

การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล

Quantifying Above Ground Carbon Sequestration Using Remote Sensing Technology

ญาณวุฒิ อุทรักษ์¹, ธนัทเดช โรจนกุล^{1,2}, วีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ^{1,2*}

Yannawut Uttaruk¹, Tanutdech Rotjanakusol^{1,2}, Teerawong Laosuwan^{1,2*}

Received: 21 August 2016 ; Accepted: 9 January 2017

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล ในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนผลไม้ร่วมกับดัชนีพืชพรรณใน 2 รูปแบบคือ 1) การลบแบบง่าย 2) การหารแบบง่าย ร่วมกับการสำรวจข้อมูลภาคสนาม โดยวิธีการศึกษาได้ใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI บันทึกข้อมูลเมื่อวันที่ 8 เดือน มกราคม พ.ศ. 2558 มาปรับแก้ค่าสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศ จากนั้นทำการหาค่าสัดส่วนการ ปกคลุม และนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI และข้อมูลภาคสนาม โดยผลการศึกษาพบว่าด้วยการลบแบบง่าย ได้สมการความสัมพันธ์ $y = 0.3184e^{0.048x}$ มีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด $R^2 = 0.845$ ทำให้คำนวณปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินคิดเป็นปริมาณ 213.176 ตันต่อไร่ ด้วยการหารแบบง่าย ได้สมการความสัมพันธ์ $y = 0.8900e^{0.047x}$ มีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด $R^2 = 0.774$ ทำให้คำนวณปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินคิดเป็นปริมาณ 224.229 ตันต่อไร่

คำสำคัญ: การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน การสำรวจระยะไกล

Abstract

The objective of the study was to apply remote sensing technology to estimate above ground carbon sequestration of orchards with vegetation indices into two forms: 1) NIR-RED, and 2) NIR/RED. It also aims to explore field data by using the data from a satellite named Landsat 8 OLI that was recorded on 8 January 2015 to adjust the Top of Atmosphere (ToA) reflectance, then determine the percentage of fractional cover, and build the relationship equation between satellite data from Landsat 8 OLI and field data. The results from NIR-RED showed the equation $y = 0.3184e^{0.048x}$ with the coefficient of $R^2 = 0.845$. As a result, the calculated amount of above ground carbon was 213.176 tons per rai. Meanwhile, the results from NIR/RED showed relationship equation $y = 0.8900e^{0.047x}$ with the coefficient of $R^2 = 0.774$. As a result, the calculated amount of above ground carbon was 224.229 tons per rai.

Keywords: Quantifying Above Ground Carbon Sequestration, Remote Sensing

บทนำ

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศปัจจุบันมิได้เพิ่มขึ้นจากฝีมือของมนุษย์ที่เผาผลาญเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติเท่านั้น แต่ยังเกิดจากการที่พื้นที่ป่าไม้ โดย เฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ในป่าดิบ ในเขตป่า

ร้อนชื้นของโลก ที่ส่วนมากอยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนาถูกทำลายไปเพื่อวัตถุประสงค์ในด้านการค้า เพื่อการเพาะปลูกหรือเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น^{1,2,3} โดยการทำให้ป่าไม้เหล่านั้นได้ทำปฏิกิริยาก๊าซเรือนกระจกมีความรุนแรงขึ้น เมื่อต้นไม้ถูกเผาทำลายไปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคยถูกกักเก็บไว้ในต้นไม้

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham 44150

² Space Technology and Geoinformatics Research Unit, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham 44150

* Corresponding author: Teerawong Laosuwan, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham 44150. E-mail: teerawong@msu.ac.th

จะถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศของโลก⁴ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงทำให้ผิวโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น กิจกรรมทางด้านป่าไม้ นับเป็นกิจกรรมสาขาหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศประมาณร้อยละ 20 เกิดจากการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บในมวลชีวภาพ (Biomass) เนื่องจากการตัดไม้ทำลายป่าและการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ในดินจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน⁵ ในอีกด้านหนึ่งนั้น ต้นไม้สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศโดยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) และนำมาสะสมไว้ในรูปของมวลชีวภาพทั้งในส่วนเหนือพื้นดินโดย ลำต้น กิ่ง ใบ และใต้ดินโดยราก⁶⁻¹⁰ ที่เรียกว่า “การกักเก็บคาร์บอน” (Carbon sequestration) ซึ่งถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์⁵

Remote sensing “การสำรวจระยะไกล” หรือ “การรับรู้จากระยะไกล” หมายถึง การบันทึกหรือการได้มาซึ่งข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับวัตถุพื้นที่เป้าหมายด้วยเครื่องรับรู้ (sensor) โดยปราศจากการสัมผัสกับวัตถุนั้นๆ ทั้งนี้โดยอาศัยคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) เป็นสื่อในการได้มาของข้อมูลใน 3 ลักษณะคือ ช่วงคลื่น (Spectral) รูปทรงस्थฐาน (Spatial) และการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา (Temporal) ของสิ่งต่างๆ บนพื้นผิวโลก^{11,12}

การสำรวจระยะไกลนั้นได้จัดเป็นศาสตร์อีก แขนงหนึ่งในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ และวิศวกรรม ภูมิสารสนเทศ¹³⁻¹⁷ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำการสำรวจระยะไกลเข้ามาช่วยในการประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน¹⁸⁻²¹ ข้อมูลดาวเทียมนั้นสามารถบันทึกค่าการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้พร้อมกันในหลายช่วงคลื่น (Multi-spectral)^{22,23} ทำให้สามารถนำเอาคุณสมบัติของช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ ที่ดาวเทียมบันทึกได้มาประเมินค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินในพื้นที่ป่าไม้ได้ อีกทั้งยังกระทำได้สะดวก รวดเร็วและใช้งบประมาณน้อยลงด้วย^{24,25} สำหรับประเทศไทยงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการประมาณการกักเก็บคาร์บอนของพื้นที่ป่าไม้และสวนป่า²⁶ ยังไม่พบการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนผลไม้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลในตำบลสร้างค้อ อำเภอภูพาน จังหวัดสกลนคร

วิธีการดำเนินงาน

ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา

ตำบลสร้างค้อ ตั้งอยู่ห่างจากอำเภอภูพาน ไปทางทิศใต้ประมาณ 20 กิโลเมตร พื้นที่ตั้งอยู่บริเวณที่ราบสูงบนเทือกเขาภูพานบางส่วนของพื้นที่อยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าชมภูพาน ทั้งนี้ตำบลสร้างค้อ อำเภอภูพาน จังหวัดสกลนคร มีอาณาเขตติดกับตำบลต่างๆ ดังนี้

- ทิศเหนือ ติดกับ ต.โคกภู อ.ภูพาน จ.สกลนคร
- ทิศใต้ ติดกับ อ.เขาวง, อ.นาขู, อ.สมเด็จพระ จ.กาฬสินธุ์
- ทิศตะวันออก ติดกับ ต.หลุมเลา อ.ภูพาน จ.สกลนคร และ
- ทิศตะวันตก ติดกับ อ.โคกภู อ.ภูพาน จ.สกลนคร

สำหรับวิธีการดำเนินงานหลักในการศึกษาครั้งนี้สามารถแสดงได้ดัง Figure 1

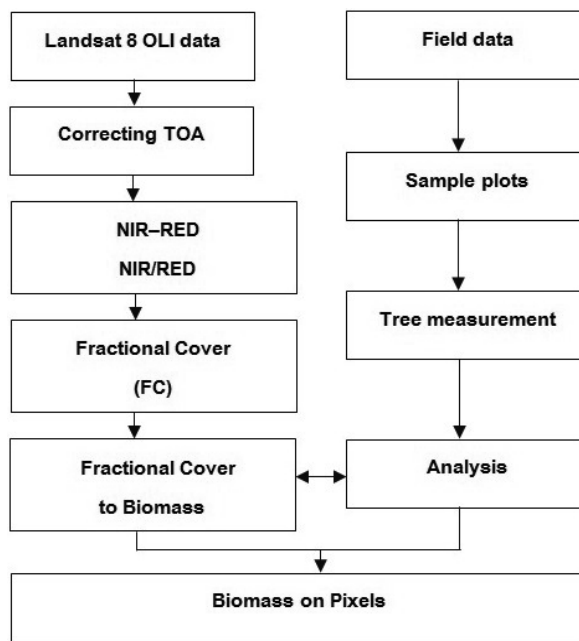


Figure 1 Flowchart of the study

การจัดเตรียมข้อมูลดาวเทียม Landsat 8

การศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 โดยดาวเทียม Landsat 8 สามารถบันทึกข้อมูลในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ (Table 1) ได้แก่ ช่วงคลื่น Coastal aerosol (0.43-0.45 μm) ช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (0.45-0.51 μm) ช่วงคลื่นสีเขียว (0.53-0.59 μm) ช่วงคลื่นสีแดง (0.64-0.67 μm) อินฟราเรดใกล้ (0.85-0.88 μm) จำนวน 1 ช่วงคลื่น และอินฟราเรดคลื่นสั้น (1.57-1.65 และ 2.11-2.29 μm) จำนวน 2 ช่วงคลื่น ความละเอียดของจุดภาพ (Pixel) 30 เมตร ในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน (Thermal IR) จำนวน 2 ช่วงคลื่นความละเอียด 100 เมตร และภาพขาวดำ

(Panchromatic) ความละเอียด 15 เมตร ระบบการเก็บข้อมูล 16 บิต โคจรถลับมาถ่ายภาพซ้ำตำแหน่งเดิมทุกๆ 16 วัน

Table 1 LANDSAT 8 OLI and TIRS²⁷

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
1	0.43 -0.45 (Coastal aerosol)	30 m
2	0.45 - 0.51 (Blue)	30 m
3	0.53 - 0.59 (Green)	30 m
4	0.64-0.67 (Red)	30 m
5	0.85 - 0.88 (Near IR)	30 m
6	1.57 - 1.65 (SWIR-1)	30 m
7	2.11 - 2.35 (SWIR-2)	30 m
8	0.50 - 0.68 (Panchromatic)	15 m
9	1.36 - 1.38 (Cirrus)	30 m
10	10.60 - 11.19 (Thermal IR 1)	100 m
11	11.50 - 12.51 (Thermal IR2)	100 m

สำหรับข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 OLI ที่นำมาศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลที่บันทึกข้อมูลเมื่อวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2558 โดยมีขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลเบื้องต้น ดังนี้

1) ตัดข้อมูลจากดาวเทียมให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา จากนั้นทำการปรับแก้ความผิดพลาดทางเรขาคณิต (Geometric correction) ของข้อมูลจากดาวเทียมดังกล่าว

2) ทำการปรับแก้ค่า Top of Atmosphere (ToA) Reflectance เพื่อลดความผิดพลาดของพลังงานที่สะท้อนจากวัตถุบนพื้นผิวโลกไปสู่เครื่องบันทึกข้อมูลจากสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบข้างในขณะทำการบันทึกข้อมูล ได้แก่ สภาพอากาศ, ภูมิประเทศ, อุณหภูมิ, มุมตกกระทบของแสงด้วยสมการที่ 1 และสมการที่ 2^{28,29}

$$\rho\lambda' = Mp \times Qcal + Ap \tag{1}$$

โดยที่

$\rho\lambda'$ คือ ค่าการสะท้อนของบรรยากาศจากโลกที่ยังไม่มีการปรับแก้ไขสำหรับมุมของดวงอาทิตย์

Mp คือ ค่าการสะท้อนของ Band X จากข้อมูลดาวเทียม

$Qcal$ คือ การปรับมาตรฐานค่าข้อมูลเชิงตัวเลข (DN : Digital Number) ในจุดภาพ (Pixel)

Ap คือ ค่าการสะท้อนจำเพาะของ Band X จากข้อมูลดาวเทียม

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin \theta} \tag{2}$$

โดยที่

$\rho\lambda$ คือ ค่าการสะท้อนจากผิวโลกที่ปรับแก้มุมของดวงอาทิตย์

θ คือ ค่ามุมสะท้อนจากดวงอาทิตย์กับดาวเทียม

3) นำข้อมูลจากดาวเทียมที่ได้รับการปรับแก้ในสองข้อดังกล่าวข้างต้นมาทำการเลือกจุดภาพ (Pixel) ในตำแหน่งเดียวกันกับพื้นที่ทำการวางแปลงตัวอย่างถาวร (Permanent plot) ทั้งนี้เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับวิธีการลบแบบง่าย (NIR-RED) และการหารแบบง่าย (NIR/RED) ด้วยสมการที่ 3 และสมการที่ 4³⁰

$$\text{การลบแบบง่าย} = NIR - RED \tag{3}$$

$$\text{การหารแบบง่าย} = \frac{NIR}{RED} \tag{4}$$

โดยที่

NIR คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared: NIR) ของดาวเทียม Landsat 8 OLI

RED คือ ช่วงคลื่นแสงสีแดง (RED) ของดาวเทียม Landsat 8 OLI

4) นำผลของข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ข้อ 3 มาหาค่าสัมประสิทธิ์การปกคลุม Fractional Cover (FC) โดยอ้างอิงจากสมการที่ 5^{31,32}

$$FC = \frac{VI - VI_{soil}}{VI_{forest} - VI_{soil}} \tag{5}$$

โดยที่

FC คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปกคลุม

VI คือ ค่าดัชนีพืชพรรณ

VI_{soil} คือ ดัชนีของดิน

VI_{forest} คือ ดัชนีเรือนยอด

การจัดเตรียมข้อมูลภาคสนาม

ในการวิจัยนี้ได้จัดทำแปลงตัวอย่างขนาด 20 เมตร x 20 เมตร (Figure 2) จากพื้นที่สวนผลไม้จำนวน 22 แปลงในพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้เพื่อให้แปลงตัวอย่างทั้ง 22 แปลงดังกล่าวเป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษาจำนวน 72.20 ไร่ จากนั้นได้เก็บข้อมูลชนิดและจำนวนพันธุ์ไม้ใหญ่ (ไม้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอก (Diameter at Breast Height: DBH) ตั้งแต่ 4.5 เซนติ เมตรขึ้นไป) รวมทั้งวัดความสูงของต้นไม้ โดยข้อมูลที่ได้อาจจากการสำรวจทั้งหมดจะถูกนำมาบันทึกลงในแบบบันทึกข้อมูล

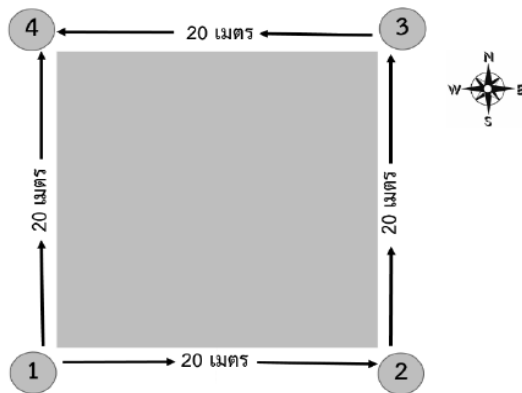


Figure 2 Sample plot

จากนั้นจึงได้ใช้สมการแอลโลเมตรี (Allometric equation) (สมการที่ 6) มาทำการคำนวณหามวลชีวภาพที่อยู่เหนือพื้นดิน⁶

$$\begin{aligned}
 W_s &= 0.0389(D^2H)^{(0.9417)} & r^2 &= 0.9106 \\
 W_b &= 0.0678(D^2H)^{(0.6618)} & r^2 &= 0.8347 \\
 W_l &= 0.0084(D^2H)^{(0.7660)} & r^2 &= 0.9109
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

โดยที่

W_s คือ มวลชีวภาพของลำต้น

W_b คือ มวลชีวภาพของกิ่ง

W_l คือ มวลชีวภาพของใบ

การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประมาณหาค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่อยู่เหนือพื้นดินด้วยข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI มีการดำเนินการ ดังนี้

1) วิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่อยู่เหนือพื้นดินกับการสะท้อนช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณจากข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 OLI ด้วยการลบแบบง่าย NIR-RED และการหารแบบง่าย NIR/RED

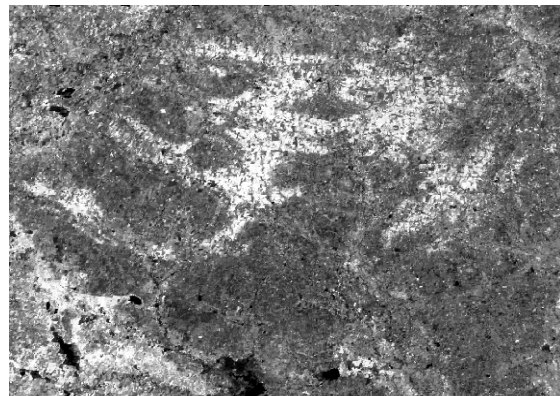
2) ทำการเปรียบเทียบผลของข้อมูลและทำการหาสมการที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนผลไม้ในตำบลสร้างค้อ อำเภอภูพาน จังหวัดสกลนคร

ผลการดำเนินงาน

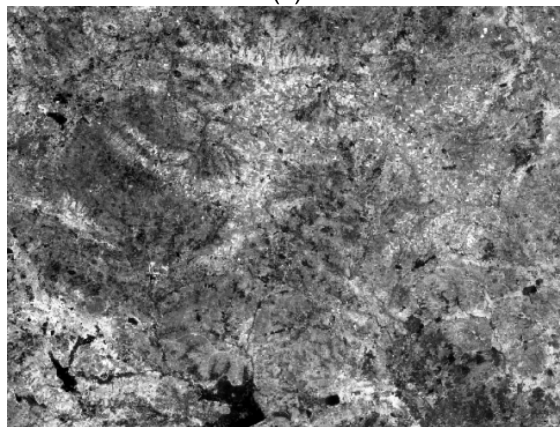
ผลการจัดเตรียมข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 OLI

สำหรับผลการปรับแก้ค่า Top of Atmosphere (ToA) Reflectance เพื่อลดความผิดพลาดของพลัง งานที่สะท้อนจากวัตถุบนพื้นผิวโลกไปสู่เครื่องบันทึกข้อมูลจากสภาพแวดล้อม

ที่อยู่รอบข้าง ในขณะที่ทำการบันทึกข้อมูล สามารถแสดงได้ดัง Figure 3



(a)



(b)

Figure 3 (a) Before Top of Atmosphere (b) After Top of Atmosphere

ผลการการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลทางสถิตินั้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ร่วมกับข้อมูลภาคสนามเพื่อสร้างสมการเพื่อประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ทั้งนี้ผลจากการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังนี้ ด้วยวิธีลบอย่างง่าย (NIR-RED) ได้สมการความสัมพันธ์ $y = 0.3184e^{0.0482x}$ และมีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด $R^2 = 0.845$ (Figure 4) ทำให้สามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินคิดเป็นปริมาณ 213.176 ตันต่อไร่ จากพื้นที่ศึกษาจำนวน 72.20 ไร่

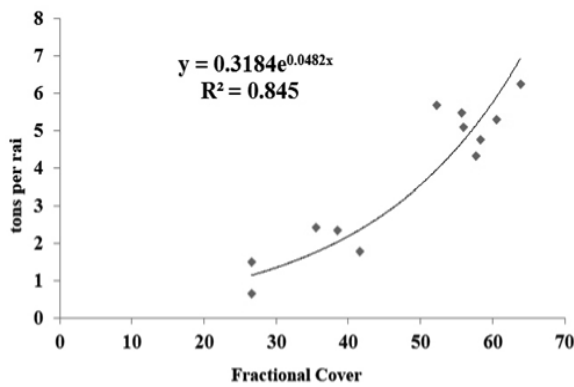


Figure 4 Relationship equation of NIR-RED

ด้วยวิธีหารอย่างง่าย NIR/RED ได้สมการความสัมพันธ์ $y = 0.8900e^{0.047x}$ มีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด $R^2 = 0.774$ (Figure 5) ทำให้สามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินคิดเป็นปริมาณ 224.229 ตันต่อไร่ จากพื้นที่ศึกษาจำนวน 72.20 ไร่

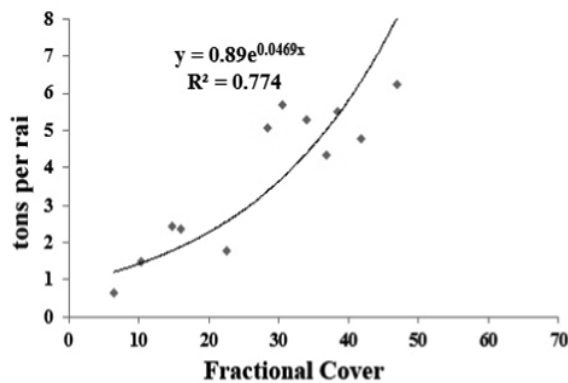


Figure 5 Relationship equation of NIR/RED

สรุปผล

จากการศึกษาการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินด้วยข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI และดัชนีพืชพรรณ วิธีอย่างง่าย NIR-RED และวิธีหารอย่างง่าย NIR/RED ของสวนผลไม้ในตำบลสร้างค้อ อำเภอภูพาน จังหวัดสกลนคร โดยได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่อยู่เหนือพื้นดิน (ตัวแปรตาม) กับค่าดัชนีพืชพรรณ วิธีอย่างง่าย NIR-RED และวิธีหารอย่างง่าย NIR/RED จากข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI (ตัวแปรอิสระ) มาทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ทำให้ได้สมการในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจำนวน 2 สมการ โดยวิธีการที่เหมาะสมที่สุดคือวิธีอย่างง่าย NIR-RED ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ $y = 0.3184e^{0.0482x}$ และมีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด $R^2 = 0.845$ ทำให้สามารถคำนวณ

ปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินคิดเป็นปริมาณ 213.176 ตันต่อไร่ จากพื้นที่ศึกษาจำนวน 72.20 ไร่ โดยผลของการวิจัยดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยเรื่อง Estimating Tree Biomass via Remote Sensing, MSAVI 2, and Fractional Cover Model³¹ งานวิจัยเรื่อง Estimating Above Ground Carbon Capture Using Remote Sensing Technology in Small Scale Agro Forestry Areas³² งานวิจัยเรื่อง Carbon Stock Assessment Using Remote Sensing and Forest Inventory Data in Savannakhet, Lao PDR³³ และงานวิจัยเรื่อง Mapping Global Forest Above ground Biomass with Spaceborne LiDAR, Optical Imagery, and Forest Inventory Data³⁴ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความถูกต้องทางสถิติด้วยวิธี (Pair Sample T-test) ก็ยังพบว่าวิธีอย่างง่าย NIR-RED นี้ มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสามารถนำเสนอสมการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนผลไม้ในพื้นที่อื่นๆ ของประเทศไทยได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ พ่อเนาวิ บัวแก้ว และกลุ่มเกษตรกรในเครือข่ายชุมชนอินแปลง ตำบลสร้างค้อ อำเภอภูพาน ที่เข้าร่วมโครงการวิจัย ขอขอบคุณ คุณสิริธร ดำรงสุกิจ ภาควิชาการสำรวจระยะไกลและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และคุณ กุสุมา อาษาสนา สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับการสำรวจข้อมูลภาคสนามมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- Office of Environmental Policy and Planning. Thailand's national greenhouse gas inventory 1994. Ministry of Science Technology and Environment. Bangkok. 2000.
- IPCC. Climate change, IPCC fourth assessment report (AR4). In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tigora M, Miller HL (eds.). The physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge. UK/New York. 2007.
- Jundang, W., Puangchit, L., and Diloksumpun, S. Carbon Storage of Dry Dipterocarp Forest and Eucalypt Plantation at Mancha Khiri Plantation, Khon Kaen Province. Thai Journal of Forestry. 2010; 3: 36-44.

4. นฐปัทม์ จิตพิทักษ์. มาตรการป้องกันเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก. วารสารสิ่งแวดล้อม. 2542; 2 (11): 43-50.
5. อุษา กลิ่นหอม, ชีรวรงค์ เหล่าสุวรรณ, พรชัย อุทริักษ์, ฤทธิรงค์ จังโกฏี, เพ็ญแข ธรรมเสนานุภาพ และคมกริช วงศ์ภาคคำ. การชดเชยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคป่าไม้. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ภายใต้แผนงานวิจัยเรื่องการศึกษาวิธีการตรวจวัดการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกป่าและพื้นที่ฟื้นฟูสภาพป่า. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. กรุงเทพฯ, 2554.
6. Ogawa, H., Yoda, K., Ogini, K. and Kira, T. Comparative Ecological Study on Three Main Type of Forest Vegetation in Thailand. *Nature and Life in Southeast Asia*. 1965;4:49-80.
7. Senpaseuth, P., Navanugraha, C., and Pattanakiat, S. The Estimation of Carbon Storage in Dry Evergreen and Dry Dipterocarp Forests in Sang Khom District, Nong Khai Province, Thailand. *Environment and Natural Resources Journal*. 2009;2:1-11.
8. UNFCCC. Clean development mechanism: methodologies: afforestation/ Reforestation methodologies. Approved A/R Methodologies. ออนไลน์ เข้าถึงได้จาก http://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/approved_ar.html. 2015.
9. UNFCCC. Clean development mechanism: methodologies: small scale Afforestation/ reforestation CDM methodologies. Methodologies for small scale A/R CDM project activities. ออนไลน์ เข้าถึงได้จาก <http://cdm.unfccc.int/methodologies/SSCAR/approved.html>. 2015.
10. Chicago Climate Exchange. Forestry carbon sequestration offsets. Available from <https://www.theice.com/ccx>. 2014.
11. Campbell, J.B. *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis, London. 1996.
12. ชีรวรงค์ เหล่าสุวรรณ. เทคโนโลยีอวกาศประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาสารคาม : ตักศิลาการพิมพ์. 2557.
13. Charles Elachi, Jakob Van Zy. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2006.
14. Arbind Kumar Shah. Remote sensing- A part of an Applied Physics. *The Himalayan Physics*. 2013; 4(4):102-108.
15. Rees, W. G. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press. 2013.
16. Deekshatulu, B.L. and Bajpai, O.P. *Physics of Remote Sensing*, *Current Science*.1983; 51(24);1132-1143.
17. Purdue University.. *Geomatics Engineering*. ออนไลน์ เข้าถึงได้จาก: <https://engineering.purdue.edu/CE/Academics/Groups/Geomatics>. 2016.
18. Schlerf, M., Alzberger, C., Hill, J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. *Remote Sens. Environ*. 2005; 95:177-194.
19. Senpaseuth, P., Navanugraha, C., Pattanakiat, S. The Estimation of Carbon Storage in Dry Evergreen and Dry Dipterocarp Forests in Sang Khom District, Nong Khai Province, Thailand. *Environment and Natural Resources Journal*. 2009;7 (2): 1-11.
20. Patel, N.K., Saxena, R.K., Shiwalkar, A. Study of fractional vegetation cover using high spectral resolution data. *J. Indian Soc. Remote Sens*. 2007; 35:73-79.
21. Jundang, W., Puangchit, L., and Diloksumpun, S. Carbon Storage of Dry Dipterocarp Forest and Eucalypt Plantation at Mancha Khiri Plantation, Khon Kaen Province. *Thai Journal of Forestry*. 2010; 3: 36-44.
22. ชีรวรงค์ เหล่าสุวรรณ, พรชัย อุทริักษ์, อุษา กลิ่นหอม, ซาลี นาวานูเคราะห์, เชษฐพงษ์ บุตรเทพ, เจ เอช สาเม็ก, เดวิด แอล สโคล. การสำรวจและพัฒนาระบบฐานข้อมูลการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่วนเกษตรประเทศไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม*. 2554;30(4): 403-410.
23. ชีรวรงค์ เหล่าสุวรรณ, ธนัทเดช โรจนกุล. การเฝ้าระวังและติดตามสถานการณ์น้ำด้วยเทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*. 2556; 32(2):246-256.
24. Ling Du, Tao Zhou, Zhenhua Zou, Xiang Zhao, Kaicheng Huang, Hao Wu. Mapping Forest Biomass Using Remote Sensing and National Forest Inventory in China. *Forest*. 2014; 5:1267-1283.
25. Klosterman, S. T., Hufkens, K., Gray, J. M., Melaas, E., Sonnentag, O., Lavine, I., Mitchell, L., Norman,

- R., Friedl, M. A., Richardson. A. D. Evaluating Remote Sensing of Deciduous Forest Phenology at Multiple Spatial Scales Using PhenoCam Imagery. *Biogeosciences*. 2014; 11(2): 4305-4320.
26. ชีวรงค์ เหล่าสุวรรณ, พรชัย อุทวิชัย, อุษา กลิ่นหอม, ชาลี นาวานุเคราะห์,เชษฐพงษ์ บุตรเทพ,เจ เอช สาเม็ก, เดวิด แอล สโคล. ความสำเร็จของเครือข่ายชุมชนอินแปลงจากการมีส่วนร่วมในการบรรเทาสภาวะโลกร้อนผ่านทางภาคป่าไม้.วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 2556; 16 (2): 44-54.
27. U.S. Geological Survey. Landsat 8. ออนไลน์เข้าถึงได้จาก <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>. 2016.
28. Yale University. Converting Digital Numbers to Top of Atmosphere (ToA) Reflectance. ออนไลน์ เข้าถึงได้จาก:http://www.yale.edu/ce_o/Documentation/Landsat_DN_to_Reflectance.pdf. 2015.
29. Claudio Parente. TOA reflectance and NDVI calculation for Landsat 7 ETM+ images of Sicily. The 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference. 2013.
30. Harrisgeospatial. Broadband Greenness. ออนไลน์ เข้าถึงได้จาก: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/broadbandgreenness.html>. 2016.
31. Teerawong Laosuwan & Pornchai Uttaruk. Estimating Tree Biomass via Remote Sensing, MSAVI 2, and Fractional Cover Model. *IETE Technical Review*. 2014; 31(5): 362-368.
32. Teerawong Laosuwan and Yannawut Uttaruk. Estimating Above Ground Carbon Capture Using Remote Sensing Technology in Small Scale Agro Forestry Areas. *Agriculture & Forestry*. 2016; 62(2):253-262.
33. Phutchard Vicharnakorn, Rajendra P. Shrestha, Masahiko Nagai, Abdul P. Salam and Somboon Kiratiprayoon. Carbon Stock Assessment Using Remote Sensing and Forest Inventory Data in Savannakhet, Lao PDR. *Remote Sens*. 2014; 6: 5452-5479.
34. Tianyu Hu, Yanjun Su, Baolin Xue, Jin Liu, Xiaoqian Zhao, Jingyun Fang and Qinghua Guo. Mapping Global Forest Aboveground Biomass with Spaceborne LiDAR, Optical Imagery, and Forest Inventory Data. *Remote Sens*. 2016; 8: 2-27.