

การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล

Quantifying Above Ground Carbon Sequestration Using Remote Sensing Technology

ญาณวุฒิ อุตรักษ์¹, 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} โดยการทำการล่าไม้เนื้อแข็งได้ทำให้ปฏิกิริยาก๊าซเรือนกระจกมีความรุนแรงขึ้น 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) รูปทรงสัญญาณ (Spatial) และการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา (Temporal) ของสิ่งต่างๆ บนพื้นผิวโลก^{11,12}

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

วิธีการดำเนินงาน

ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา

ตำบลสร้างค้อ ตั้งอยู่ห่างจากอำเภอกุฉินารายณ์ ไปทางทิศใต้ประมาณ 20 กิโลเมตร พื้นที่ตั้งอยู่บริเวณที่ราบสูงบนเทือกเขาภูพานบางส่วนของพื้นที่อยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าชมภูพาน ทั้งนี้ตำบลสร้างค้อ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดสกลนคร มีอาณาเขตติดกับตำบลต่างๆ ดังนี้

ทิศเหนือ ติดกับ ต.โคกภู อ.ภูพาน จ.สกลนคร

ทิศใต้ ติดกับ อ.เขาวง, อ.นาหว้า, อ.สมเด็จ จ.กาฬสินธุ์

ทิศตะวันออก ติดกับ ต.หลุบเลา อ.ภูพาน จ.สกลนคร และ

ทิศตะวันตก ติดกับ อ.โคกภู อ.ภูพาน จ.สกลนคร

สำหรับวิธีการดำเนินงานหลักในการศึกษาครั้งนี้

สามารถแสดงได้ดัง Figure 1

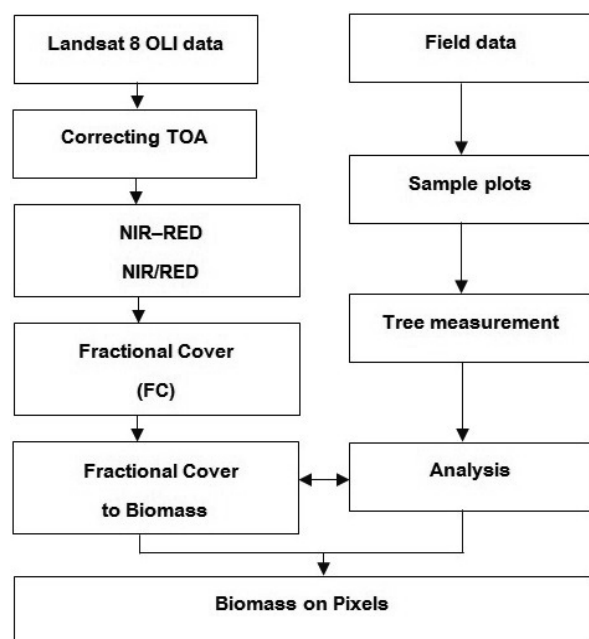


Figure 1 Flowchart of the study

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 โคจรถูกนำมาถ่ายภาพซ้ำตำแหน่งเดิมทุกๆ 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}

$$\rho\lambda' = Mp \times Qcal + Ap \quad (1)$$

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

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin \theta} \quad (2)$$

โดยที่

$\rho\lambda$ คือ ค่าการสะท้อนจากผิวโลกที่ปรับแก้มุมของดวงอาทิตย์

θ คือ ค่ามุมสะท้อนจากดวงอาทิตย์กับดาวเทียม

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

$$\text{การลบแบบง่าย} = NIR - RED \quad (3)$$

$$\text{การหารแบบง่าย} = \frac{NIR}{RED} \quad (4)$$

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}

$$FC = \frac{VI - VI_{soil}}{VI_{forest} - VI_{soil}} \quad (5)$$

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 โดยข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดจะถูกนำมาบันทึกลงในแบบบันทึกข้อมูล

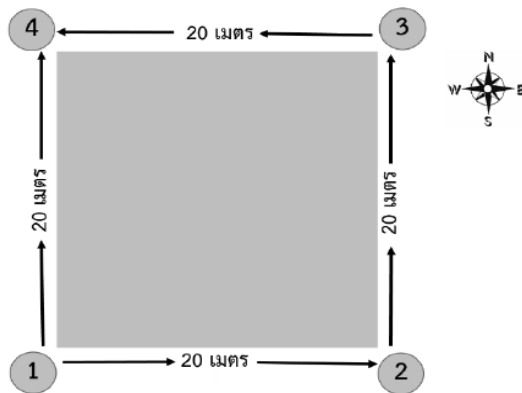


Figure 2 Sample plot

จากนั้นจึงได้ใช้สมการแอลโลเมตรี (Allometric equation) (สมการที่ 6) มาทำการคำนวณหามวลชีวภาพที่อยู่เหนือพื้นดิน⁶

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

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

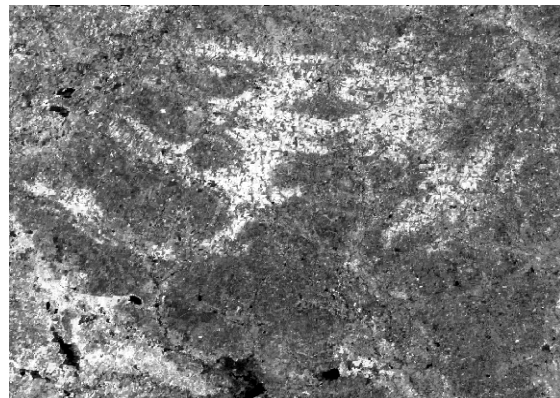
2) ทำการเปรียบเทียบผลของข้อมูลและทำการหาสมการที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนผลไม้ในตำบลสร้างค้อ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดสกลนคร

ผลการดำเนินงาน

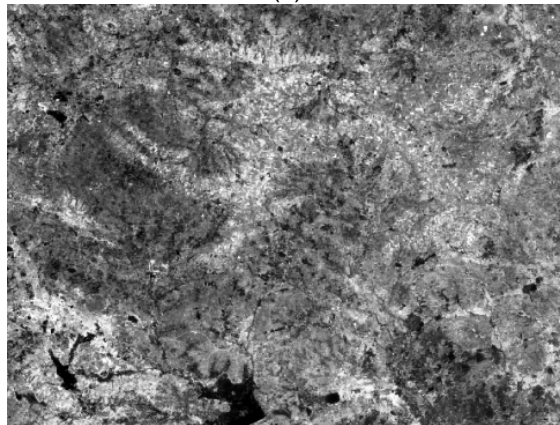
ผลการจัดเตรียมข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 OLI

สำหรับผลการปรับแก้ค่า Top of Atmosphere (ToA) Reflectance เพื่อลดความผิดพลาดของพลังงานที่สะท้อนจากวัตถุบนพื้นผิวโลกไปสู่เครื่องบันทึกข้อมูลจากสภาพแวดล้อม

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

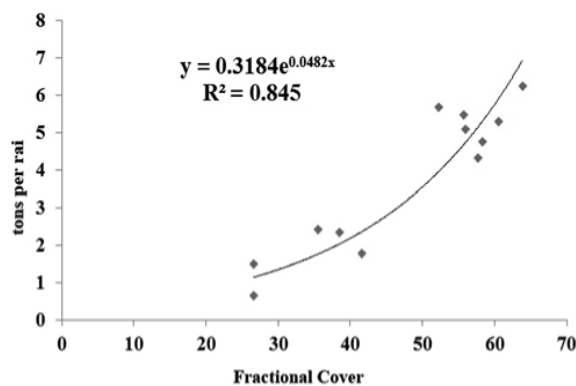


Figure 4 Relationship equation of NIR-RED

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

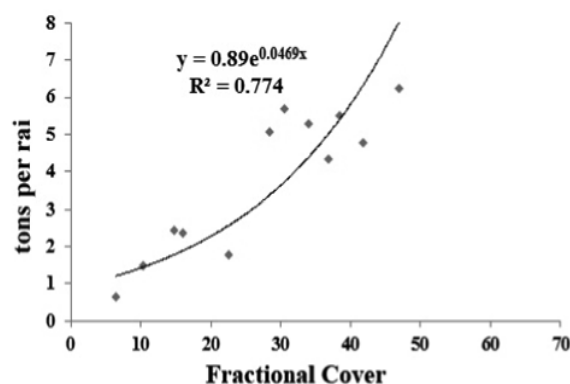


Figure 5 Relationship equation of NIR/RED

สรุปผล

จากการศึกษาการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินด้วยข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI และดัชนีพืชพรรณ วิธีลบอย่างง่าย NIR-RED และวิธีหาลายง่าย NIR/RED ของสวนผลไม้ในตำบลสร้างค้อ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดสกลนคร โดยได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่อยู่เหนือพื้นดิน (ตัวแปรตาม) กับค่าดัชนีพืชพรรณ วิธีลบอย่างง่าย NIR-RED และวิธีหาลายง่าย NIR/RED จากข้อมูลจากดาวเทียม Landsat 8 OLI (ตัวแปรอิสระ) มาทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ทำให้ได้สมการในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินจำนวน 2 สมการ โดยวิธีการที่เหมาะสมที่สุดคือวิธีลบอย่างง่าย 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) ก็ยังพบว่าวิธีลบอย่างง่าย NIR-RED นี้ มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสามารถนำสมการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนผลไม้ในพื้นที่อื่นๆ ของประเทศไทยได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ พ่อเนาว์ บัวแก้ว และกลุ่มเกษตรกรในเครือข่ายชุมชนอินแปลง ตำบลสร้างค้อ อำเภอกุฉินารายณ์ 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 วงศ์ภักดี. 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, ซาลีน นาวานุเคราะห์, เชษฐพงษ์ บุตรเทพ, เจ เอช สามี, เดวิด แอล สโกล. การสำรวจและพัฒนาระบบฐานข้อมูลการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่วนเกษตรประเทศไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม*. 2554;30(4): 403-410.
23. ชีรวรงค์ เหล่าสุวรรณ, ชนิตเดช โรจนกุล. การแผ้วถางและติดตามสถานการณ์น้ำด้วยเทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์. *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 อุทริกษ์, อุษา กลิ่นหอม, ชาลี นาวานุเคราะห์,เชษฐพงษ์ บุตรเทพ,เจ เอช สาเม็ก, เดวิด แอล สโคล. ความสำเร็จของเครือข่ายชุมชนอินแปงจากการมีส่วนร่วมในการบรรเทาสภาวะโลกร้อนผ่านทางภาคป่าไม้.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. Phutthard 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.