช่วงคลื่น แสดงดังรูปที่ 3



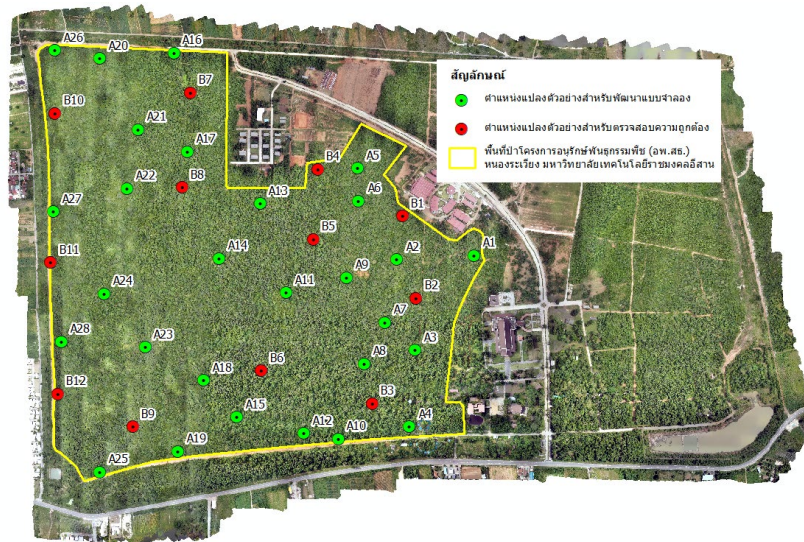
รูปที่ 2 ข้อมูลดัชนีพืชพรรณผลต่างแบบนอร์มอลไลซ์ (NDVI)



รูปที่ 2 ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูง ข้อมูลภาพสีผสมจริง (RGB) และข้อมูลทุกช่วงคลื่น

ผลการสำรวจวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง

ผลการสำรวจวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง ขนาด 5x5 เมตร จำนวน 40 แปลง ซึ่งแบ่งเป็นแปลงตัวอย่างสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง จำนวน 28 แปลง (70%) และแปลงตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากแบบจำลอง จำนวน 12 แปลง (30%) โดยการกระจายตัวของจุดตัวอย่างแบบมีระบบ (Systematic sampling) แสดงดังรูปที่ 4 ในขณะที่รูปที่ 5 เป็นการวางแผนแปลงตัวอย่าง การสำรวจวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง ได้แก่ การวัดขนาดเส้นรอบวงของต้นไม้ในหน่วยเซนติเมตร และวัดความสูงของต้นไม้ในหน่วยเมตร โดยข้อมูลขนาดเส้นรอบวงของต้นไม้จะต้องคำนวณเป็นค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของต้นไม้ (DBH) ผลลัพธ์ของการสำรวจจะได้ค่า DBH และ H ของต้นไม้แต่ละต้นในแปลงตัวอย่างทั้ง 40 แปลง สำหรับนำไปคำนวณเป็นค่ามวลชีวภาพของแต่ละต้นด้วยสมการ Allometry



รูปที่ 4 ตำแหน่งแปลงตัวอย่างสำหรับการพัฒนาแบบจำลองและการตรวจสอบความถูกต้อง



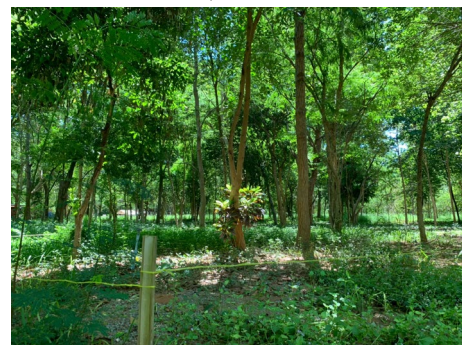
การเข้าถึงแปลงตัวอย่าง



การใช้ GPS ระบุตำแหน่งแปลงตัวอย่าง



การวางแปลงตัวอย่าง



แปลงตัวอย่าง 5x5 เมตร



การวัดขนาดเส้นรอบวงของต้นไม้



การวัดความสูงต้นไม้

รูปที่ 5 การสำรวจต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง

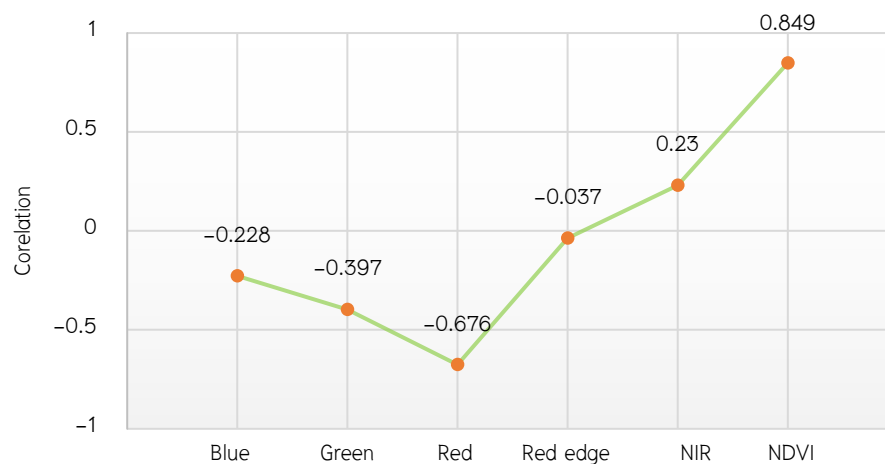
ผลการพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

การพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ด้วยการใช้วิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณนั้น ในส่วนของตัวแปรตาม คือ ผลรวมของค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของแปลงตัวอย่างแต่ละแปลง ได้จากมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของแปลงตัวอย่างในหน่วยกิโลกรัมต่อหน่วยพื้นที่คูณด้วยค่าคงที่จะได้ค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน สำหรับตัวแปรต้น คือ ค่าการสะท้อนแสงของข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศความละเอียดสูง ช่วงคลื่น Blue, Green, Red, Red edge, NIR และค่า NDVI ข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตามทั้ง 40 แปลงตัวอย่างจะถูกแบ่งเป็น 70% สำหรับการนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ และ 30% สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ตารางที่ 1 เป็นข้อมูลของค่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามทั้งหมด

ตารางที่ 1 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามของทั้ง 40 แปลงตัวอย่าง

แปลงที่	Carbon stock	Blue	Green	Red	Red edge	NIR	NDVI	ประเภท แปลงตัวอย่าง
A1	466.76	33246.50	29165.50	24928.10	27612.70	35857.10	0.18	พัฒนาแบบจำลอง
A2	74.17	18988.40	25701.30	23431.50	25691.80	24075.70	0.01	พัฒนาแบบจำลอง
A3	231.92	19537.10	14025.20	13774.90	14701.50	14790.50	0.04	พัฒนาแบบจำลอง
A4	325.53	16415.30	21362.10	19035.90	31956.10	23326.40	0.10	พัฒนาแบบจำลอง
A5	321.23	28220.80	25157.70	22871.30	31823.60	38818.40	0.26	พัฒนาแบบจำลอง
A6	603.47	19692.60	20442.50	20577.20	30368.70	32865.70	0.23	พัฒนาแบบจำลอง
A7	1019.43	31184.90	20788.00	10940.70	39608.40	36101.60	0.53	พัฒนาแบบจำลอง
A8	380.43	16995.70	11558.60	10139.90	22851.50	20324.80	0.33	พัฒนาแบบจำลอง
A9	600.42	25101.10	22324.20	14314.30	25474.30	23672.00	0.25	พัฒนาแบบจำลอง
A10	978.19	25869.30	18891.70	14598.20	28640.70	32194.60	0.38	พัฒนาแบบจำลอง
A11	509.47	20312.30	13306.80	11947.40	18289.70	15911.90	0.14	พัฒนาแบบจำลอง
A12	468.47	30948.00	22600.50	20097.00	35661.30	26960.30	0.15	พัฒนาแบบจำลอง
A13	752.35	23516.00	25014.00	12591.10	23663.60	23091.40	0.29	พัฒนาแบบจำลอง
A14	335.08	24055.80	14893.00	15313.00	30609.90	31708.00	0.35	พัฒนาแบบจำลอง
A15	1513.07	17985.30	10133.20	9246.16	13043.50	32475.70	0.56	พัฒนาแบบจำลอง
A16	1955.18	15052.00	18078.00	9574.33	30393.10	29792.50	0.51	พัฒนาแบบจำลอง
A17	68.81	21728.80	33586.90	20011.10	38947.40	20582.10	0.01	พัฒนาแบบจำลอง
A18	281.91	30237.00	29138.40	27582.50	19584.10	36065.20	0.13	พัฒนาแบบจำลอง
A19	590.39	22862.00	19193.70	23852.70	11852.10	39374.00	0.25	พัฒนาแบบจำลอง
A20	293.79	21436.50	23113.20	21149.30	27516.80	24800.40	0.08	พัฒนาแบบจำลอง
A21	434.65	24038.30	24019.10	19779.80	27944.30	26312.40	0.14	พัฒนาแบบจำลอง
A22	526.74	27654.20	25543.50	20518.50	31987.00	31475.10	0.21	พัฒนาแบบจำลอง
A23	526.60	21851.50	21766.00	14529.40	28813.50	30171.00	0.35	พัฒนาแบบจำลอง
A24	148.25	27528.30	32805.30	25771.50	26617.10	27426.90	0.03	พัฒนาแบบจำลอง
A25	899.51	15948.60	12210.30	11179.20	25498.30	22957.50	0.35	พัฒนาแบบจำลอง
A26	711.31	19870.50	14628.90	16097.90	36352.40	29261.00	0.29	พัฒนาแบบจำลอง
A27	174.94	31415.70	22328.60	19574.50	22482.20	22134.30	0.06	พัฒนาแบบจำลอง
A28	398.94	28023.90	25466.90	20924.30	22349.70	28643.70	0.16	พัฒนาแบบจำลอง
B1	166.80	36785.10	20244.50	31335.50	36333.20	33342.60	0.03	ตรวจสอบความถูกต้อง

แปลงที่	Carbon stock	Blue	Green	Red	Red edge	NIR	NDVI	ประเภทแปลงตัวอย่าง
B2	304.68	26599.80	27156.40	20691.20	23437.50	25041.70	0.10	ตรวจสอบความถูกต้อง
B3	316.62	12926.00	12697.50	17352.70	14486.80	21841.30	0.11	ตรวจสอบความถูกต้อง
B4	324.88	20372.10	21120.50	16684.50	28992.70	32677.00	0.32	ตรวจสอบความถูกต้อง
B5	1064.19	34513.20	16029.40	15912.40	20020.10	34666.20	0.37	ตรวจสอบความถูกต้อง
B6	477.78	24625.00	44647.20	18369.10	38512.50	39449.80	0.36	ตรวจสอบความถูกต้อง
B7	382.78	35914.10	25905.30	20158.90	26922.00	26716.70	0.14	ตรวจสอบความถูกต้อง
B8	667.46	34525.40	20865.50	13162.30	16138.60	22576.50	0.26	ตรวจสอบความถูกต้อง
B9	394.30	26143.70	34993.60	17982.40	38934.60	35882.90	0.33	ตรวจสอบความถูกต้อง
B10	213.51	16061.80	49713.80	29757.20	26940.10	32797.20	0.05	ตรวจสอบความถูกต้อง
B11	1900.28	16780.50	17462.10	7323.16	31259.40	33102.20	0.64	ตรวจสอบความถูกต้อง
B12	793.69	19083.60	12947.30	13932.00	24622.80	25712.10	0.30	ตรวจสอบความถูกต้อง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับตัวแปรต้นทุกตัวแปร

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ได้แบบจำลองการประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม คือ ค่า NDVI ส่วนตัวแปรต้นอื่น ๆ ไม่ได้ส่งผลให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงถูกตัดออกจากแบบจำลองด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ Stepwise สำหรับแบบจำลองการประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรังในพื้นที่ศึกษา มีค่า R^2 ที่ 71.5% ดังนี้ (สมการที่ 11)

$$\text{ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน} = (2,293.12 \times \text{NDVI}) + 35.14$$

(สมการที่ 11)

ผลการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินและผลการตรวจสอบความถูกต้อง

ผลการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากแบบจำลองปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินพบว่า พื้นที่ป่าไม้ในพื้นที่ศึกษามีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ย เท่ากับ 31.72 ตัน/ไร่ และมีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินทั้งหมด เท่ากับ 36,005 ตัน ต่อพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 1,135 ไร่ โดยความหนาแน่นของการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน แสดงดังรูปที่ 7

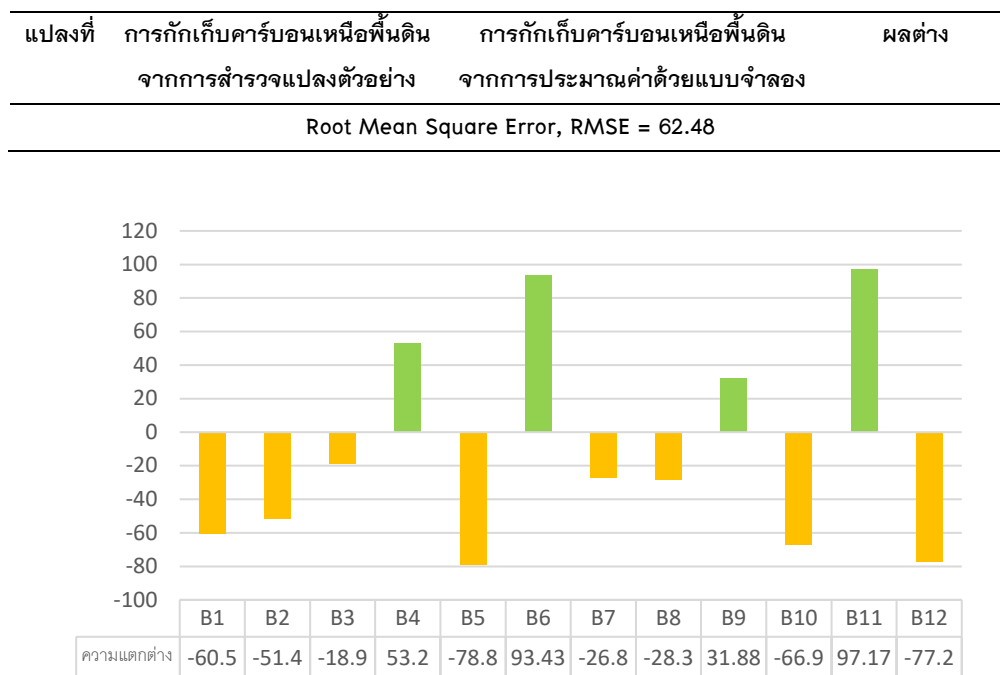


รูปที่ 7 แผนที่การประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากแบบจำลอง พบว่า ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากการสำรวจแปลงตัวอย่าง โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 62.48 กิโลกรัม/25 ตารางเมตร หรือ 3.99 ตัน/ไร่ ดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นผลของการตรวจสอบความถูกต้อง โดยใช้ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนจากแปลงตัวอย่าง (กิโลกรัม/25 ตารางเมตร) เทียบกับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจากแบบจำลอง

แปลงที่	การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน จากการสำรวจแปลงตัวอย่าง	การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง	ผลต่าง
B1	166.80	106.30	-60.50
B2	304.68	253.28	-51.41
B3	316.62	297.75	-18.86
B4	324.88	378.08	53.20
B5	1064.19	985.40	-78.80
B6	477.78	571.21	93.43
B7	382.78	355.94	-26.84
B8	667.46	639.19	-28.27
B9	394.30	426.18	31.88
B10	213.51	146.58	-66.94
B11	1900.28	1997.45	97.17
B12	793.69	716.53	-77.16



รูปที่ 8 ความแตกต่างของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน
ระหว่างข้อมูลการสำรวจแปลงตัวอย่างและข้อมูลการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินนี้ เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับและภูมิสารสนเทศสำหรับการศึกษาพื้นที่ป่าขนาดเล็กหรือป่าชุมชน ประกอบด้วย ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่มีความละเอียดสูงและทันสมัย เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศที่เป็นเทคโนโลยีเชิงพื้นที่ที่มีความน่าเชื่อถือ และการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อสร้างแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่วิเคราะห์ข้อมูลบนพื้นฐานข้อมูลจริงจากจุดตัวอย่าง ในการศึกษานี้มีตัวแปรต้น คือ ข้อมูลค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) ของข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ (Phantom 4 RTK – Multispectral) ช่วงคลื่น Blue, Green, Red, Red edge และ NIR และ NDVI ส่วนตัวแปรตาม คือ ข้อมูลการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของแปลงตัวอย่าง ได้จากการสำรวจรังวัดต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง และใช้สมการ Allometry คำนวณค่ามวลชีวภาพ จากนั้นคูณด้วยค่าคงที่ (0.47) จะเป็นค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

ผลการศึกษาของกรณีศึกษานี้ พบว่า ตัวแปรต้นที่มีผลต่อแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน คือ NDVI โดยแบบจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 71.5% ซึ่งสามารถประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ศึกษาได้เท่ากับ 36,005 ตัน/พื้นที่ศึกษา 1,135 ไร่ หรือเฉลี่ย 31.72 ตัน/ไร่ และมีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดในแปลงตัวอย่าง ที่ RMSE เท่ากับ 3.99 ตัน/ไร่ สอดคล้องกับการศึกษาของ ตินฉน์ และคณะ (2565) ที่ได้ประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าในพื้นที่เดียวกัน และมีวิธีการศึกษาเหมือนกัน ต่างกันเพียงข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา จำนวนและขนาดของแปลงตัวอย่าง โดย ตินฉน์ และคณะ (2565) ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2A ที่บันทึกภาพวันที่ 21 เมษายน พ.ศ.2563 กำหนดให้มีแปลงตัวอย่างจำนวน 10 แปลง และมีขนาดของแปลงตัวอย่าง 100 ตารางเมตร ผลการประเมินได้ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เท่ากับ 39.11 ตัน/ไร่

สิ่งที่ผู้วิจัยพบจากการศึกษานี้ รวมไปถึงข้อเสนอแนะและข้อสังเกตเพิ่มเติม สรุปได้ดังนี้

1. ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ เป็นข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง แต่การศึกษานี้มีการสำรวจภาคพื้นดินในความละเอียดของแปลงตัวอย่างที่ 5x5 เมตร ทำให้ต้องแปลงขนาดของข้อมูลเชิงพื้นที่ของภาพถ่ายทางอากาศ (cell size) ให้เท่ากับขนาดของแปลงตัวอย่าง ตามหลักการวิเคราะห์ข้อมูลแบบราสเตอร์ (Raster base analysis) อย่างไรก็ตาม ขนาดจุดภาพของภาพถ่ายทางอากาศที่ถูกแปลงมาเป็นขนาด 5x5 เมตร เกิดจากค่าเฉลี่ยของค่าการสะท้อนแสงของวัตถุที่มีความละเอียดสูง

2. การสำรวจจริงวัดต้นไม้ของแปลงตัวอย่างในภาคสนาม ในการศึกษาเป็นการตรวจวัดเส้นรอบวง และความสูงของต้นไม้ ในกรณีของเส้นรอบวง จำเป็นต้องมีการตรวจวัดในภาคสนาม ส่วนความสูง ผู้วิจัยวางแผนใช้การวิเคราะห์จากข้อมูลอากาศยานไร้คนขับในการวัดความสูงต้นไม้เพื่อประหยัดเวลาและงบประมาณในการสำรวจภาคสนาม ได้แก่ แบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลข (Digital Surface Model: DSM) และแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Terrain Model: DTM) ซึ่งสามารถนำผลต่างของความสูงมาประยุกต์ใช้ในการหาความสูงของวัตถุได้จากแบบจำลองความสูงของเรือนยอดต้นไม้ (Canopy Height Model: CHM) โดยที่ผลต่างของค่า DSM และ DTM จะได้ค่าความสูงของวัตถุ (จนิษฐ์ และคณะ, 2561, Leah, 2020) แต่ผลการศึกษา พบว่า ข้อมูลความสูงของวัตถุหรือต้นไม้ไม่มีความถูกต้องทั้งหมด จะพบข้อมูลที่มีความถูกต้องเฉพาะบริเวณที่กล้องบันทึกภาพสามารถมองเห็นข้อมูลเรือนยอดของต้นไม้และพื้นดินเท่านั้น ส่วนพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของเรือนยอดสูง กล้องบันทึกภาพไม่สามารถส่องทะลุถึงพื้นได้ทำให้ข้อมูลในพื้นที่นี้ค่า DTM ไม่ใช้พื้นภูมิประเทศจริง ดังนั้นแบบจำลอง CHM กับการประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบความสูงของต้นไม้ ต้องเป็นต้นไม้ที่สามารถเห็นเรือนยอดและพื้น หรือเป็นข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับประเภท Lidar เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงต้องใช้กล้องวัดความสูงต้นไม้ (Laser Meter) วัดวัดในพื้นที่จริง

3. ตัวแปรต้นที่ใช้ในการศึกษา สามารถเพิ่มดัชนีอื่นที่คาดว่ามีความสัมพันธ์กับการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าไม้ อาทิ Normalized Difference Water Index (NDWI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Triangular Vegetation Index (TVI) และ Leaf Area Index (LAI) เป็นต้น หรือข้อมูลอื่น ๆ ที่มีเกี่ยวข้องกับป่าไม้ อาทิ Forest Canopy Density (FCD) เป็นต้น ซึ่งอาจค้นพบแบบจำลองที่ให้ค่าความถูกต้องดีกว่าการศึกษานี้

4. การบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ตั้งค่าแผนการบินตามการศึกษานี้ พบว่า พื้นที่ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหรือมีความเหมือนกันมาก (Homogeneous) ส่งผลให้การประมวลผลการจับคู่ภาพเพื่อสร้างจุดโยงยึดสำหรับเชื่อมจุดภาพแบบอัตโนมัติ (Auto Tie Point) ในซอฟต์แวร์ Pix4D mapper ให้ผลลัพธ์ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นการสำรวจและการประมวลผลสำหรับการศึกษาพื้นที่ที่พื้นผิวมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ควรทดสอบความถูกต้องเชิงพื้นที่และเชิงคลื่นหลังการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

5. ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่ได้จากการศึกษานี้ ยังมีความแตกต่างจากการศึกษาการประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่อื่นๆ ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมในกระบวนการสร้างแบบจำลอง ตัวแปรต้นที่ใช้ในการศึกษา รวมไปถึงการระบุคุณลักษณะเฉพาะของป่าในพื้นที่ศึกษาให้ชัดเจน เพื่อใช้ในการเปรียบหรืออภิปรายร่วมกับการศึกษาอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตามสัญญาเลขที่ RMUTI/RF/18 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ ทั้งนี้ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

เอกสารอ้างอิง

- จณิษฐ์ ประเสริฐบุรณะกุล, วิลาสลักษณ์ วงศ์เยาว์ฟ้า และ สุกิจ วิเศษสินธุ์. (2561). การวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วมด้วย LIDAR: ข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียดสูง. บริษัท ESRI (ประเทศไทย) จำกัด.
- ชาติชาย ไวยสุระสงห์. (2563). การสำรวจด้วยภาพถ่าย Photogrammetry. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐาน อย่างยั่งยืน. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ดิณณ์ ธิรกุลโตมร, อภิชาติ คำภาหาล้า, วิลาวัณย์ ประสมทรัพย์, สฤณี ดิยะวงศ์สุวรรณ และ สุณิศา ขำวิสัย. (2565). การประเมินค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2A โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27. วันที่ 24–26 สิงหาคม 2565. เชียงราย.
- พงษ์ศักดิ์ สหนาฬ. (2538). ผลผลิตและการหมุนเวียนของธาตุอาหารในระบบนิเวศป่าไม้. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. พิมพ์ครั้งที่ 2.
- สุวิทย์ อ่องสมหวัง. (2559). ระบบการรับรู้จากระยะไกลและการวิเคราะห์ข้อมูลภาพเชิงเลข. สาขาวิชาการรับรู้จากระยะไกล สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2561). ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561–2580 (ฉบับประกาศราชกิจจานุเบกษา). สืบค้นจาก <https://drive.google.com/file/d/1XSBMp8OCsauJqECOB-XZLB91-cRrNsEV/view>
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2566). T-VER-TOOL-FOR/AGR-01 การคำนวณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ (Calculation for Carbon Sequestration). (ฉบับที่ 4). สืบค้นจาก <https://ghgreduction.tgo.or.th/en/methodology/calculation-tools/forestry-and-agriculture-project/download/5087/245/23.html>
- อุทิศ ภูอินทร์. (2542). นิเวศวิทยาพื้นฐานเพื่อการป่าไม้. ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- Cao, R., Chen, Y., Shen, M., Chen, J., Zhou, J., Wang, C., & Yang, W.. (2018). A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter. *Remote Sens. Environ.* 217, 244–257.
- Edwards, P. J., & Grubb, A. (1977). Studies of Mineral Cycling in a Montane Rain Forest in New Guinea, The distribution of organic matter in the Vegetation and Soil. *Journal of Ecology*. 65: 43–69.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4 Agriculture, forestry, and other land use. *IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme*.
- Jensen, J. R. (2005). Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. 3rd ed. USA: Pearson Prentice Hall.
- Leah Wasser. (2020). Canopy Height Models, Digital Surface Models & Digital Elevation Models – Work with LiDAR Data in Python. Earth Data Analytics Online Certificate. Source <https://www.earthdatascience.org/courses/use-data-open-source-python/data-stories/what-is-lidar-data/lidar-chm-dem-dsm/>

- Muukkonen, P., & Heiskanen, J. (2007). Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*. 107(4): 617–624.
- Ogawa, H., Yoda, K., Ogino, K., & Kira, T. (1965). Comparative ecological studies on three main type of forest vegetation in Thailand II. Plant biomass. *Nature and Life in Southeast Asia*. 4: 49–80.
- Valli Manickam, Iyyanki V. Murali Krishna, Sree K. Shanti, & R. Radhika. (2014). Biomass Calculations for Carbon Sequestration in Forest Ecosystem: Case study of andhra pradesh, India. *Journal of Energy and Chemical Engineering*. Vol. 2 Iss. 1, PP. 30–38.
- Virgilio, N., & Marshall, S. (2009). Forest carbon strategies in climate change mitigation: confronting challenges through on-the-ground experience, *The Nature Conservancy*.
- Xue, J., & Su, B. (2017) Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, Article ID: 1353691.