

การสร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอน ในสวนยางพาราด้วยข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2A

พัชรี เกษรบัว, อนุชสรุา หงษ์แก้ว, เอกลักษณ์ สลักคำ*

สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ บุรีรัมย์

*Corresponding author email: aekkarak.sk@bru.ac.th

ได้รับบทความ: 14 ตุลาคม 2564

ได้รับบทความแก้ไข: 24 กุมภาพันธ์ 2565

ยอมรับตีพิมพ์: 3 มีนาคม 2565

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ตาม ยางพาราสามารถดูดซับก๊าซดังกล่าวได้เป็นอย่างดี การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการสร้างสมการเพื่อประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของสวนยางพารา โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณ (Ratio vegetation index: RVI) ดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized difference vegetation index: NDVI) และดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน (Soil adjusted vegetation index: SAVI) จากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2A และค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราจากภาคสนาม ซึ่งประมาณค่าจากมวลชีวภาพด้วยสมการแอลโลเมตรี ผลการวิจัยพบว่า มวลชีวภาพและค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารามีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และสมการถดถอยเชิงเส้นของดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน คือ $\text{Carbon} = 9,138.299 - (5,783.380 \times \text{SAVI})$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determinant: r^2) สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.228 นอกจากนี้ ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของตัวอย่างด้วยวิธี t-test พบว่า ค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราภาคสนามและค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\text{Sig.} < 0.05$) แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error: RMSE) เท่ากับ 680.06 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร

คำสำคัญ: การกักเก็บคาร์บอน / สวนยางพารา / Sentinel-2A

Modelling of the Predictive Carbon Storage in Para Rubber Plantation by Using Sentinel-2A Data

Putcharee Kesornbua, Anutsara Hongkaew, Ekkaluk Salukkham*

Geoinformatics Department, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University,
Buriram

*Corresponding author email: aekkarak.sk@bru.ac.th

Received: 14 October 2021

Revised: 24 February 2022

Accepted: 3 March 2022

Abstract

Carbon dioxide, which is the main cause for climate change, can be exactly absorbed by Para rubber trees. In this research, the predictive models to estimate carbon storage in Para rubber plantation by using remotely sensed data were explored. The vegetation indices (RVI, NDVI, and SAVI), which were extracted from Sentinel-2A data, and in-situ carbon storage data in Para rubber plantation were used in regression modelling. Regarding the finding, carbon storage in Para rubber showed the same trend as the above ground biomass increased. The predictive model based on SAVI, which is $\text{Carbon} = 9,138.299 - (5,783.380 \times \text{SAVI})$, provides the highest r^2 (0.228). Furthermore, the t-test result indicated that the estimated carbon storage and in-situ carbon storage is not significantly different (Sig. < 0.05). However, the RMSE is around 680.06 kilogram per 100 square-meters.

Keywords: Carbon storage / Para rubber plantation / Sentinel-2A

บทนำ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกและส่วนใหญ่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ถือเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [1] อย่างไรก็ตาม พืชจำเป็นต้องดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) และมีการสะสมคาร์บอนเอาไว้ในรูปของมวลชีวภาพ ทั้งในส่วนเหนือพื้นดิน (ลำต้น กิ่ง และใบ) และใต้ดิน (ราก) ทำให้คาร์บอนถูกตรึงตามส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ [2] ดังนั้น การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของพืชพรรณจึงสามารถคำนวณได้จากมวลชีวภาพของพืชพรรณแต่ละชนิด ซึ่ง ทิชา โลสุพิมาน, กาญจนา นาคะภากร, อัจฉรา อัครจุฑิกลชัย, สิริกร กาญจนสุนทร และ สุเพชร จิระขจรกุล [3] กล่าวว่า การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนจากมวลชีวภาพของพืชพรรณสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเก็บตัวอย่างพืชพรรณ ทั้งกิ่ง ใบ ลำต้น และราก ไปทำการหาค่าน้ำหนักแห้ง แล้วนำค่ามวลชีวภาพที่ได้ไปคำนวณค่าการกักเก็บคาร์บอนของพืชพรรณ วิธีดังกล่าวสามารถวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนของพืชพรรณได้ทั้งเหนือพื้นดินและใต้ดิน ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นการคำนวณค่ามวลชีวภาพของพืชพรรณแต่ละชนิดโดยการนำค่าความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ระดับอก (Diameter at breast height: DBH) ไปแทนค่าในสมการแอลโลเมตรี (Allometry) อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวสามารถคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของพืชพรรณได้เฉพาะส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินเท่านั้น

ผลการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพืชพรรณกับค่าการสะท้อนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพืชพรรณที่ได้จากข้อมูลการรับรู้จากระยะไกลเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการดังกล่าวจะช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ [4] นักวิจัยหลายท่านจึงได้นำเทคนิคดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของพืชพรรณ อาทิ นวลปราง นวลอุไร [5] ได้ทำการวิเคราะห์สมการถดถอย ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสะสมเหนือพื้นดินกับค่าดัชนีพืชพรรณแบบต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT-5 TM ของระบบนิเวศป่าเต็งรัง ป่าเบญจพรรณ ป่าดิบแล้ง และป่าดิบชื้น ในเขตอุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน ขณะที่ สุระเชษฐ์ สีแดง [6] ได้ประยุกต์ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT-5 TM ร่วมกับการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อวิเคราะห์สมการสำหรับประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน บริเวณเกาะลันตา จังหวัดกระบี่ ส่วน สิริวรรณ น้อยรักษา [7] ได้ทำการจำแนกช่วงชั้นอายุของสวนป่าไม้สักในเขตสวนป่าขุนแม่คำมี จังหวัดแพร่ โดยอาศัยค่าดัชนีพืชพรรณ ดัชนีดิน และดัชนีน้ำ ที่คำนวณได้จากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม

LANDSAT-5 TM จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ร่วมกับปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินที่ได้จากการสำรวจแปลงตัวอย่าง และ สุชี บัญสร้าง และ วันชัย อรุณประภารัตน์ [8] ได้ทำการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินกับค่าการสะท้อนช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT-5 TM เพื่อนำไปประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าไม้ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าแม่ตื่น จังหวัดตาก

อย่างไรก็ตาม สุระ พัฒนเกียรติ, วีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ และ กฤษณย์ เจริญจิตร [9] กล่าวว่า การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีเชิงคลื่นและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนยังคงเป็นงานที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องได้รับการศึกษา นอกจากนี้ งานวิจัยที่นำเอาเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในสวนป่ายังมีจำนวนไม่มากนัก โดยเฉพาะสวนยางพาราซึ่งเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยไปกว่าป่าเขตร้อน [10] และมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพสูงกว่าไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส และไม้สัก โดยยางพารามีการกักเก็บคาร์บอนรวมเท่ากับ 73.21 ตันต่อเฮกแตร์ ขณะที่ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส และไม้สัก มีการกักเก็บคาร์บอนรวมเท่ากับ 56.97 และ 12.86 ตันต่อเฮกแตร์ ตามลำดับ [2]

การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนยางพาราจากข้อมูลการรับรู้จากระยะไกล โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2A ซึ่งมีการตรวจวัดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลายช่วงคลื่น ทำให้สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ดัชนีเชิงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะทางชีวภาพ กายภาพ และเคมีของพืชพรรณได้หลากหลาย [11] นอกจากนี้ ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมดังกล่าวยังมีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial resolution) ดีกว่าข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT [12,13] ส่งผลให้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมดังกล่าวได้รับความนิยมในการนำไปใช้เพื่อศึกษาการกักเก็บคาร์บอนของพืชพรรณเช่นกัน อาทิ Granero-Belinchon, Adeline, Lemonsu and Briotter [11] และ Mngadi, Odindi and Mutanga [13] ได้นำข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาการกักเก็บคาร์บอนของพืชพรรณภายในเขตเมือง

สำหรับสวนยางพาราตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกสวนยางพาราที่มีอายุประมาณ 10 ปี ซึ่งเป็นช่วงอายุที่ยางพารากำลังให้น้ำยาง (9-20 ปี) [3] โดยสวนยางพาราดังกล่าวตั้งอยู่ในเขตตำบลบัวเขต อำเภอบัวเขต จังหวัดสุรินทร์ ซึ่งเป็นจังหวัดหนึ่งที่มีการปลูกยางพาราเพิ่มมากขึ้นในระยะหลัง [14] โดยเฉพาะเขตตำบลบัวเขต ที่แม้ประชากรส่วนใหญ่จะประกอบอาชีพเกษตรกรรม คือ การทำนา และการทำไร่ แต่ปัจจุบันประชากรเริ่ม

หันมาทำสวนยางกันมากขึ้น [15] โดยผลการวิจัยและวิธีการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่สวนยางพาราต่อไป

วัสดุและวิธีการ

การวิจัยครั้งนี้แบ่งการดำเนินการออกเป็น 4 ส่วน คือ 1) การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ 2) การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา 3) การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น และ 4) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2A ช่วงคลื่นแสงสีแดง และอินฟราเรดใกล้ ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ เท่ากับ 10 เมตร และบันทึกข้อมูลเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงเวลาที่ทำการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูลมวลชีวภาพของยางพาราในภาคสนามไปใช้ในการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณ ดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์ และดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน โดยข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมดังกล่าวจะถูกนำไปแก้ไขเชิงรังสี (Radiometric correction) ก่อนนำไปวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณต่าง ๆ โดยทำการแปลงค่าจุดภาพไปเป็นค่าการสะท้อนเชิงรังสีด้วยสมการที่ 1 [16]

$$\rho\lambda = \frac{DC}{\text{QUANTIFICATION VALUE}} \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดย $\rho\lambda$	คือ	ค่าการสะท้อนเชิงรังสี
DC	คือ	ค่าจุดภาพ
QUANTIFICATION VALUE	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแปลง

ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2A ช่วงคลื่นแสงสีแดง และอินฟราเรดใกล้ ที่ผ่านการแก้ไขเชิงรังสีจะถูกนำไปวิเคราะห์ดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณ ดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์ และดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน ดังสมการที่ 2-4 ตามลำดับ ซึ่งสมการดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดย Jordan [17], Rouse, Haas, Schell and Deering [18] และ Huete [19] ตามลำดับ

$$RVI = \frac{RED}{NIR} \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$SAVI = (1 + L) * \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดย RED คือ ช่วงคลื่นแสงสีแดง
 NIR คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้
 L คือ ค่าการปกคลุมของพืชพรรณ

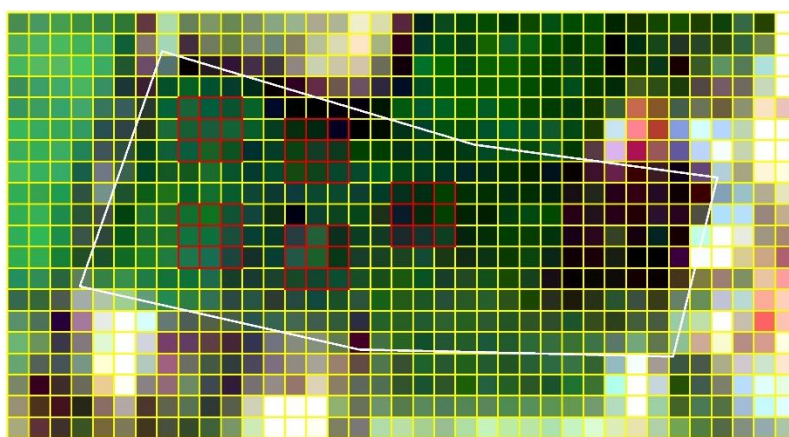
สำหรับการวิจัยครั้งนี้จะกำหนดค่า L ให้มีค่าเท่ากับ 0.48 ตามงานวิจัยของ สรวิศ สุภเวชย์ [20] ซึ่งทำการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดินโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายจาก ดาวเทียม Sentinel-2A โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่องค์การอวกาศยุโรป (European space agency: ESA) แนะนำ

2. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกสวนยางพาราซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 29,000 ตาราง เมตร (18.13 ไร่) เป็นพื้นที่ศึกษา โดยยางพาราที่ปลูกมีอายุประมาณ 10 ปีเท่ากันทั้งสิ้น สำหรับรายละเอียดของการวางแผนแปลงตัวอย่างและสุ่มตัวอย่าง ตลอดจนการคำนวณมวล ชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารามีดังนี้

2.1 การวางแผนแปลงและการสุ่มตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดแปลงย่อยให้มีขนาด 10 x 10 เมตร (100 ตารางเมตร) เพื่อให้สัมพันธ์กับความละเอียดเชิงพื้นที่ของข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2A ช่วงคลื่นแสงสีแดง และอินฟราเรดใกล้ซึ่งใช้ในการวิจัย โดยมีแนวความคิดการ คำนวณจำนวนแปลงตัวอย่าง และการสุ่มตัวอย่าง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การวางแผนตัวอย่าง

ภาพที่ 1 เนื่องจากสวนยางพาราซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาครั้งนี้มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 29,000 ตารางเมตร (18.13 ไร่) (ขอบเขตของสวนยางพาราตัวอย่างดังเส้นสีขาว) ดังนั้น

เมื่อกำหนดแปลงตัวอย่างขนาด 10×10 เมตร (100 ตารางเมตร) (กริดสี่เหลี่ยม) จะได้จำนวนแปลงย่อยทั้งสิ้น $29,000 / 100 = 290$ แปลง อย่างไรก็ตาม การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างเป็นกลุ่มขนาด 3×3 แปลงย่อย เพื่อเป็นการลดความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้ได้แปลงใหญ่ขนาด 900 ตารางเมตร (30×30 เมตร) (กริดสีแดง) โดยการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งสิ้นจำนวน 5 แปลงใหญ่ (45 แปลงย่อย) นอกจากนี้ ผู้วิจัยพยายามหลีกเลี่ยงการเก็บข้อมูลทางด้านตะวันออกของสวนยางพารา (ขวามือ) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้แหล่งชุมชน ซึ่งอาจมีผลต่อค่าการสะท้อนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าของดัชนีพืชพรรณที่วิเคราะห์จากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม

2.2 การคำนวณมวลชีวภาพ และการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา

ยางพาราแต่ละต้นภายในพื้นที่แปลงย่อย (100 ตารางเมตร) จะถูกคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากลำต้น กิ่ง และใบ โดยอาศัยสมการแอลโลเมตรีสำหรับคำนวณมวลชีวภาพของยางพารา ซึ่งอ้างอิงจาก พงษ์ศักดิ์ วิทวัสสุติกุล และ วารินทร์ จิระสุขทวีกุล [21] ดังสมการที่ 5-7

$$Y_s = 0.0556 (D^2H)^{0.866} \quad \text{สมการที่ 5}$$

$$Y_b = 0.0023 (D^2H)^{1.140} \quad \text{สมการที่ 6}$$

$$Y_l = 0.7396 (D^2H)^{0.709} \quad \text{สมการที่ 7}$$

โดย Y_s คือ คำนวณมวลชีวภาพส่วนของลำต้นยางพารา

Y_b คือ คำนวณมวลชีวภาพส่วนของกิ่งของยางพารา

Y_l คือ คำนวณมวลชีวภาพส่วนของใบของยางพารา

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นระดับอก
(หน่วย : เซนติเมตร)

H คือ ความสูงของต้นยางพารา (หน่วย : เมตร)

สำหรับการวัดความสูงของต้นยางพาราจะใช้เครื่องวัดระยะเลเซอร์ (Xiaomi Duka LS-P: พิสัยความคลาดเคลื่อน ± 2 มิลลิเมตร) [22] ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นได้จากการวัดขนาดเส้นรอบวงของลำต้นระดับอกด้วยเทปวัดระยะ และคำนวณหาระดับของลำต้น โดยคำนวณมวลชีวภาพของยางพาราแต่ละต้นในแต่ละแปลงย่อยจะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าผลรวมของมวลชีวภาพของยางพาราแต่ละแปลง และทำการคำนวณค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราแต่ละแปลงย่อย (100 ตารางเมตร) ด้วยสมการที่ 8 [3]

$$C_T = 0.5 \times W_T \quad \text{สมการที่ 8}$$

โดย C_T	คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ของยางพารา (หน่วย : กิโลกรัมต่อพื้นที่)
W_T	คือ ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมด (ผลรวมของมวลชีวภาพจากสมการที่ 5, 6 และ 7) (หน่วย : กิโลกรัมต่อพื้นที่)
0.5	คือ สัดส่วนของคาร์บอนที่ยางพาราสามารถกักเก็บได้ (คิดเทียบกับน้ำหนักแห้งของยางพารา)

3. การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น

ค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราแต่ละแปลงย่อย (100 ตารางเมตร) ที่ได้จากข้อ 2 จะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับค่าดัชนีพืชพรรณจากข้อที่ 1 เพื่อสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา โดยกำหนดให้ค่าดัชนีพืชพรรณเป็นตัวแปรต้น ส่วนค่าการกักเก็บคาร์บอนของพาราที่ตรวจวัดจากภาคสนามจะกำหนดให้เป็นตัวแปรตาม และทำการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นแบบตัวแปรเดียวอย่างใดก็ตาม การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มข้อมูล 70 เปอร์เซ็นต์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ดังกล่าว ส่วนข้อมูลที่เหลืออีก 30 เปอร์เซ็นต์ จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง

4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

สมการถดถอยเชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุดจะถูกเลือกเป็นสมการสำหรับประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา และผลการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราที่ได้จากสมการดังกล่าวจะถูกนำไปทดสอบด้วยวิธี t-test เพื่อวิเคราะห์ว่าค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราที่ได้จากภาคสนาม และค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ได้จากการสมการถดถอยเชิงเส้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ นอกจากนี้ ยังได้นำเอาค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราทั้งสองไปคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนด้วยค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด ดังสมการที่ 9 [23]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad \text{สมการที่ 9}$$

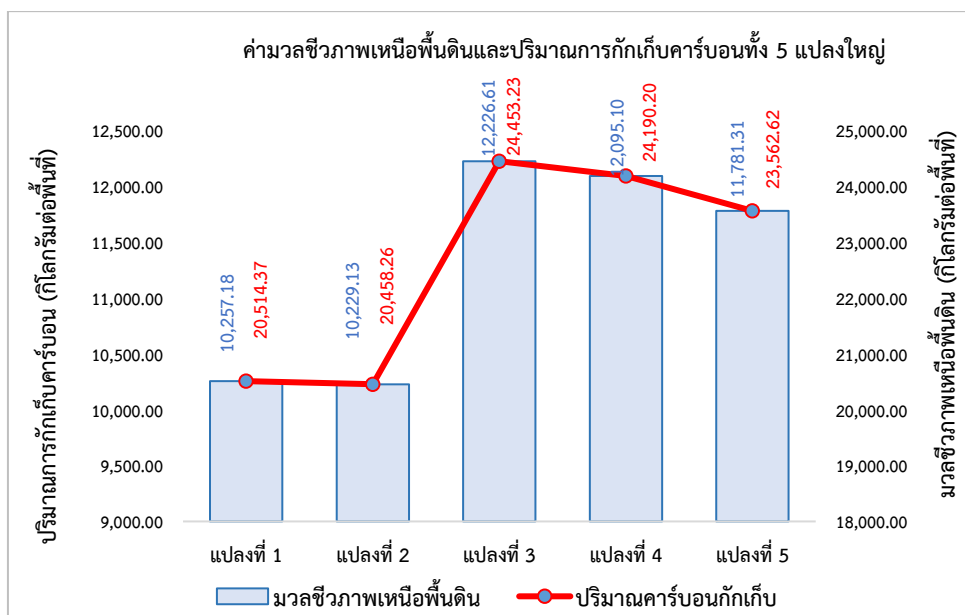
โดย n	คือ จำนวนตัวแปร
$\hat{x}_i$	คือ ค่าประมาณที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้น
x_i	คือ ค่าที่คำนวณได้จากภาคสนาม

ซึ่ง สุนิสา สายอุปราช, ขวัญ สุภรัตน์ และ ปิยธิดา รุจจะศิริ [23] อธิบายว่า ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาดเป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ประมาณจาก

แบบจำลองยกกำลังสอง ถ้าค่าดังกล่าวมีค่าน้อย แสดงว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่าประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าจริง แต่ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่า ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนในแบบจำลอง

ผลการศึกษาและวิจารณ์

1. การประมาณค่ามวลชีวภาพและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา
ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราทั้ง 5 แปลงใหญ่ ดังภาพที่ 2 และตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ค่ามวลชีวภาพ และค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้ง 5 แปลง

ตารางที่ 1 ค่ามวลชีวภาพ และค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้ง 5 แปลง

แปลงที่	ค่ามวลชีวภาพ (กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร)	ค่าการกักเก็บคาร์บอน (กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร)
1	20,514.37	10,257.18
2	20,458.26	10,229.13
3	24,453.23	12,226.61
4	24,190.20	12,095.10
5	23,562.62	11,781.31

ภาพที่ 2 และตารางที่ 1 พบว่า แปลงที่ 3 มีค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 24,453.23 และ 12,226.61 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร ตามลำดับ รองลงมาคือ แปลงที่ 4 และแปลงที่ 5 ตามลำดับ โดยแปลงที่ 4 มีค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนเท่ากับ 24,190.20 และ 12,095.10 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร ตามลำดับ ส่วนแปลงที่ 5 มีค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนเท่ากับ 23,562.62 และ 11,781.31 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร ตามลำดับ ตรงกันข้าม แปลงที่ 2 มีค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 20,458.26 และ 10,229.13 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร ตามลำดับ รองลงมาคือ แปลงที่ 1 ซึ่งมีค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 20,514.37 และ 10,257.18 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้นจะสังเกตได้ว่า แปลงที่ 1 และแปลงที่ 2 มีค่ามวลชีวภาพต่ำกว่าแปลงอื่น ๆ เนื่องจากต้นยางพาราในแปลงตัวอย่างทั้งสองมีขนาดเล็กกว่าต้นยางพาราในแปลงตัวอย่างอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาผลการวิจัยข้างต้น พบว่า ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินและค่าการกักเก็บคาร์บอนมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน หากพืชพรรณมีค่ามวลชีวภาพสูงก็จะมีค่าการกักเก็บคาร์บอนสูงตามไปด้วย เนื่องจากพืชจำเป็นต้องดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และมีการสะสมคาร์บอนเอาไว้ในรูปของมวลชีวภาพ ทั้งในส่วนเหนือพื้นดิน (ลำต้น กิ่ง และใบ) และใต้ดิน (ราก) ทำให้คาร์บอนถูกตรึงตามส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ [2] โดยผลการวิจัยข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปริญญา ภูศักดิ์สาย, สาพิศ ดิลกสัมพันธ์, รุ่งเรือง พูลศิริ และ ชนิษฐา จันทโชติ [24] ซึ่งพบว่า ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณมวลชีวภาพ ทั้งนี้ความแตกต่างของการกักเก็บคาร์บอนต่อพื้นที่ในสวนป่าแต่ละชนิดเป็นผลมาจากความแตกต่างของมวลชีวภาพของต้นไม้มากกว่าผลจากปริมาณคาร์บอนที่สะสมในมวลชีวภาพ

2. การสร้างสมการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในสวนยางพารา

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา และค่าดัชนีพืชพรรณแบบต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณ ดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์ และดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน ได้สมการถดถอยเชิงเส้นดังสมการที่ 10-12 โดยแต่ละสมการมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: r) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ที่ปรับแก้ (Adjusted r^2) ดังตารางที่ 2

Carbon	= 3,854.446 - (166.744 × RVI)	สมการที่ 10
Carbon	= 8,887.207 - (8,226.946 × NDVI)	สมการที่ 11
Carbon	= 9,138.299 - (5,783.380 × SAVI)	สมการที่ 12

โดย Carbon	คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา ที่ประมาณค่าจากสมการถดถอยเชิงเส้น		
RVI	คือ ค่าของดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณ		
NDVI	คือ ค่าของดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์		
SAVI	คือ ค่าของดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน		

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ที่ปรับแก้

ดัชนีพืชพรรณ	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ที่ปรับแก้
ดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณ	0.409	0.168	0.137
ดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์	0.454	0.206	0.177
ดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน	0.478	0.228	0.200

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น ดังสมการที่ 10-12 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ที่ปรับแก้ ดังตารางที่ 2 พบว่า สมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน และค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราภาคสนาม (สมการที่ 12) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงกว่าสมการอื่น ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 0.228 ซึ่งหมายความว่า สมการพยากรณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าตัวแปรอิสระมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น สมการดังกล่าวจึงเป็นสมการที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในสวนยางพาราสำหรับการวิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่า ดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน มีความสัมพันธ์กับค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพาราสูงกว่าดัชนีพืชพรรณอื่น ๆ ที่ใช้ในการวิจัย คือ ดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณ และดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์ เนื่องจากพื้นที่ศึกษาครั้งนี้มีลักษณะเป็นป่าปลูก หรือสวนไม้ยืนต้น ซึ่งมีความหนาแน่นของพืชพรรณปกคลุมเบาบางกว่าป่าธรรมชาติ ดังนั้น ค่าการสะท้อนของพื้นดินเบื้องล่างจึงส่งผลต่อค่าดัชนีพืชพรรณที่ใช้ในการวิจัย ซึ่ง Xue and Su [25] กล่าวว่า เมื่อพื้นที่มีพืชพรรณปกคลุมอย่างเบาบาง ดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณจะมีความสัมพันธ์กับมวลชีวภาพน้อยลง ซึ่งมวลชีวภาพมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณการกักเก็บคาร์บอน ดังจะเห็นได้ว่าดัชนีอัตราส่วนพืชพรรณมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำที่สุด ($r = 0.409$) ขณะที่ดัชนีพืชพรรณความต่างแบบนอร์มัลไลซ์ก็มีความบกพร่องเกี่ยวกับลักษณะเชิงคลื่นของพืชพรรณและพื้นดินเบื้องล่าง ส่งผลให้ดัชนีพืชพรรณดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าการกักเก็บคาร์บอน ($r = 0.454$) น้อยกว่าดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดิน ($r = 0.478$) ซึ่งเป็นดัชนีพืชพรรณที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อลดความบกพร่องดังกล่าว และได้รับความนิยมในการนำไปใช้กับพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมเบาบาง นอกจากนี้ ผลการศึกษาของ เจษฎาโสภารัตน์ [26] ยังบ่งชี้ว่า ดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดินมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (Lead area index: LAI) ของยางพาราสูงที่สุด เมื่อเทียบกับสัดส่วนอย่างง่ายระหว่างช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้และช่วงคลื่นแสงสีแดง (Simple ratio: SR) และสัดส่วนอย่างง่ายแบบปรับแก้ (Modified simple ratio: MSR) โดยดัชนีพื้นที่ผิวใบมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับมวลชีวภาพ และผลผลิตสุทธิของหมูไม้

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยเชิงเส้นทั้งหมด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยเชิงเส้นของแต่ละสมการมีค่าค่อนข้างต่ำ อาจเป็นผลเนื่องมาจากยังมีปัจจัยร่วมอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์ต่อค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารา แต่ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาในการวิจัยครั้งนี้ ดังนั้น หากมีการนำเอาดัชนีเชิงคลื่นประเภทอื่น ๆ ที่เป็นตัวแทนของคุณลักษณะทางกายภาพ หรือชีวภาพของยางพารามาวិเคราะห์ร่วมกับดัชนีพืชพรรณ โดยทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ อาจส่งผลให้แบบจำลองสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีขึ้น

3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เมื่อนำสมการถดถอยเชิงเส้นดังกล่าว (สมการที่ 12) ไปประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในสวนยางพาราตัวอย่าง และนำไปทดสอบทางสถิติด้วยการทดสอบ t-test

ระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ประมาณค่าได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นข้างต้น และค่าการกักเก็บคาร์บอนจากภาคสนาม ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ t-test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means		
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	22.320	.000	-.349	48	.728
Equal variances not assumed			-.349	29.279	.729

ผลการทดสอบความแปรปรวนระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ประมาณค่าจากสมการถดถอยเชิงเส้น (สมการที่ 12) และค่าการกักเก็บคาร์บอนจากภาคสนามด้วยวิธี Levene's test (ตารางที่ 3) พบว่า ค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ประมาณค่าจากสมการถดถอยเชิงเส้น และค่าการกักเก็บคาร์บอนจากภาคสนาม มีความแปรปรวนไม่เท่ากัน (Sig. < 0.05) และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบ t-test (ตารางที่ 3) กรณีที่ข้อมูลมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ประมาณค่าได้จากสมการถดถอยเชิงเส้น และค่าการกักเก็บคาร์บอนจากภาคสนามไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. > 0.05) อย่างไรก็ตาม ค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นมีความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 680.06 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร

สรุป

มวลชีวภาพเหนือพื้นดินและค่าการกักเก็บคาร์บอนของยางพารามีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนของแปลงที่ 3 มีค่าสูงที่สุด (24,453.23 และ 12,226.61 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร ตามลำดับ) ตรงกันข้ามแปลงที่ 2 มีค่ามวลชีวภาพ และค่าการกักเก็บคาร์บอนน้อยที่สุด (20,458.26 และ 10,229.13 กิโลกรัมต่อ 100 ตารางเมตร ตามลำดับ)

สำหรับผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าการกักเก็บคาร์บอนจากภาคสนาม และค่าดัชนีพืชพรรณแบบต่าง ๆ พบว่า ดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดินมีความสัมพันธ์กับค่าการกักเก็บคาร์บอนจากภาคสนามสูงที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ที่ปรับแก้ เท่ากับ 0.478, 0.228 และ 0.200 ตามลำดับ และได้สมการถดถอยเชิงเส้น คือ Carbon =

9,138.299 - (5,783.380 × SAVI) (สมการที่ 12) เมื่อทำการทดสอบค่าเฉลี่ยของตัวอย่างด้วยวิธี t-test พบว่า ค่าการกักเก็บคาร์บอนจากภาคสนาม และค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นดังกล่าวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Sig. < 0.05) แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 680.06 กิโลกรัมต่อพื้นที่ (100 ตารางเมตร)

สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนยางพาราแบบเร่งด่วนได้ เนื่องจากการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนโดยอาศัยค่าดัชนีพืชพรรณที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลการรับรู้จากระยะไกล ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยเฉพาะพื้นที่สวนยางพาราที่มีขนาดใหญ่ ตลอดจนนำไปใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของสวนยางพาราเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังบ่งชี้ว่าดัชนีพืชพรรณแบบปรับค่าดินมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการพยากรณ์ค่าการกักเก็บคาร์บอนของสวนยางพารา ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของสวนยางพาราที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม สมการสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในสวนยางพาราครั้งนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ตัวอย่างเป็นสวนยางพาราที่มีอายุประมาณ 10 ปีเท่านั้น ซึ่งอาจไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้กับยางพาราที่มีช่วงอายุอื่น ๆ ดังนั้น การวิจัยครั้งต่อไปควรเลือกตัวอย่างช่วงชั้นอายุของพืชพรรณที่ต้องการศึกษาให้มีความหลากหลาย และอาจพิจารณาดัชนีพืชพรรณอื่น ๆ หรือดัชนีเชิงคลื่นอื่น ๆ (Spectral indices) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในพืชพรรณ

เอกสารอ้างอิง

1. Zhang Z, Pan SY, Li H, Cai J, Olabi AG, Anthony EJ, et al. Recent advances in carbon dioxide utilization. *Renew Sust Energy Rev* 2020;125:1-17.
2. ประดิษฐ์ ตรีพัฒนาสุวรรณ, สาพิศ ดิลกสัมพันธ์, ดุริยะ สถาพร, เจตต์จ รัตนแก้ว. การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของพรรณไม้บางชนิดที่ปลูก ณ ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดสกลนคร [อินเทอร์เน็ต]. 2553 [เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2564]. เข้าถึงได้จาก: http://frc.forest.ku.ac.th/frcdatabase/bulletin/ws_document/R195301.pdf
3. ทิชา โลลูพิมาน, กาญจนา นาคะภากร, อัจฉรา อัครจุฑิกลชัย, สิริกร กาญจนสุนทร, สุเพชร จิรขจรกุล. การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนยางพาราโดย

- การประยุกต์เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล กรณีศึกษา จังหวัดระยอง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2559;24:914-26.
4. Yasen K, Koedsin W. Estimating aboveground biomass of rubber tree using remote sensing in Phuket province, Thailand. J Med Biol Eng 2015;4:451-6.
 5. นวลปราง นวลอุไร. การเปรียบเทียบค่าดัชนีพื้นที่ใบมวลชีวภาพและปริมาณคาร์บอนสะสมที่อยู่เหนือพื้นดินของระบบนิเวศป่าจากการสำรวจด้านป่าไม้และการรับรู้จากระยะไกลบริเวณอุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน ประเทศไทย [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2548.
 6. สุรเชษฐ์ สีแดง. การประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนบริเวณเกาะลันตา จังหวัดกระบี่ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2551.
 7. สิริวรรณ น้อยรักษา. การประยุกต์ใช้การสำรวจระยะไกลเพื่อประเมินการสะสมคาร์บอนเหนือพื้นดินของไม้สักในสวนป่าขุนแม่คำมี จังหวัดแพร่ ประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน); 2553.
 8. สุชี บัญสร้าง, วันชัย อรุณประภารัตน์. การประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าไม้ด้วยเทคนิคการสำรวจระยะไกล บริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าแม่ต๋อน จังหวัดตาก. วารสารวนศาสตร์ 2554;30:14-23.
 9. สุระ พัฒนเกียรติ, วีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ, กฤษณียัย เจริญจิตร. บูรณาการดัชนีทางกายภาพและพืชพรรณกับข้อมูลดาวเทียมเพื่อประมาณการสะสมคาร์บอนในสวนป่าของประเทศไทย. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย 2555;13:23-9.
 10. ศูนย์ข้อมูลเทคโนโลยีชีวภาพและความปลอดภัยทางชีวภาพ. ยางพารา ไม้เศรษฐกิจลดโลกร้อน [อินเทอร์เน็ต]. 2552 [เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2564]. เข้าถึงได้จาก: http://www.safetybio.agri.kps.ku.ac.th/index.php?option=com_content&task=view&id=5470&Itemid=42
 11. Granero-Belinchon C, Adeline K, Lemonsu A, Briottet X. Phenological dynamics characterization of alignment trees with Sentinel-2 imagery: a vegetation indices time series reconstruction methodology adapted to urban areas. Remote Sens 2020;12:1-28.

12. Imran AB, Ahmed S, Ahmed W, Zia-ur-Rehman M, Iqbal A, Ahmed N, et al. Integration of Sentinel-2 derived spectral indices and in-situ forest inventory to predict forest biomass. *Pak J Sci Ind Res* 2021;64:119-30.
13. Mngadi M, Odindi J, Mutanga O. The utility of Sentinel-2 spectral data in quantifying above-ground carbon stock in an urban reforested landscape. *Remote Sens* 2021;13:1-15.
14. หาญพล จันทรสูงเนิน. ต้นทุนและผลิตภาพแรงงานในการปลูกยางพาราในจังหวัดสุรินทร์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาเศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2554.
15. องค์การบริหารส่วนตำบลบัวเขต. ข้อมูลทั่วไป [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 20 เมษายน 2564]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.buachetsurin.go.th/page.php>
16. ชายฉัตร มุขะนะ, ภาณุ ตริยเวช, ประสิทธิ์ มากสิน. การเปรียบเทียบเชิงรังสีระหว่างข้อมูลดาวเทียมไทยโชต ดาวเทียมแลนด์แซท-8 และดาวเทียมเซนติเนล-2 เพื่อการใช้งานร่วมกัน. *วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย* 2562;20:173-88.
17. Jordan CF. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *J Ecol* 1969;50:663-6.
18. Rouse Jr. JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *NASA Spec Publ* 1974;351:309-17.
19. Huete AR. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens Environ* 1988;25:295-309.
20. สรวิต สุขเวชย์. การพัฒนาเทคนิคการตรวจสกัดพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังโดยใช้ข้อมูลดาวเทียมเซนติเนลตามอนุกรมเวลา [อินเทอร์เน็ต]. 2562 [เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2564]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ce.eng.ku.ac.th/uploaded/files/PPF.pdf>
21. พงษ์ศักดิ์ วิทวัสขุติกุล, วารินทร์ จิระสุขทวีกุล. ผลผลิตมวลชีวภาพเหนือผิวดินของสวนยางพาราในกลุ่มน้ำระยอง. กรุงเทพฯ: กรมป่าไม้; 2531.
22. Xiami Global Community. Xiaomi Duka LS-P laser range finder [Internet]. 2021 [cited 2021 April 20]. Available from: <https://xiaomi-mi.com/accessories-and-office-supplies/xiaomi-duka-ls-p-laser-range-finder/>
23. สุนิสา สายอุปราช, ขวณิ สุภีรัตน์, ปิยธิดา รุจจะศิริ. การพัฒนาวิธีการวัดการพยากรณ์มรสุมฤดูหนาวในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์; 2559.

24. ปริญญา ภูศักดิ์สาย, สาทิศ ดิลกสัมพันธ์, รุ่งเรือง พูลศิริ, ชนิษฐา จันทโชติ. มวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอนของพรรณไม้ป่า 4 ชนิด ณ สถานีวนวัฒนวิจัยประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. วารสารวนศาสตร์ 2561;37:13-26.
25. Xue J, Su B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. J Sens 2017;2017:1-17.
26. เจษฎา โสภารัตน์. การใช้ภาพถ่ายเทียม SPOT-5 เพื่อประเมินดัชนีพื้นที่ใบของยางพารา กรณีศึกษา อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2552.