

การคาดการณ์ปริมาตรไม้สักโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2
บริเวณสวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี
Prediction of Teak Volume Using Sentinel-2 Satellite Imagery Data
at Thong Pha Phum Plantation, Kanchanaburi Province

วีระภาส คุณรัตนศิริ* และยุทธนา เกิงล้อม

Weeraphart Khunrattanasiri* and Yutthana Thoenglom

ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok, Thailand 10600

*Corresponding author: weeraphart.k@ku.th

Abstract

Received : May 30, 2021

Revised : August 17, 2021

Accepted: October 04, 2022

The teak volume prediction is an important data for planning a teak plantation management. This study aimed to investigate the vegetation indices using Sentinel-2 satellite imagery data for teak volume prediction based on data from Thong Pha Phum Plantation, Kanchanaburi province. The linear regression was used to explain the relationship between teak volume and vegetation indices from Sentinel-2 satellite imagery data. Ratio Vegetation Index (RVI) Difference Vegetation Index (DVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) were used as the independent variables in the equation. The results revealed that SAVI (values with L equal to 0.5) was the best vegetation index for teak volume prediction based on Sentinel-2 satellite imagery data. The equation was $\text{teak volume (y)} = 10.064 (\text{SAVI}) - 98.736$ and the coefficient of determination was 0.73. The mean absolute error (MAE) and the root mean squared error (RMSE) were used to check the equation precision for teak volume prediction. The MAE was 1.52 and the RMSE was 1.92. The teak volume calculated based on the given equation was 199,366.68 cubic meters and the average of teak volume per rai was calculated to be 18.51 cubic meters.

Keywords: linear regression, teak volume, vegetation index, Sentinel-2 satellite imagery data
Thong Pha Phum plantation

บทคัดย่อ

การคาดการณ์ปริมาณไม้สักเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวางแผนจัดการไม้สักในสวนป่า โดยการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 สำหรับคาดการณ์ปริมาณไม้สัก บริเวณสวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไม้สักที่คำนวณได้จากแปลงตัวอย่างภาคสนามและดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ Ratio Vegetation Index (RVI), Difference Vegetation Index (DMI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) และ Atmospherically Resistant Vegetation index (ARVI) เป็นตัวแปรอิสระ ผลการศึกษาพบว่าดัชนีพืชพรรณ SAVI ที่กำหนดค่าคงที่ L เท่ากับ 0.5 เป็นตัวแปรอิสระที่เข้าสู่สมการ เป็นสมการคาดการณ์ปริมาณไม้สักที่เหมาะสมที่สุดของข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 โดยสมการปริมาณไม้สัก (y) = 10.064 (SAVI) - 98.736 มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.73 ตรวจสอบความแม่นยำของสมการคาดการณ์ปริมาณไม้สัก มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 1.52 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 1.92 สามารถคาดการณ์ปริมาณไม้สัก ด้วยการใช้สมการคาดการณ์ปริมาณไม้สักเท่ากับ $199,366.68$ ลูกบาศก์เมตร และปริมาณไม้สักเฉลี่ยต่อไร่เท่ากับ 18.51 ลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ: การถดถอยเชิงเส้น ปริมาณไม้สัก
ดัชนีพืชพรรณ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม
Sentinel-2 สวนป่าทองผาภูมิ

คำนำ

องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ เป็นองค์กรหลักในการปลูกสร้างสวนป่าของภาครัฐ โดยมีพื้นที่ปลูกสร้างสวนป่าที่ครอบคลุมทุกภูมิภาคของประเทศไทย เพื่อตอบสนองต่อการใช้ประโยชน์จากไม้ภายในประเทศ โดยเฉพาะไม้สักที่เป็นไม้เศรษฐกิจหลักของประเทศไทย (Sangcharoen, 1973) ในการบริหารจัดการผลผลิตของสวนป่าจำเป็นต้องมีการคาดการณ์ปริมาณของไม้ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยใช้เทคนิคการวางแผนสำรวจซึ่งต้องอาศัยแรงงานคนในการเก็บข้อมูล แต่การศึกษาปริมาณไม้ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ มาใช้งานเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับบริหารจัดการผลผลิตภายในสวนป่า การรับรู้ระยะไกลทางด้านดาวเทียมเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากทำให้สะดวกรวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายในการเก็บรวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูล (Lillesand *et al.*, 2015)

ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation index) เป็นกระบวนการสังเคราะห์ชั้นข้อมูลใหม่จากการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในแถบความถี่ที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณ 2 แถบความถี่ขึ้นไป โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบมาเพื่อให้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของพืช ได้แก่ รงควัตถุ (Pigment) องค์ประกอบของน้ำ และโครงสร้างภายในพืช (Huete *et al.*, 2002) จากศึกษาของ Redowan *et al.* (2015) ที่ได้ศึกษาการคาดการณ์ปริมาณไม้บริเวณพื้นที่ป่า ในประเทศบังคลาเทศ โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไม้และดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 5 ระบบบันทึกภาพ TM พบว่าสมการคาดการณ์ปริมาณไม้ที่ดีที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.77 และ Nuthammachot *et al.* (2018) ที่ได้ศึกษาการ

คาดการณ์ชีวมวลเหนือพื้นดินบริเวณพื้นที่ป่า Girisekar และ Jetis ประเทศอินโดนีเซีย โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างชีวมวลเหนือพื้นดินและดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 พบว่าสมการคาดการณ์ชีวมวลเหนือพื้นดินที่ดีที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.74 ในครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 เป็นดาวเทียมระบบ Passive ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลภาพ สามารถดาวน์โหลดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายจึงพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 สำหรับสร้างดัชนีพืชพรรณเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์กับปริมาณไม้สัก

การศึกษาในครั้งนี้ทำการศึกษาบริเวณสวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เนื่องจากสวนป่าทองผาภูมิถือได้ว่าเป็นสวนป่าที่ให้ผลผลิตไม้สักที่สำคัญแห่งหนึ่งของประเทศไทย (Forest Industry Organization, 2014) โดยมีพื้นที่ปลูกไม้สักขนาดใหญ่และมีการปลูกไม้สักหลายชั้นอายุ อีกทั้งยังได้รับรองตามมาตรฐานของ Forest Standard Certification (FSC) ในการเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณปริมาณไม้สักต้องอาศัยแรงงานคน ทำให้เกิดปัญหา เช่น ความถูกต้องในการเก็บข้อมูลต้นไม้ ใช้งบประมาณมาก และใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลเป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการคาดการณ์ปริมาณไม้สัก โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 บริเวณสวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นแนวคิดที่นำเทคนิคทางด้านการรับรู้ระยะไกลที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเข้ามาช่วย เพื่อให้ประหยัดงบประมาณ รวดเร็ว และมีความถูกต้องสำหรับคาดการณ์ปริมาณไม้สัก

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

สวนป่าทองผาภูมิ เป็นหน่วยงานในสังกัดองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (อ.อ.ป.) ซึ่งเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ ในความดูแลของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สำนักงานสวนป่าทองผาภูมิ ตั้งอยู่หมู่ที่ 6 ตำบลห้วยเขย่ง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ลักษณะภูมิประเทศทางทิศตะวันออกมีลักษณะเป็นภูเขาหินปูนทอดตลอดแนวจากด้านเหนือถึงด้านใต้ และทางทิศตะวันตกมีลักษณะเป็นภูเขาแกรนิต เป็นเนินเขาลูกคลื่นลอนชันสลับลูกคลื่นลอนลาด และลักษณะภูมิอากาศแบ่งออกได้ 3 ฤดูกาล คือ ฤดูร้อนเริ่มตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม ฤดูฝนเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนพฤศจิกายน ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปี 1,764.6 มิลลิเมตร และฤดูหนาวเริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีเท่ากับ 26.5 องศาเซลเซียส (Forest Industry Organization, 2014) ในปัจจุบันมีพื้นที่รับผิดชอบทั้งหมด 19,243.55 ไร่ มีพื้นที่ปลูกไม้สักทั้งหมด 15,231.90 ไร่ โดยพื้นที่ศึกษา คือ พื้นที่แปลงปลูกไม้สักที่มีระยะปลูก 4×4 เมตร อายุ 15 ปีขึ้นไป มีทั้งหมด 19 ชั้นอายุ ได้แก่ แปลงปลูกปี พ.ศ. 2524 อายุ 38 ปี มีขนาดพื้นที่ 149.16 ไร่ แปลงปลูกปี พ.ศ. 2525 อายุ 37 ปี มีขนาดพื้นที่ 362.93 ไร่ แปลงปลูกปี พ.ศ. 2526 อายุ 36 ปี มีขนาดพื้นที่ 20.13 ไร่ แปลงปลูกปี พ.ศ. 2527 อายุ 35 ปี มีขนาดพื้นที่ 3.01 ไร่ แปลงปลูกปี พ.ศ. 2529 อายุ 33 ปี มีขนาดพื้นที่ 356.71 ไร่ แปลง

ปลูกปี พ.ศ. 2530 อายุ 32 ปี มีขนาดพื้นที่ 751.09 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2531 อายุ 31 ปี มีขนาดพื้นที่ 784.83 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2532 อายุ 30 ปี มีขนาดพื้นที่ 280.62 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2534 อายุ 28 ปี มีขนาดพื้นที่ 132.67 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2535 อายุ 27 ปี มีขนาดพื้นที่ 722.79 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2536 อายุ 26 ปี มีขนาดพื้นที่ 2,169.91 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2537 อายุ 25 ปี มีขนาดพื้นที่ 843.25 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2538 อายุ 24 ปี มีขนาดพื้นที่ 245.07 ไร่

แปลงปลูกปี พ.ศ. 2539 อายุ 23 ปี มีขนาดพื้นที่ 1,040.00 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2543 อายุ 19 ปี มีขนาดพื้นที่ 895.53 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2544 อายุ 18 ปี มีขนาดพื้นที่ 344.33 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2545 อายุ 17 ปี มีขนาดพื้นที่ 86.73 ไร่
แปลงปลูกปี พ.ศ. 2546 อายุ 16 ปี มีขนาดพื้นที่ 925.96 ไร่
และแปลงปลูกปี พ.ศ. 2547 อายุ 15 ปี มีขนาดพื้นที่ 653.98 ไร่
ซึ่งพื้นที่ศึกษามีขนาดพื้นที่รวมเท่ากับ 10,768.70 ไร่ (Figure 1)

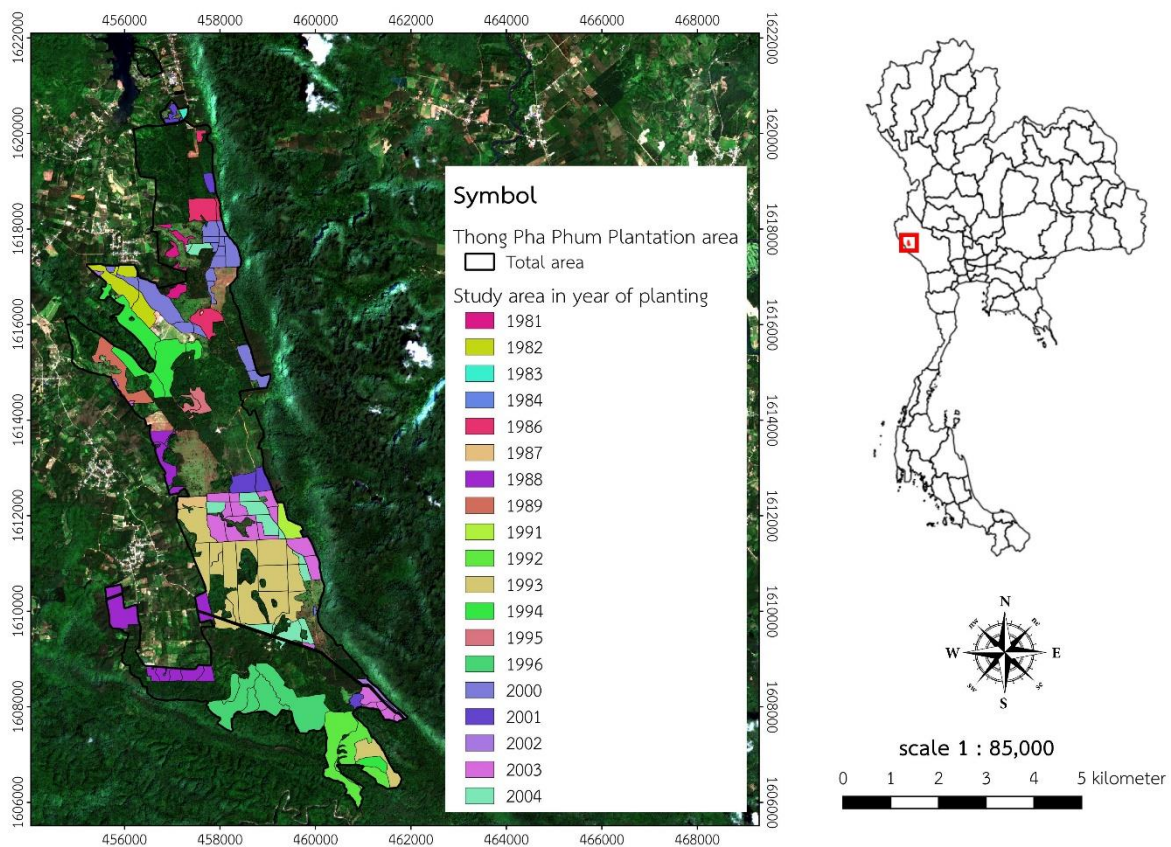


Figure 1 Study area in Thong Pha Phum plantation, Kanchanaburi province

การเก็บข้อมูลภาคสนาม

การเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยกำหนดแปลงตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 80 แปลง แบ่งแปลงตัวอย่างตามการศึกษาของ Redowan *et al.* (2015) สำหรับคำนวณสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักร้อยละ 70 มีจำนวน 56 แปลงตัวอย่าง และสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักร้อยละ 30 มีจำนวน 24

แปลงตัวอย่าง ใช้แปลงตัวอย่างรูปแบบวงกลมพื้นที่ 0.05 เฮกตาร์ หรือขนาดรัศมีเท่ากับ 12 เมตร กำหนดตำแหน่งวางแปลงตัวอย่างกระจายครอบคลุมพื้นที่ศึกษา โดยทำการสุ่มตำแหน่งแปลงตัวอย่างแบบง่าย (Simple random sampling) โดยใช้โปรแกรม QGIS (Figure 2) สำหรับใช้ในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

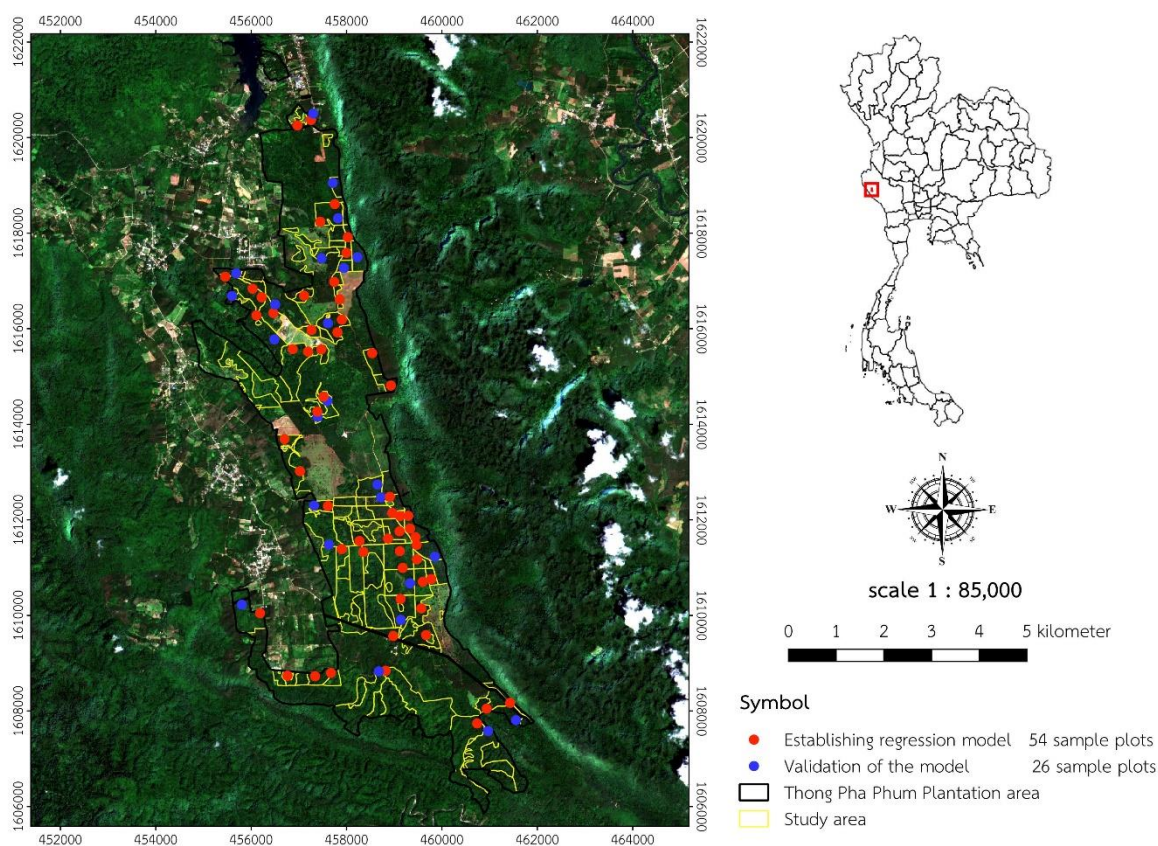


Figure 2 Field samples in Thong Pha Phum plantation, Kanchanaburi province

เก็บข้อมูลขนาดของไม้สักทุกต้นในแปลงตัวอย่าง โดยทำการเก็บข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางที่โคนท่อน โดยวัดที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 10 เซนติเมตร (Prasomsin, 1991) เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอกซึ่งเป็นการวัดที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1.30 เมตร ทำการวัดด้วยเทปวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ (Diameter tape) ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูง

กึ่งกลางท่อน เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับความสูงที่เป็นสินค้าได้ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ Pentaprism caliper ความสูงที่เป็นสินค้าได้ ใช้ระดับความสูงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และความสูงทั้งหมดทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดความสูงของต้นไม้ Nikon forestry pro รุ่นที่ 2

การเตรียมข้อมูลภาพดาวเทียม

ข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2B ระบบบันทึกภาพ Multispectral Instrument (MSI) ผลิตภัณฑ์แบบ L2A ซึ่งข้อมูลภาพดาวเทียมได้มีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงรังสี (Radiometric correction) ให้เป็นการสะท้อนแสงที่ Bottom of Atmosphere (BOA) และมีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิต (Geometric correction) เลือกใช้แถบความถี่ที่มีความละเอียดทางตำแหน่งราบ 10 เมตร จำนวน 4 แถบความถี่ ได้แก่ แถบความถี่น้ำเงิน (Blue) แถบความถี่เขียว (Green) แถบความถี่แดง (Red) และแถบความถี่อินฟราเรดใกล้ (Near infrared) (European Space Agency, 2015) เนื่องจากเป็นแถบความถี่ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ บันทึกภาพวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2562 มีเมฆปกคลุมพื้นที่ร้อยละ 7.65 โดยเลือกช่วงเวลาที่ดินดาวเทียมบันทึกภาพให้ใกล้เคียงกับช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ปริมาตรไม้สักได้จากการคำนวณผลรวมของปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ และปริมาตรไม้สักท่อนสุดท้ายที่ไม่สามารถทำเป็นสินค้าได้ โดยใช้สมการคำนวณปริมาตรไม้สัก ดังนี้

1. การคำนวณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ โดยใช้สมการของ Newton's formular ดังสมการ (1) ซึ่งเป็นสมการที่ขจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความ

เรียวและทำให้ได้ปริมาตรที่ใกล้เคียงปริมาตรจริงมากที่สุด (Husch *et al.*, 2003)

$$V = \frac{h}{6} (A_b + A_m + A_u) \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ (ลูกบาศก์เมตร)

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดที่โคนท่อน (ตารางเมตร)

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดที่กึ่งกลางท่อน (ตารางเมตร)

A_u คือ พื้นที่หน้าตัดที่เป็นสินค้าได้ (ตารางเมตร)

h คือ ความสูงที่เป็นสินค้าได้ (เมตร)

2. การคำนวณปริมาตรไม้สักท่อนสุดท้ายที่ไม่สามารถทำเป็นสินค้าได้ โดยใช้สมการคำนวณปริมาตรรูปทรงกรวย (Cone) ดังสมการ (2) (Husch *et al.*, 2003)

$$V = \frac{1}{3} (A_u h) \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรไม้สักท่อนสุดท้าย (ลูกบาศก์เมตร)

A_u คือ พื้นที่หน้าตัดที่เป็นสินค้าได้ (ตารางเมตร)

H คือ ผลต่างของความสูงทั้งหมดกับความสูงที่เป็นสินค้าได้ (เมตร)

การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 ที่ใช้ในการศึกษา (Table 1) สำหรับนำไปหาความสัมพันธ์กับปริมาตรไม้สัก

Table 1 Vegetation Index used in education

Vegetation Index	Equation	References
Ratio Vegetation Index (RVI)	$\frac{\text{NIR}}{\text{RED}}$	Jordan (1969)
Difference Vegetation Index (DVI)	$\text{NIR} - \text{RED}$	Tucker (1979)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$	Kriegler <i>et al.</i> (1969)
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	$\frac{\text{NIR} - \text{GREEN}}{\text{NIR} + \text{GREEN}}$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$\frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED} + L} \times (1 + L)$	Huete (1988)
Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$\frac{\text{NIR} - \text{RED} - \gamma(\text{BLUE} - \text{RED})}{\text{NIR} + \text{RED} - \gamma(\text{BLUE} - \text{RED})}$	Kaufman and Tanre (1992)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและผลรวมของค่าดัชนีพืชพรรณในหน้าต่างขนาด 3x3 จุดภาพจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ Ratio Vegetation Index (RVI), Difference Vegetation Index (DVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) และ Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) ในบริเวณตำแหน่งเดียวกันกับแปลงตัวอย่างภาคสนามด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) โดยกำหนดปริมาณไม้สักทั้งหมดที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามเป็นตัวแปรตาม และดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 เป็นตัวแปรอิสระ แสดงรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้น ดังสมการ (3) (Ravindranath, 1981)

$$y = a + bx \quad (3)$$

เมื่อ y คือ ค่าการคาดการณ์ปริมาณไม้สัก
 a คือ ค่าที่เส้นสมการถดถอยตัดแกน Y
 b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย
 x คือ ค่าดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ RVI, DVI, NDVI, GNDVI และ ARVI ตามลำดับ

พิจารณาความเหมาะสมของสมการคาดการณ์ปริมาณไม้สัก โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of determination: R^2) ที่มีค่าสูงที่สุด และพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการความสัมพันธ์ด้วยสถิติทดสอบ Overall F-test จากตาราง ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α เท่ากับ 0.05)

ตรวจสอบความถูกต้องของสมการคาดการณ์ ปริมาตรไม้สัก โดยนำข้อมูลแปลงตัวอย่างที่ใช้สำหรับ ตรวจสอบความถูกต้อง มาเปรียบเทียบกับผลต่างระหว่าง ปริมาตรไม้ที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนาม และ ปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากสมการคาดการณ์ปริมาตร ไม้สัก และตรวจสอบความแม่นยำของสมการคาดการณ์ ปริมาตรไม้สัก โดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error: RMSE) จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ โดยใช้สถิติทดสอบ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α เท่ากับ 0.05)

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ปริมาตรไม้สัก

ผลการวิเคราะห์ปริมาตรไม้สักจากแปลงตัวอย่าง ภาคสนามจำนวน 80 แปลงตัวอย่าง พบว่าปริมาตรไม้สัก ที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามมีปริมาตรไม้สัก ต่อไร่อยู่ระหว่าง 11.88 ถึง 23.75 ลูกบาศก์เมตร มีปริมาตร ไม้สักเฉลี่ยต่อไร่เท่ากับ 18.43 ลูกบาศก์เมตร ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานเท่ากับ 2.92 แสดงตารางข้อมูลแปลงตัวอย่าง ภาคสนาม และปริมาตรไม้สักในแปลงตัวอย่างและปีที่ปลูก (Table 2) และแผนภาพการกระจายของปริมาตรไม้สัก เฉลี่ยต่อไร่ในแต่ละปีที่ปลูก (Figure 3)

Table 2 The field sample plots data and teak volume in sample plots each year of planting

Year of planting	Number of sample plots	Average number of tree	Average DBH (cm)	Teak volume (m ³ /rai)		
				Minimum	Maximum	Average
1981	1	5.00	39.00	-	22.24	22.24
1982	4	6.75	33.49	18.43	21.78	19.97
1983	2	18.00	26.53	21.04	21.49	21.27
1986	6	10.17	29.62	14.58	22.60	19.22
1987	2	5.50	36.81	20.64	21.76	21.2
1988	7	10.43	28.00	14.89	23.75	18.62
1991	3	14.00	25.31	18.03	21.62	20.01
1992	2	16.00	24.96	18.65	21.70	20.17
1993	12	15.25	23.86	11.88	23.27	18.91
1994	6	15.17	23.54	16.17	21.69	19.44
1995	4	18.25	22.64	16.55	19.37	18.23
1996	2	20.00	22.93	16.21	23.70	20.19
2000	11	28.18	18.62	14.03	20.75	18.59

Table 2 (Continued)

Year of planting	Number of sample plots	Average number of tree	Average DBH (cm)	Teak volume (m ³ /rai)		
				Minimum	Maximum	Average
2001	3	28.00	19.16	20.51	20.75	18.43
2002	2	23.00	19.39	16.92	19.86	18.39
2003	7	28.00	17.67	13.21	19.87	15.08
2004	6	29.17	16.77	11.98	18.00	14.26
Average teak volume (m ³ /rai)						18.43
Standard deviation						2.92

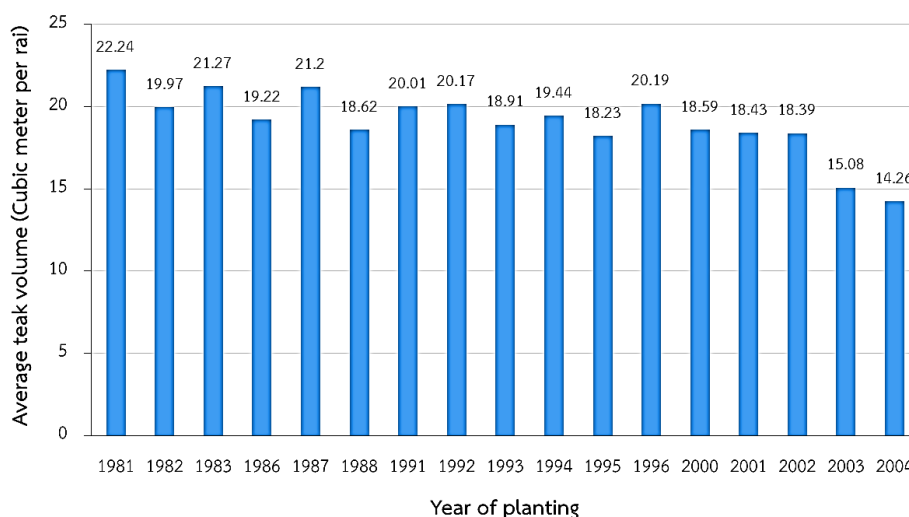


Figure 3 Average teak volume per rai in each year of planting

การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

ผลการวิเคราะห์ผลรวมของค่าดัชนีพืชพรรณ ในหน้าต่างขนาด 3×3 จุดภาพ จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ RVI, DVI, NDVI, GNDVI, SAVI และ ARVI ในบริเวณตำแหน่งเดียวกันกับแปลงตัวอย่าง ภาคสนามจำนวน 80 แปลงตัวอย่าง พบว่าดัชนีพืชพรรณ RVI มีค่าอยู่ระหว่าง 82.43 ถึง 159.85 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

123.88 DVI มีค่าอยู่ระหว่าง 21,737 ถึง 32,029 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26,961.80 NDVI มีค่าอยู่ระหว่าง 7.20 ถึง 8.04 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.75 GNDVI มีค่าอยู่ระหว่าง 6.14 ถึง 7.13 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.72 SAVI (L เท่ากับ 0.5) มีค่าอยู่ระหว่าง 10.80 ถึง 12.06 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.62 และ ARVI (γ เท่ากับ 1) มีค่าอยู่ระหว่าง 7.10 ถึง 8.16 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.84

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรไม้สักและดัชนีพืชพรรณ

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่างปริมาตรไม้สักที่คำนวณได้จากแปลงตัวอย่างภาคสนามและผลรวมของดัชนีพืชพรรณในหน้าต่างขนาด 3x3 จุดภาพ (Figure 4) โดยพิจารณารูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักที่เหมาะสมที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดสูงสุด พบว่าดัชนีพืชพรรณ SAVI ที่กำหนดค่าคงที่ L เท่ากับ 0.5 เป็นตัวแปรอิสระที่เข้าสู่สมการ เป็นรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.73 ดังสมการ

ปริมาตรไม้สัก (y) = 10.064 (SAVI) - 98.736 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้สถิติทดสอบแบบ Overall F-test พบว่า ค่าสถิติทดสอบ F มีค่าเท่ากับ 142.67 ให้ค่า p-value เท่ากับ 0.00 ซึ่งค่าสถิติทดสอบ F จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าในขอบเขตวิกฤต $F_{0.05(1,54)}$ เท่ากับ 4.02 แสดงถึงข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α เท่ากับ 0.05) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าดัชนีพืชพรรณ SAVI ที่กำหนดค่าคงที่ L เท่ากับ 0.5 สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาตรไม้สักได้

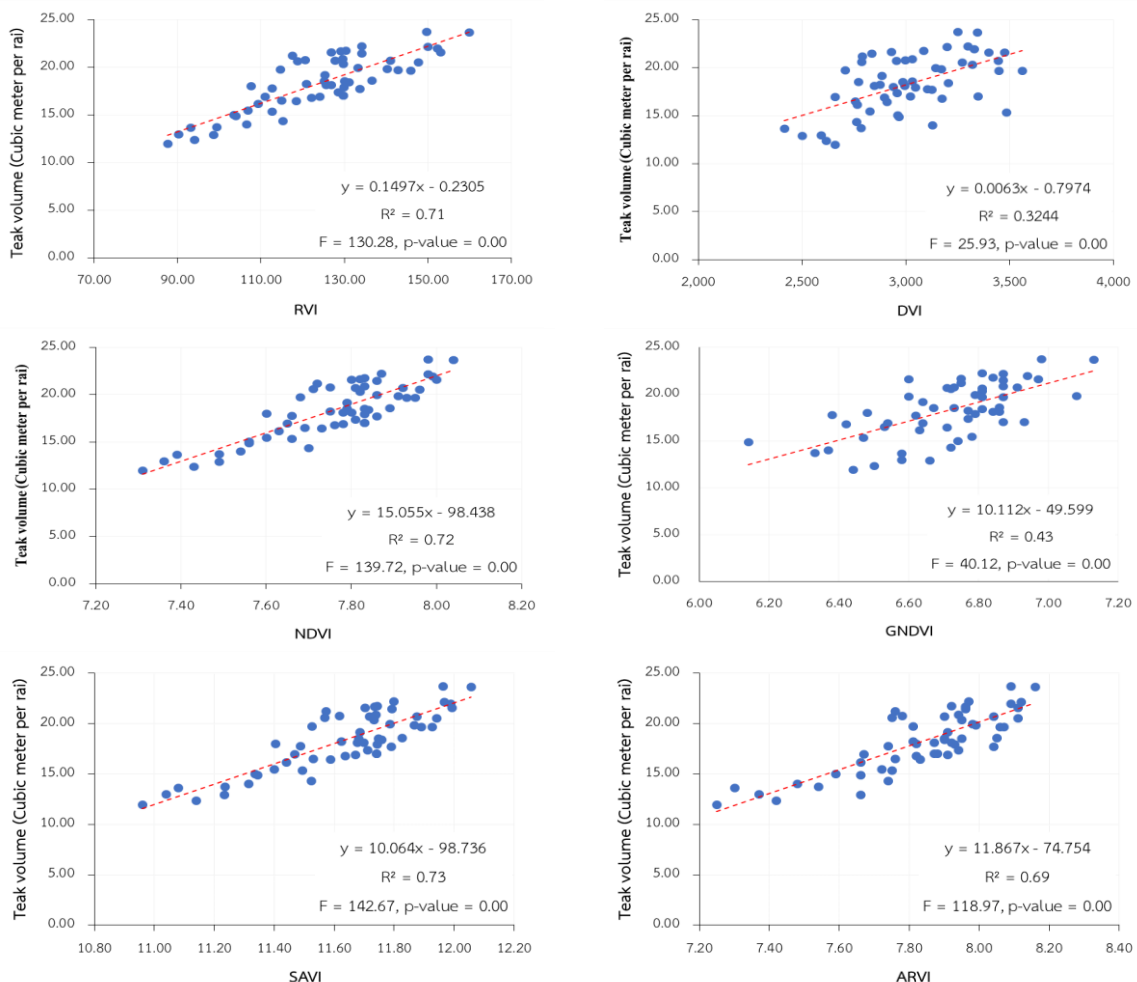


Figure 4 Scatter plot between teak volume and RVI, DVI, NDVI, GNDVI, SAVI and ARVI

การตรวจสอบความถูกต้อง

ผลการตรวจสอบความถูกต้องจากการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักของข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 พบว่าปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามเท่ากับ 449.59 ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักเท่ากับ 439.09 ลูกบาศก์เมตร โดยผลต่างของปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามสูงกว่าปริมาตรไม้ที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักเท่ากับ 10.50 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นผลต่างร้อยละ 2.34 ตรวจสอบความแม่นยำของรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก โดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.52 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.92 (Table 3) เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล

โดยใช้สถิติทดสอบแบบ t-test พบว่า ค่าสถิติทดสอบ t มีค่าเท่ากับ 1.12 ให้ค่า p-value เท่ากับ 0.27 ซึ่งค่าสถิติทดสอบ t จากการทดสอบมีค่าทางสถิติต่ำกว่าค่าในขอบเขตวิกฤต $t < t_{0.05(23)}$ เท่ากับ 1.71 แสดงถึงปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α เท่ากับ 0.05) แสดงการกระจายระหว่างปริมาตรไม้ที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักของข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-2 (Figure 5) และพบว่าผลการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักทั้งหมดบริเวณพื้นที่ศึกษาสามารถคาดการณ์ปริมาตรไม้สักได้เท่ากับ 199,366.68 ลูกบาศก์เมตร มีปริมาตรไม้สักเฉลี่ยเท่ากับ 18.51 ลูกบาศก์เมตร ต่อไร่

Table 3 The difference between teak volume calculated from field sample plots and teak volume calculated from teak volume prediction equation model

No.	Field sample plots (m ³ /rai)	Prediction equation model (m ³ /rai)	Difference (m ³)
1	18.43	18.40	0.03
2	21.04	19.75	1.29
3	14.58	14.45	0.13
4	22.60	20.91	1.69
5	21.76	18.80	2.96
6	17.80	19.83	-2.03
7	18.65	17.91	0.74
8	21.79	21.64	0.15
9	23.27	20.36	2.91
10	17.73	16.62	1.11

Table 3 (Continued)

No.	Field sample plots (m ³ /rai)	Prediction equation model (m ³ /rai)	Difference (m ³)
11	11.88	11.76	0.12
12	21.69	18.63	3.06
13	18.42	17.61	0.81
14	17.78	18.81	-1.03
15	19.37	18.02	1.35
16	19.80	20.73	-0.93
17	20.43	18.16	2.27
18	16.90	19.65	-2.75
19	16.21	19.27	-3.06
20	17.25	20.19	-2.94
21	20.51	20.60	-0.09
22	19.87	18.96	0.91
23	13.86	9.96	3.90
24	17.97	18.07	-0.10
Total	449.59	439.09	10.50
Percentage difference			2.34
Mean absolute error			1.52
Root mean squared error			1.92

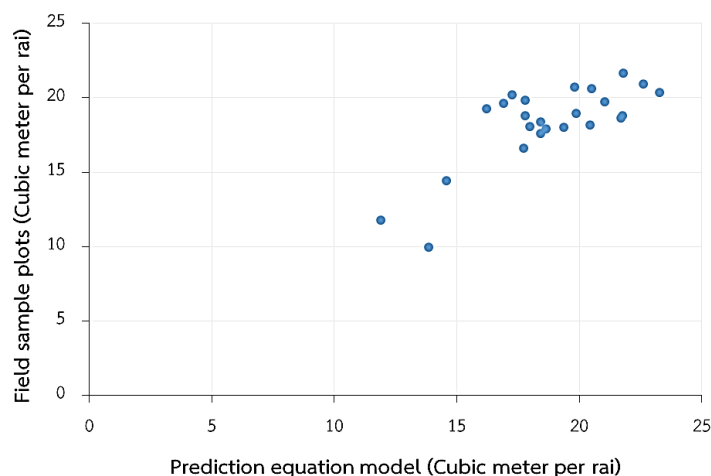


Figure 5 Scatter plot between teak volume calculated from field sample plots and teak volume calculated from teak volume prediction equation model

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้คาดการณ์ปริมาตรไม้สัก บริเวณสวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรไม้ที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและดัชนีพืชพรรณ SAVI ที่กำหนดค่าคงที่ L เท่ากับ 0.5 เป็นตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการมีความเหมาะสมที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.73 โดยดัชนีพืชพรรณ SAVI ถูกพัฒนาเพื่อลดผลกระทบจากการสะท้อนพลังงานของดินจากการใช้ค่าคงที่ L สำหรับพื้นที่ที่มีพืชพรรณปกคลุมสูงค่าคงที่ L เท่ากับ 0 หรือ 0.25 พื้นที่ที่มีพืชพรรณปกคลุมปานกลางค่าคงที่ L เท่ากับ 0.5 และพื้นที่ที่มีพืชพรรณปกคลุมต่ำค่าคงที่ L เท่ากับ 0.75 (Huete, 1988) จากการเก็บข้อมูลภาคสนามพบว่า ค่าคงที่ L เท่ากับ 0.5 เป็นค่าที่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษามากที่สุด เนื่องจากการเก็บข้อมูลแปลงปลูกไม้สักที่มีระยะปลูก 4x4 เมตร อายุ 15 ปีขึ้นไป ซึ่งเป็นแปลงปลูกไม้สักที่มีการตัดสางขยายระยะ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างลำต้นมากขึ้น จึงส่งผลให้มีผลกระทบเกี่ยวกับการสะท้อนพลังงานของดิน

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดที่ได้จากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.73 เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับรายงานการวิจัยของ Chang and Shoshany (2016) ที่ได้ศึกษาการคาดการณ์ชีวมวลเหนือพื้นดินของไม้พุ่มบริเวณชายฝั่งทะเลเมดิเตอร์เรเนียน โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของรูปแบบสมการคาดการณ์มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของไม้พุ่มจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าเท่ากับ 0.72 และ Nuthammachot *et al.* (2018) ที่ได้ศึกษาการคาดการณ์ชีวมวลเหนือพื้นดินบริเวณพื้นที่ป่า Girisekar และ Jetis ประเทศอินโดนีเซีย โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของรูปแบบสมการคาดการณ์มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าเท่ากับ 0.74

เมื่อพิจารณาความแม่นยำของสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 1.52 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

เท่ากับ 1.92 และพิจารณาความแตกต่างของข้อมูลระหว่างปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและปริมาตรไม้ที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ถือได้ว่าเป็นความใกล้เคียงกัน และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α เท่ากับ 0.05) ดังนั้นสามารถนำรูปแบบสมการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก บริเวณสวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ได้โดยไม่ต้องเข้าไปสำรวจภาคสนามทั้งหมด เพื่อลดระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักสำหรับนำข้อมูลไปสนับสนุนในการบริหารจัดการสวนป่า อย่างไรก็ตามในการนำรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักมาใช้สำหรับคาดการณ์ปริมาตรไม้สักในปีต่อไป ต้องคำนึงถึงช่วงเวลาสำหรับดาวเทียม Sentinel-2 โดยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณพื้นที่ศึกษาต้องปราศจากเมฆ และเป็นช่วงที่ไม้สักยังไม่ผลัดใบ เนื่องจากการผลัดใบของไม้สักส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงลดลงทำให้ปริมาตรไม้สักที่คาดการณ์ได้ลดลงตามไปด้วย ดังนั้นควรเลือกดาวเทียม Sentinel-2 ในช่วงปลายฝนต้นหนาว (เดือนตุลาคม – เดือนพฤศจิกายน) ซึ่งเป็นช่วงที่มีเมฆบดบังน้อยและไม้สักยังไม่ผลัดใบ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในปีนั้น ๆ

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ Ratio Vegetation Index (RVI), Difference Vegetation Index (DVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) และ Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) โดยกำหนดปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลง

ตัวอย่างภาคสนามเป็นตัวแปรตาม และดัชนีพืชพรรณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 เป็นตัวแปรอิสระ พบว่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่างปริมาตรไม้สักที่คำนวณได้จากแปลงตัวอย่างภาคสนามและผลรวมของค่าดัชนีพืชพรรณในหน้าต่างขนาด 3x3 จุดภาพ โดยมีดัชนีพืชพรรณ SAVI ที่กำหนดค่าคงที่ L เท่ากับ 0.5 เป็นตัวแปรอิสระที่เข้าสู่สมการ เป็นรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังสมการปริมาตรไม้สัก (y) = 10.064(SAVI) – 98.736 มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.73 ตรวจสอบความแม่นยำของรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก มีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 1.52 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 1.92 เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้สถิติทดสอบแบบ t-test พบว่าปริมาตรไม้สักทั้งหมดที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและปริมาตรไม้สักทั้งหมดที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α เท่ากับ 0.05) ผลการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักทั้งหมดบริเวณพื้นที่ศึกษา พบว่าสามารถคาดการณ์ปริมาตรไม้สักได้เท่ากับ 199,366.68 ลูกบาศก์เมตร มีปริมาตรไม้สักเฉลี่ยต่อไร่เท่ากับ 18.51 ลูกบาศก์เมตร

ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาครั้งนี้ได้เก็บรวบรวมข้อมูลในสวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักที่ได้เหมาะสำหรับใช้ในสวนป่าทองผาภูมิเท่านั้น ในสวนป่าท้องที่อื่น ๆ หากจะนำรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักดังกล่าวไปใช้ ต้องมีการทดสอบรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาตรไม้สักที่คำนวณจากแปลงตัวอย่างภาคสนามและปริมาตรไม้ที่คำนวณจากรูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สัก ถ้าไม่แตกต่างกันก็สามารถนำไปใช้คาดการณ์ปริมาตรไม้สักได้

2. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรไม้สักกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมควรเลือกแปลงปลูกไม้สักที่มีเรือนยอดชิดกัน เพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับการสะท้อนของดินหรือไม้พื้นล่างชนิดอื่นที่ไม่ต้องการ จะทำให้รูปแบบสมการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักที่ได้มีความแม่นยำในการคาดการณ์ปริมาตรไม้สักมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณเสด็จ สุยอวน หัวหน้างานสวนป่า คุณภาณุวัฒน์ คำกาบ ผู้ช่วยหัวหน้างานสวนป่า และเจ้าหน้าที่สวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัย ที่พัก และให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนามจนเสร็จสิ้น

เอกสารอ้างอิง

- Chang, J. and M. Shoshany. 2016. Mediterranean Shrublands Biomass Estimation using Sentinel-1 and Sentinel-2. pp. 5300-5303. *In Proceedings of the 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Beijing: IEEE Xplore.
- European Space Agency. 2015. **Sentinel-2 User Handbook**. Paris: European Space Agency. 64 p.
- Forest Industry Organization. 2014. **Sustainable Forest Management Thong Pha Phum Plantation**. Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment. 14 p. [in Thai]
- Gitelson, A.A., Y.J. Kaufman and M.N. Merzlyak. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment** 58(3): 289-298.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment** 25(3): 295-309.
- Huete, A.R., K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X. Gao and L.G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment** 83(1-2): 195-213.
- Husch, B., T. Beers and J.A. Kershaw. 2003. **Forest Mensuration**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 456 p.
- Jordan, C.F. 1969. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology** 50(4): 663-666.
- Kaufman, Y.J. and D. Tanre. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 30(2): 261-270.
- Kriegler, F., W. Malila, R. Nalepka and W. Richardson. 1969. Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition. pp. 97-131. *In Proceedings of the 6th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, MI: University of Michigan.

- Lillesand, T.M., R.W. Kiefer and J.W. Chipman. 2015. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 736 p.
- Nuthammachot, N., W. Phairuang, P. Wicaksono and T. Phairuang. 2018. Estimating Aboveground Biomass on Private Forest Using Sentinel-2 Imagery. **Journal of Sensors** 2018(2): 1-11. DOI:10.1155/2018/6745629.
- Prasomsin, P. 1991. **A Manual of Forest Mathematics Operations**. Bangkok: Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University. 138 p. [in Thai]
- Ravindranath, M.H. 1981. **Manual of Research Methods for Crustacean Biochemistry and Physiology**. Madras: Central Marine Fisheries Research Institute. 172 p.
- Redowan, M., R. Akter, M. Islam, K.M. Masum and M.S.H. Chowdhury. 2015. Estimating growing stock volume in a Bangladesh forest site using Landsat TM and field-measured data. **International Journal of Geomatics and Geosciences** 6(2): 1607-1619.
- Sangcharoen, R. 1973. A role of teak in economic development. **KU News** 18(6): 36-49. [in Thai]
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment** 8(2): 127-150.