



การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยเทคโนโลยีการสำรวจ
ระยะไกลบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี

ESTIMATION OF ABOVE GROUND CARBON STOCK IN MANGROVE FORESTS USING
REMOTE SENSING TECHNOLOGY IN RAK SAT NAM MANGROVE SANCTUARY, BAN
LAEM DISTRICT, PHETCHABURI PROVINCE

อริรัตน์ บุญอยู่

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2568

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยเทคโนโลยีการสำรวจ
ระยะไกลบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ตวันน้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ
คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ESTIMATION OF ABOVE GROUND CARBON STOCK IN MANGROVE FORESTS USING
REMOTE SENSING TECHNOLOGY IN RAK SAT NAM MANGROVE SANCTUARY, BAN
LAEM DISTRICT, PHETCHABURI PROVINCE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Geoinformatics)

Faculty of Social Sciences, Srinakharinwirot University

2025

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลบริเวณเขต
พิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ตวันน้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี

ของ

อริรัตน์ บุญอยู่

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรียพร นิธิฐวิทยา) (รองศาสตราจารย์ ดร.อภิเศก บัณฑิตสุวรรณ)

..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธีรเวทย์ ลิ้มโกมลวิลาศ) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ เมฆแสงสวย)

ชื่อเรื่อง	การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี
ผู้วิจัย	อริรัตน์ บุญอยู่
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2568
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์พร นิพิฐวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ชีรเวทย์ ลิ้มโกมลวิลาส

การประเมินปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในปัจจุบันอาศัยวิธีการวางแผนสำรวจภาคสนาม ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและมีต้นทุนสูง การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพืชพรรณที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม ได้แก่ ดัชนีพืชพรรณความแตกต่างปกติ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) และ ดัชนีพืชพรรณที่ทนวิสัยปรับปรุง (Visible Atmospherically Resistant Index: VARI) กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (Above Ground Carbon Stock: AGCS) โดยดำเนินการเก็บข้อมูลภาคสนามจากแปลงตัวอย่างจำนวน 25 แปลง ในพื้นที่ป่าชายเลนของเขตพิทักษ์ป่าชายเลนรัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เพื่อคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินผลการศึกษาพบว่า ชนิดพรรณไม้เด่นในพื้นที่ศึกษาได้แก่ แสมทะเล (*Avicennia marina*) และ โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 24.11 เซนติเมตร และความสูงเฉลี่ย 12.04 เมตร ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินรวมในพื้นที่ศึกษาคำนวณได้เท่ากับ 3,863,125.17 กิโลกรัมคาร์บอน หรือคิดเป็น 30.65 ตันคาร์บอนต่อไร่ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI และ VARI กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $AGCS = 19528(NDVI) - 7787.9$ ($R^2=0.7899$) และ $AGCS = 108761(VARI) - 3893.4$ ($R^2=0.7111$) และเมื่อคำนวณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่วิเคราะห์ได้จากค่า NDVI และ VARI มีค่าเท่ากับ 26.95 ตันคาร์บอนต่อไร่ และ 38.21 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ

คำสำคัญ : ภูมิสารสนเทศ, การกักเก็บและการปลดปล่อยคาร์บอนในระบบนิเวศป่าไม้, มวลชีวภาพ

Title	ESTIMATION OF ABOVE GROUND CARBON STOCK IN MANGROVE FORESTS USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY IN RAK SAT NAM MANGROVE SANCTUARY, BAN LAEM DISTRICT, PHETCHABURI PROVINCE
Author	ATIRAT BOONYOU
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2025
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sureeporn Nipithwittaya
Co Advisor	Dr. Teerawate Limgomonvilas

Current methods for assessing carbon stock primarily rely on field plot surveys, a process that is both time-consuming and costly. This study aimed to develop regression models relating vegetation indices derived from satellite imagery—specifically, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)—to the Above-Ground Carbon Stock (AGCS) of mangrove forests. Field data were collected from 25 sample plots within the mangrove forests of the Rak Sat Nam Mangrove Sanctuary in Ban Laem District, Phetchaburi Province. The collected data were then used to analyze the above-ground carbon stock and to establish the relationships between NDVI, VARI, and AGCS. The study found that the dominant tree species in the study area were Grey Mangrove (*Avicennia marina*) and Red Mangrove (*Rhizophora mucronata*), with average diameters of 24.11 centimeters and average heights of 12.04 meters. The total above-ground carbon stock calculated for the study area was 3,863,125.17 kilograms of carbon, or 30.65 tons of carbon per rai. Linear Regression Analysis was employed to determine the relationships between NDVI, VARI, and AGCS, yielding the following equations: $AGCS = 19528(NDVI) - 7787.9$ ($R^2=0.7899$) and $AGCS = 108761(VARI) - 3893.4$ ($R^2=0.7111$). Substituting values into these equations, the estimated above-ground carbon stock derived from NDVI and VARI was 26.95 tons of carbon per rai and 38.21 tons of carbon per rai, respectively.

Keyword : Above Ground Carbon Storage, Geoinformatics

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถ เอาใจใส่ แนะนำ ช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาอย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์พร นิพิฐวิทยา และอาจารย์ ดร. ธีรเวทย์ ลิ้มโกมลวิลาศ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รวมถึงคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาถ่ายทอดองค์ความรู้ วิธีการ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาภูมิสารสนเทศ ที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา และชี้แนะในเรื่องต่างๆ เป็นอย่างดี และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ภาควิชาภูมิสารสนเทศ ที่ได้อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอ รวมทั้งบุคคลที่ผู้วิจัยได้อ้างอิงหรือกล่าวถึงในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนร่วมงานกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทุกท่านที่คอยกรุณาให้ความรู้ผู้วิจัยในเรื่องการบริหารจัดการป่าไม้

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีมาตลอด

คุณประโยชน์ทั้งหลายที่ได้จากการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญู กตเวทิต์แด่ บิดา มารดา บุรพจารย์ที่เคยอบรมสั่งสอน ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

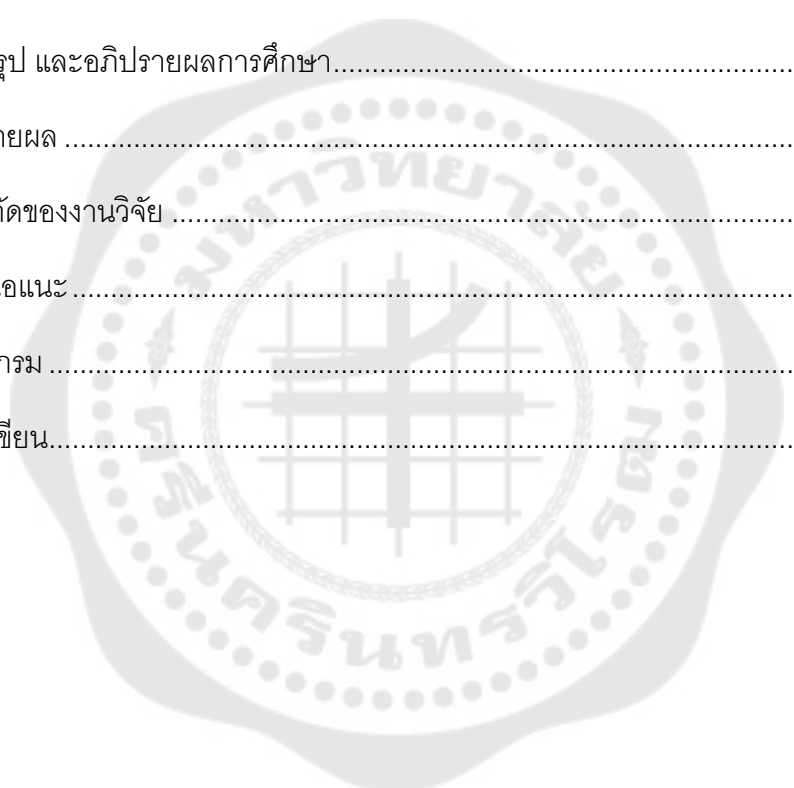
อิริวัฒน์ บุญอยู่

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
ป่าชายเลน	5
ปัจจัยสิ่งแวดล้อมของป่าชายเลน.....	6
ลักษณะโครงสร้างป่าชายเลน	8
พรรณไม้ป่าชายเลน	9
การสำรวจป่าชายเลน.....	12
การสำรวจโครงสร้างป่าชายเลน	12
การกำหนดจุดสำรวจในแปลงตัวอย่าง	13
มวลชีวภาพ และการวัดการเจริญเติบโตของต้นไม้	15
มวลชีวภาพ	15

การวัดความเจริญเติบโตของต้นไม้	16
การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอน.....	18
เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ	19
ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก	19
ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์.....	21
เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกล	23
ดาวเทียม Sentinel-2	24
ดัชนีพืชพรรณ.....	25
ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI.....	26
ค่าดัชนีพืชพรรณ VARI	26
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ป่าชายเลน	27
การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนด้วยการสำรวจระยะไกล	28
การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนด้วยอากาศยานไร้คนขับ	30
การประยุกต์ใช้ดัชนีพืชพรรณ VARI ในงานด้านเกษตรกรรมและป่าไม้.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
พื้นที่ศึกษา	34
อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	35
การเก็บรวบรวมข้อมูล	35
การจัดการและการวิเคราะห์ข้อมูล	36
บทที่ 4 ผลการศึกษา	42
การสำรวจภาคสนามของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี	42

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล ภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2	45
การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล ภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2.....	51
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่าย ดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI	56
บทที่ 5 สรุป และอภิปรายผลการศึกษา.....	58
อภิปรายผล	58
ข้อจำกัดของงานวิจัย	61
ข้อเสนอแนะ	61
บรรณานุกรม	62
ประวัติผู้เขียน.....	67



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2.....	25
ตาราง 2 สมการแอลโลเมตรีของพรรณไม้ป่าชายเลนฝั่งอ่าวไทย.....	38
ตาราง 3 สมการแอลโลเมตรีของพรรณไม้ป่าชายเลนฝั่งอันดามัน	39
ตาราง 4 การประมาณค่ามวลชีวภาพ และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยการสำรวจภาคสนาม	43
ตาราง 5 การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนที่คำนวณได้จากสมการแอลโลเมตรีตามตำแหน่งแปลงตัวอย่าง และค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2	46
ตาราง 6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS)	48
ตาราง 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS).....	49
ตาราง 8 ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการแอลโลเมตรีตามตำแหน่งแปลงตัวอย่าง และค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2.....	52
ตาราง 9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS).....	54
ตาราง 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS).....	55
ตาราง 11 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI	57

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดของการศึกษา	4
ภาพประกอบ 2 การกระจายของป่าชายเลนตามเขตภูมิศาสตร์	6
ภาพประกอบ 3 แนวเขตการขึ้นอยู่ของกลุ่มไม้ป่าชายเลน	10
ภาพประกอบ 4 โกงกางใบใหญ่ (<i>Rhizophora Mucronata</i>)	11
ภาพประกอบ 5 แสมทะเล (<i>Avicennia marina</i>)	12
ภาพประกอบ 6 ลักษณะการกระจายตัวอย่างตามแผนการสำรวจแบบต่าง ๆ	15
ภาพประกอบ 7 การวัดความเจริญเติบโตของต้นไม้ในระดับต่าง ๆ ของต้นไม้ที่มีลักษณะพิเศษ และพื้นที่ที่มีความลาดชัน	18
ภาพประกอบ 8 อุปกรณ์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกแบบพกพา	20
ภาพประกอบ 9 ดาวเทียม Sentinel-2	24
ภาพประกอบ 10 พื้นที่ศึกษาเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ..	34
ภาพประกอบ 11 กระบวนการวิจัย	41
ภาพประกอบ 12 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์ น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี โดยวิธีการสำรวจภาคสนาม	43
ภาพประกอบ 13 การประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินบริเวณเขตพิทักษ์ป่า ชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี โดยวิธีการสำรวจภาคสนาม	44
ภาพประกอบ 14 ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้าน แหลม จังหวัดเพชรบุรี จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2	45
ภาพประกอบ 15 Scatter Plot และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน	47

ภาพประกอบ 16 ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพื้ทักษ์ป่าชายเลน
 รัชส์ตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ที่วิเคราะห์ด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI จากภาพถ่าย
 ดาวเทียม Sentinel-2..... 50

ภาพประกอบ 17 ค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ของเขตพื้ทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ตว์น้ำ อำเภอบ้าน
 แหลม จังหวัดเพชรบุรี จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2..... 51

ภาพประกอบ 18 Scatter Plot และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI (x)
 และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (y) 53

ภาพประกอบ 19 การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพื้ทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ตว์น้ำ
 อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ด้วยดัชนีพืชพรรณ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2..... 56



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

สถานการณ์โลกในปัจจุบันกำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์โลกร้อนอันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Climate change) เนื่องจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์มีการสะสมในชั้นบรรยากาศของโลก เช่น การเผาผลาญถ่านหินและเชื้อเพลิง การใช้สารเคมีที่มีส่วนประกอบของก๊าซเรือนกระจก การตัดไม้ทำลายป่า ฯลฯ ส่งผลให้รังสีความร้อนที่โลกได้รับจากพระอาทิตย์ไม่สามารถสะท้อนออกจากโลกได้ในปริมาณที่เหมาะสมจึงทำให้อุณหภูมิของโลกค่อย ๆ สูงขึ้น (กรีนพีซ ประเทศไทย, 2565; เจอร์ล ฟิลเลย์, 2538) หนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่มีความสำคัญและมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของรถยนต์และโรงงานอุตสาหกรรม การเผาป่าเพื่อเป็นที่อยู่อาศัย เกษตรกรรม และปศุสัตว์ (กรีนพีซ ประเทศไทย, 2565) วิธีการที่จะจัดการก๊าซดังกล่าวด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ คือ การจัดการผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำมาเก็บสะสมในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรตในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ลำต้น กิ่ง ใบ และราก เป็นต้น (ภาณุ เนื่องจำนงค์, กาญจนา นาคะภากร, และ สิริกร กาญจนสุนทร, 2558)

ระบบนิเวศป่าชายเลนช่วยผลิตออกซิเจน และดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 800 – 900 กิโลกรัม/ตันคาร์บอน/ปี หรือคิดเป็น 10 เท่า ของระบบนิเวศป่าบกที่สามารถดูดซับได้ประมาณ 80 – 90 กิโลกรัม/ตันคาร์บอน/ปี (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2554) ดังนั้นป่าชายเลนจึงมีความสำคัญต่อระบบนิเวศบริเวณชายฝั่งและการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นหนึ่งในสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากการสำรวจของกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งประเทศไทยมีป่าชายเลนที่มีสภาพสมบูรณ์ประมาณ 1.74 ล้านไร่ และจังหวัดเพชรบุรีเป็น 1 ใน 23 จังหวัดที่มีสภาพป่าชายเลนที่สมบูรณ์ (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และ กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2563) โดยเฉพาะในพื้นที่อำเภอบ้านแหลมจังหวัดเพชรบุรี เนื่องจากเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงนิเวศที่มีความสำคัญ ใกล้กรุงเทพมหานคร อีกทั้งกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งได้มีการประกาศเขตพิทักษ์ป่าชายเลนรักษาสัตว์น้ำในพื้นที่ เพื่อรักษาป่าชายเลนไว้เป็นที่อยู่อาศัย ขยายพันธุ์สัตว์น้ำ และรักษาไว้ซึ่งระบบนิเวศทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง รวมทั้งเป็นแหล่งอาหารของชุมชนท้องถิ่นอย่างยั่งยืน ทั้งป่าชายเลนบริเวณพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะเด่นด้านความอุดมสมบูรณ์ของระบบนิเวศ มีพื้นที่ป่าชาย

เลนที่ยังคงสภาพธรรมชาติดี เหมาะสมต่อการเก็บข้อมูลอีกทั้งยังเป็นพื้นที่ที่กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งให้ความสำคัญในการอนุรักษ์และฟื้นฟูอีกด้วย

การศึกษากักเก็บคาร์บอนของพรรณไม้ในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการสำรวจในภาคสนาม ซึ่งมีข้อเสียคือต้องใช้ทรัพยากรต่าง ๆ เป็นจำนวนมากทั้งกำลังคน และงบประมาณในการออกสำรวจในแต่ละครั้ง การนำเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลที่มีความสามารถในการบันทึกภาพในช่วงคลื่นที่มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ และการใช้ดาวเทียมสำรวจทรัพยากรต่าง ๆ หรืออากาศยานไร้คนขับมาช่วยในการสำรวจทำให้การศึกษากักเก็บคาร์บอนของพรรณไม้ ทำให้วิเคราะห์ข้อมูลได้ง่ายรวดเร็ว ประหยัดทรัพยากรบุคคล และงบประมาณ (Muhsoni, Abida, Rini, & Putera, 2021) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มาใช้ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินในพื้นที่ป่าชายเลนโดยมีการใช้ค่าดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) และดัชนีความเขียวของพืชพรรณ (Visible Atmospherically Resistant Index: VARI) จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อประเมินความหนาแน่นและความเขียวของพืช ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน เนื่องจากค่าดัชนีดังกล่าวสามารถสะท้อนระดับมวลชีวภาพของพืชและความสมบูรณ์ของระบบนิเวศได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ศุภกานต์ ธิเตจ๊ะ, สุนทร คำยอง, อัมรินทร์ บุญตัน, อริศรา เจริญปัญญาเนตร, และ พันธุ์พล หัตถโกศล, 2563)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ตวันน้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ด้วยการสำรวจภาคสนาม
2. เพื่อประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่น โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ NDVI
3. เพื่อประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่น โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ VARI

ขอบเขตการวิจัย

1. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของป่าชายเลนบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ตวันน้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรีจะเลือกใช้เฉพาะพันธุ์ไม้เด่นที่อยู่ในแปลงตัวอย่าง ได้แก่ แสมทะเล (*Avicennia marina*) และโกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*) เท่านั้น

2. สมการแอลโลเมตรีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้สมการของกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งที่ทำการศึกษาคความหลากหลายทางชีวภาพของป่าชายเลนฝั่งอ่าวไทยเท่านั้น

3. ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของไม้เด่นในป่าชายเลนบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อ.บ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี โดยจะเลือกใช้ดาวเทียม Sentinel-2 ที่มีเซ็นเซอร์ Multispectral เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ป่าชายเลน หมายถึง ระบบนิเวศที่อยู่ในแนวเชื่อมต่อระหว่างพื้นแผ่นดินและผืนทะเลบริเวณริมชายฝั่งทะเล ที่มีสภาพแวดล้อมเป็นดินเลน และที่มีการขึ้น ลงของกระแสน้ำอย่างสม่ำเสมอ ประกอบด้วยสังคมพืชและสัตว์หลากหลายชนิด

2. มวลชีวภาพ หมายถึง อินทรีย์วัตถุของพืชที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชส่วนใหญ่ถูกเก็บอยู่ในรูปของธาตุคาร์บอนตามส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น กิ่ง ก้าน ใบ ลำต้น และราก

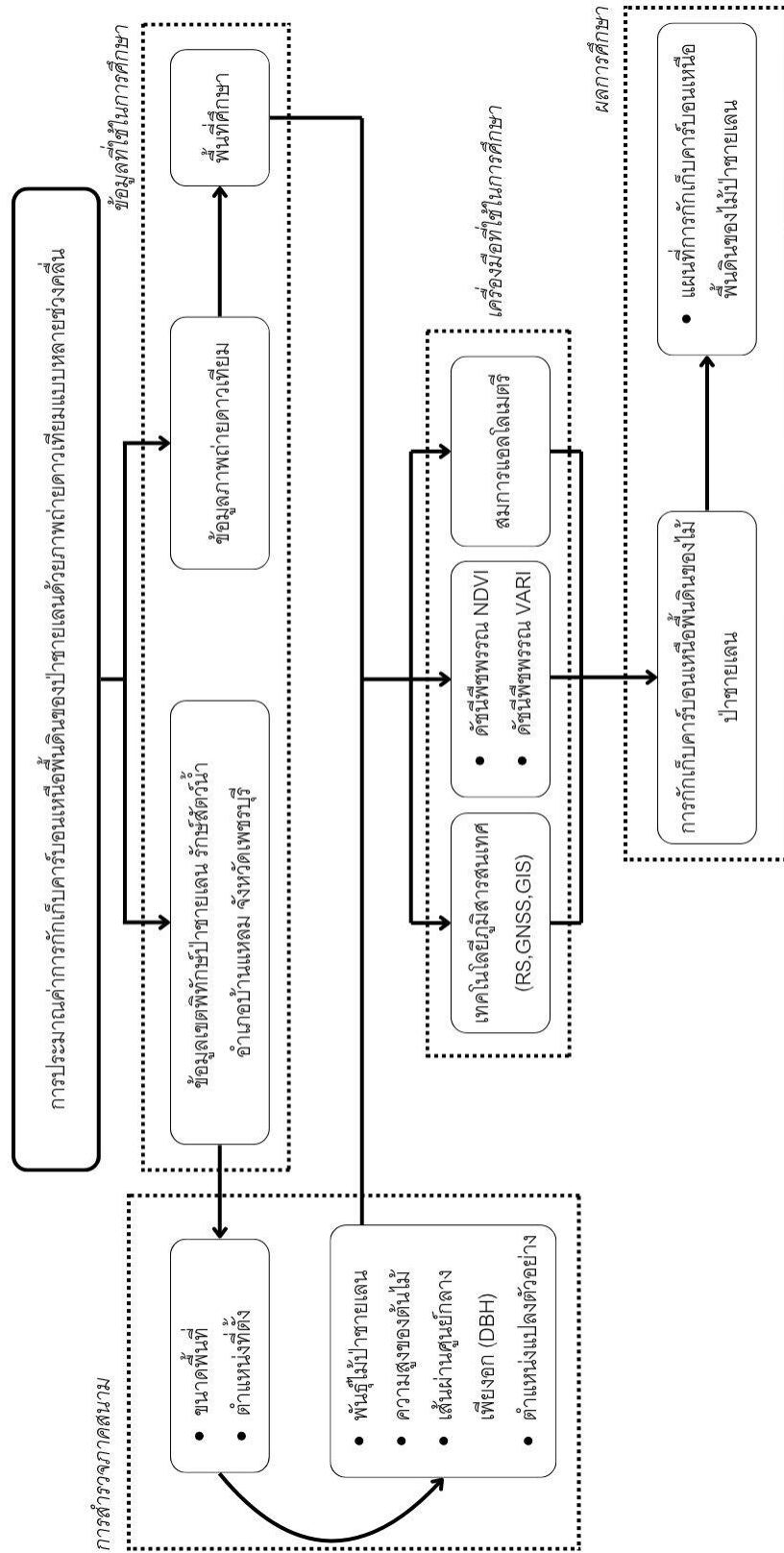
3. มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน หมายถึง มวลชีวภาพของต้นไม้ที่อยู่เหนือผิวน้ำดิน

4. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอน หมายถึง กระบวนการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนโดยการคำนวณจากมวลชีวภาพไปคูณกับค่าแฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วย

5. สมการแอลโลเมตรี หมายถึง สมการประมาณค่ามวลชีวภาพ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่สะสมในเนื้อไม้ โดยสมการแอลโลเมตรีนั้นจะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของสมการเชิงเส้นระหว่างน้ำหนักแห้งของต้นไม้ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงระดับอก ความสูง และความหนาแน่นของเนื้อไม้

6. การรับรู้ระยะไกล หมายถึง กระบวนการได้มาซึ่งข้อมูลของปรากฏการณ์ หรือวัตถุต่าง ๆ ในพื้นที่โดยจะอาศัยการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับจากแหล่งพลังงานทั้งแหล่งตามธรรมชาติ และแหล่งที่มนุษย์สร้างขึ้น

7. เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ หมายถึง การบูรณาการความรู้และเทคโนโลยีทางด้าน การรับรู้ระยะไกลเข้ากับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก เพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดของการศึกษา

บทที่ 2

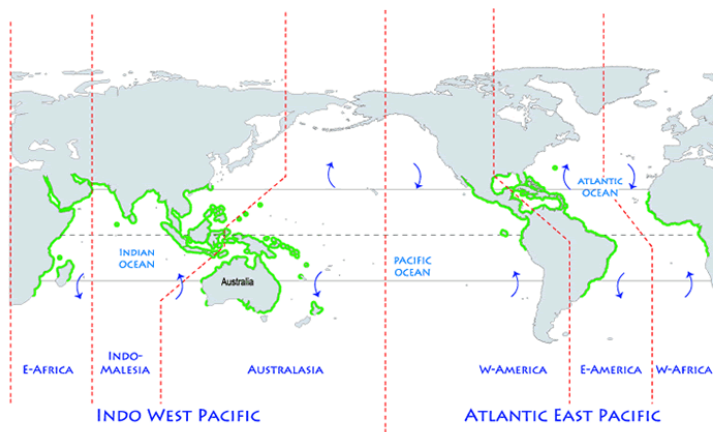
บททวนวรรณกรรม

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อ ต่อไปนี้

1. ป่าชายเลน
2. พรรณไม้ป่าชายเลน
3. การสำรวจป่าชายเลน
4. มวลชีวภาพ และการวัดการเจริญเติบโตของต้นไม้
5. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอน
6. เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ
7. ดาวเทียม Sentinel-2
8. ดัชนีพืชพรรณ
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ป่าชายเลน

ป่าชายเลน (Mangrove Forest) เป็นสังคมพืชที่ขึ้นอยู่ในเขตน้ำขึ้นสูงสุดและลงต่ำสุด ในแถบภูมิภาคเขตร้อน (Tropical Region) และกึ่งร้อนของโลก (Subtropical Region) ส่วนในภูมิภาคเหนือและใต้เขตร้อนมีการพบอยู่บ้างแต่ไม่มาก ส่วนใหญ่จะพบป่าชายเลนบริเวณที่มีลักษณะเป็นชายฝั่งทะเล ปากอ่าว อ่าว ปากแม่น้ำ หรือบริเวณที่น้ำทะเลท่วมถึง พรรณไม้ที่พบในป่าชายเลนเป็นตระกูลที่มีใบเขียวตลอดทั้งปี (Evergreen Species) มีทั้งที่เป็นไม้พุ่ม และไม้ต้น โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะทางสรีรวิทยา และความต้องการสิ่งแวดล้อมที่คล้ายกัน เช่น สกุลไม้โกงกาง (*Rhizophora* sp.) ซึ่งเป็นไม้เด่นที่สำคัญและมีไม้ตระกูลอื่นบ้าง (กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2563; สนิท อักษรแก้ว, 2541; สรายุทธ บุญยะเวทชีวิน และ รุ่งสุริยา บัวสาดี, 2554)



ภาพประกอบ 2 การกระจายของป่าชายเลนตามเขตภูมิศาสตร์

ที่มา : MangroveWatch (n.d.)

ป่าชายเลนเป็นแหล่งสะสมคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากบริเวณที่มีป่าชายเลนเป็นพื้นที่ที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมและมีแดดจัด จึงสามารถสังเคราะห์แสงได้เต็มที่ตลอดทั้งปี จากการศึกษาต้นโกงกางใบใหญ่ พบว่าพันธุ์ไม้ดังกล่าวมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงกว่าพรรณไม้ป่าชายเลนชนิดอื่น ๆ (ทรวงศ์ แสงเทียน และ พูลศรี วันธงไชย, 2551) จึงส่งผลให้สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า พรรณไม้ป่าชายเลนชนิดอื่น และมีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนในปริมาณที่มากด้วย

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมของป่าชายเลน

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมของป่าชายเลนที่มีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของพืชและสัตว์ในป่าชายเลน (กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2564) มีดังนี้

1. ภูมิประเทศชายฝั่ง (coastal topography) ป่าชายเลนโดยทั่วไปชอบขึ้นอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลที่มีสภาพดินเลนหรือเป็นที่ราบกว้าง มีน้ำทะเลท่วมถึงอย่างสม่ำเสมอ โดยลักษณะภูมิประเทศเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อลักษณะโครงสร้าง โดยเฉพาะชนิดและการกระจายของพันธุ์ไม้ตลอดจนขนาดพื้นที่ป่าชายเลน

2. ภูมิอากาศ (climate) ปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวกับภูมิอากาศที่สำคัญ ได้แก่ แสง อุณหภูมิฝน และลม ปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของพืชและสัตว์ในป่าชายเลนโดยเฉพาะการเจริญเติบโต การสังเคราะห์แสง การเปิดปิดของปากใบ การหายใจ การคายน้ำ โครงสร้าง และรูปทรงของต้นไม้

3. น้ำขึ้น น้ำลง (tides) เป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดการแบ่งเขตการขึ้นอยู่ของพรรณไม้หรือสัตว์น้ำในป่าชายเลน ผลต่างของน้ำขึ้น น้ำลง เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะภายนอกของพรรณไม้โดยเฉพาะระบบรากค้ำจุนและรากหายใจ จะมีลักษณะใหญ่และสูงจากผิวดินมาก ถ้าขึ้นอยู่ในพื้นที่ที่ผลต่างของน้ำขึ้น น้ำลงมีความแตกต่างกันมาก และช่วงเวลาน้ำขึ้นน้ำลงของน้ำทะเลจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มในบริเวณป่าชายเลน

4. คลื่นและกระแสน้ำ (waves and currents) มีบทบาทสำคัญในการแพร่กระจายของพรรณไม้ป่าชายเลน ในการช่วยพัดพาฝักของไม้ป่าชายเลนไปสู่แหล่งต่าง ๆ นอกจากนี้ยังเป็นตัวการที่สำคัญที่ทำให้มีการตกตะกอน หรือเพิ่มการกัดเซาะชายฝั่ง มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพื้นที่ป่าชายเลน

5. ความเค็มของน้ำ (salinity) และความเค็มของน้ำในดิน (soil water salinity) เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโต การรอดตาย และการแบ่งเขตการขึ้นอยู่ของพรรณไม้ในป่าชายเลน ซึ่งโดยทั่วไปป่าชายเลนเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณน้ำกร่อยที่มีช่วงความเค็มประมาณ 10 - 30 ส่วนใน 1000 ส่วน (ppt)

6. ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในป่าชายเลน โดยเฉพาะการหายใจ และการสังเคราะห์แสง โดยปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยที่จำกัด ทั้งชนิดและการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังมีผลต่อกระบวนการย่อยสลายไปไม้และอินทรีย์สารของจุลินทรีย์

7. ดิน (soil) ดินป่าชายเลนเกิดจากการทับถมกันของตะกอนจากการกัดเซาะชายฝั่งจากแม่น้ำ หรือการพังทลายของดินภูเขาที่ไหลมาตามแม่น้ำ ลำคลองต่าง ๆ และการตกตะกอนของสารแขวนลอยในมวลน้ำ ตลอดจนการสลายตัวของอินทรีย์สาร เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ทำให้เกิดป่าชายเลน

8. ธาตุอาหาร (nutrients) ปริมาณธาตุอาหารที่เพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาสมดุลของระบบนิเวศป่าชายเลน ธาตุอาหารในป่าชายเลนมี 2 ประเภท ดังนี้

8.1 ธาตุอาหารประเภทอนินทรีย์สาร (inorganic minerals) จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียม

8.2 ธาตุอาหารประเภทอินทรีย์สาร (organic detritus) เป็นสารอินทรีย์ที่มีต้นกำเนิดจากสิ่งมีชีวิต โดยผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ในการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

ดังนั้นป่าชายเลน จึงหมายถึงระบบนิเวศของพรรณไม้ที่ขึ้นอยู่บริเวณริมชายฝั่งทะเล ที่มีการขึ้น ลง ของกระแสน้ำอย่างสม่ำเสมอและน้ำยังมีความเค็ม พรรณไม้ป่าชายเลนจึงจำเป็นต้องมีการปรับตัวให้เหมาะสมกับสภาพสิ่งแวดล้อม เพื่อความอยู่รอดและแพร่กระจายพันธุ์ได้อย่างต่อเนื่อง

ลักษณะโครงสร้างป่าชายเลน

โครงสร้างในสังคมพืชจะรวมถึงองค์ประกอบของพรรณไม้ความหลากหลาย ความสูง ขนาด ความโต พื้นที่หน้าตัดความหนาแน่น การกระจายตามชั้น ขนาด อายุและรูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของพรรณไม้ในป่าและหมู่ไม้โดยมีลักษณะเด่นคือ มีการแบ่งเขตพรรณไม้ (zonation) ซึ่งในแต่ละเขตมักมีพันธุ์ไม้เด่นเพียงชนิดเดียว หรือสองถึงสามชนิด และเขตพรรณไม้ มักขนานไปกับแนวชายฝั่ง (สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน และ รุ่งสุริยา บัวสวัสดิ์, 2554) โดย สนิท อักษรแก้ว (2541) ได้แบ่งป่าชายเลนเป็น 4 รูปแบบดังนี้

1. ป่าชายเลนในพื้นที่ชุ่มน้ำ (Basin forest) เป็นชนิดป่าชายเลนที่ขึ้นต่อกับผืนแผ่นดินใหญ่ (mainland) บริเวณลำน้ำขนาดเล็ก ๆ จะได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเลน้อย น้ำทะเลจะท่วมถึงในเวลาที่มีน้ำทะเลขึ้นสูงสุด (extreme high tide) เท่านั้น และได้รับอิทธิพลจากน้ำจืดมาก ลักษณะพรรณไม้มักเป็นต้นเดี่ยว และพวกเถาวัลย์

2. ป่าชายเลนริมฝั่งแม่น้ำ (Riverine forest) เป็นชนิดป่าชายเลนที่ขึ้นอยู่บริเวณชายฝั่งแม่น้ำที่มีขนาดใหญ่หรือปากอ่าว เช่น อ่าว ทะเล และทะเลสาบ ป่าประเภทนี้ได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเลอย่างสม่ำเสมอ มีกระแสน้ำท่วมถึงอยู่ตลอดเวลา โดยพรรณไม้จะเจริญเติบโตได้ดีค่อนข้างสมบูรณ์

3. ป่าชายเลนตามขอบชายฝั่ง (Fringe forest) เป็นชนิดป่าชายเลนที่ขึ้นตามชายฝั่งทะเลติดกับผืนแผ่นดินใหญ่ หรือบริเวณชายฝั่งที่เป็นเกาะใหญ่ ๆ ได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเลอยู่เสมอ คือน้ำทะเลจะท่วมถึงอยู่เป็นประจำวัน พรรณไม้ของป่าจะเจริญเติบโตได้ดี และเป็นป่าที่ค่อนข้างอุดมสมบูรณ์

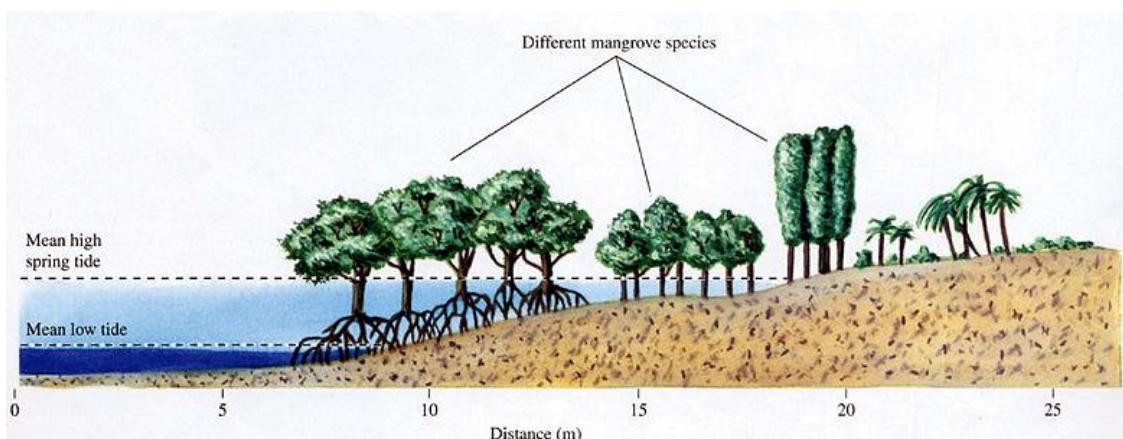
4. เกาะป่าชายเลน (Over wash forest) เป็นชนิดป่าชายเลนที่ขึ้นอยู่บนเกาะเล็ก ๆ จะถูกน้ำทะเลท่วมทั้งหมดเมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด การเจริญเติบโตของป่าชนิดนี้ต่ำ เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมและน้ำทะเลมาก อีกประการหนึ่งคือ พวกปุ๋ยและธาตุอาหารในป่าชนิดนี้จะถูกชะไปโดยกระแสน้ำออกจากป่าเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การเจริญเติบโตของป่าชนิดนี้ไม่ดีและป่าจะมีลักษณะเตี้ย

พรรณไม้ป่าชายเลน

พรรณไม้ป่าชายเลนของประเทศไทยสามารถพบขึ้นกระจายตัวทั่วไปบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก ภาคกลาง และภาคใต้ แต่พื้นที่ที่มีสภาพป่าชายเลนสมบูรณ์จะพบในภาคใต้ ชายฝั่งทะเลอันดามันเป็นส่วนใหญ่ ในประเทศไทยสามารถพบพรรณไม้ป่าชายเลนทั้งหมด 81 ชนิด ซึ่งเป็นป่าชายเลนที่แท้จริง (True mangrove) จำนวน 34 ชนิดโดยจะพบเฉพาะบริเวณที่เป็นน้ำเค็มหรือน้ำกร่อย และอีก 47 ชนิดนั้นเป็นพรรณไม้ที่ปรับตัวตามสภาพความเค็ม (mangrove associated species) เพื่อให้สามารถขึ้นอยู่ได้ในบริเวณที่น้ำทะเลท่วมถึง (กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2563)

กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2563) กล่าวว่า พรรณไม้ที่ขึ้นอยู่ในป่าชายเลนเหล่านี้ มักจะขึ้นอยู่เป็นเขตเป็นแนวซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้พรรณไม้ของป่าชายเลนขึ้นอยู่เป็นแนวเขตที่มีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน คือปัจจัยทางกายภาพและเคมีของดิน ความเค็มของน้ำในดิน การระบายน้ำ และกระแสความเปียกชื้นของดิน และความถี่ของน้ำทะเลท่วมถึง ซึ่งสามารถแบ่งเขตการขึ้นของกลุ่มไม้ป่าชายเลนได้ดังนี้

1. กลุ่มไม้โกงกางขึ้นอยู่ตามริมน้ำซึ่งเป็นดินเลนลึกและมีน้ำท่วมถึงเป็นประจำโดยโกงกาง ใบใหญ่จะขึ้นในบริเวณที่ดินเป็นดินเลนอ่อน และลึกมากกว่าบริเวณที่โกงกางใบเล็กขึ้น
2. กลุ่มไม้พังกาหัวสุม ไม้ถั่วและไม้โปรง ขึ้นอยู่ในบริเวณที่ดินเลนค่อนข้างแข็ง และน้ำทะเลท่วมถึงในระดับปกติ
3. กลุ่มไม้ฝาดและไม้ตะบูน ขึ้นในที่ดินเลนแข็ง และพื้นที่ระดับค่อนข้างสูง น้ำทะเลท่วมถึงเป็นบางครั้งบางคราว
4. กลุ่มไม้ตาตุ่ม ไม้หงอนไก่ทะเล และไม้เบ้งขึ้นที่ดินเลนแข็งและเป็นพื้นที่สูง น้ำทะเลท่วมถึงเมื่อน้ำทะเลขึ้นสูงสุดเท่านั้น



ภาพประกอบ 3 แนวเขตการขึ้นอยู่ของกลุ่มไม้ป่าชายเลน

ที่มา: Igeogers (n.d.)

พรรณไม้ที่เป็นพันธุ์ไม้เด่นและเป็นชนิดที่สำคัญในป่าชายเลนของประเทศไทยส่วนใหญ่ จะอยู่ในวงศ์ Rhizophoraceae โดยเฉพาะสกุลไม้โกงกาง (*Rhizophora*) ไม้โปรง (*Cerriops*) และ ไม้ถั่ว (*Bruguiera*) วงศ์ Sonneratiaceae ได้แก่ ไม้ในสกุลลำพู – ลำแพน (*Sonneratia*) วงศ์ Aviceniaceae ได้แก่ ไม้ในสกุล ไม้แสม (*Avicenia*) และวงศ์ Meliaceae ซึ่งประกอบด้วยพรรณไม้ ในสกุลตะบูน - ตะบัน (*Xylocarpus*) เป็นต้น (กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2563)

พื้นที่อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรีมีพรรณไม้เด่น และถูกพบมากอยู่สองสายพันธุ์ (Nipithwittaya และ Bualert, 2012) ดังนี้

1. โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora Mucronata*) เป็นไม้ขนาดใหญ่ สามารถขึ้นได้ดี ในบริเวณที่ดินเลนอ่อนและลึก ริมชายฝั่งทะเลที่น้ำทะเลท่วมถึงสม่ำเสมอ และเป็นเวลานาน รากค้ำยันสูง 2- 7 เมตร กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2563) ได้กล่าวถึงลักษณะสำคัญทาง พฤกษศาสตร์ของโกงกางใบใหญ่ ดังนี้

ลำต้นและระบบราก เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ สูงได้ถึง 40 เมตร ลำ ต้นตรง เรือนยอดรูปกรวยคว่ำ เปลือกสีเทาเข้มถึงดำ มีรอยแตกเป็นร่องเล็กตามยาวและขวาง มี รากค้ำยัน (stilt roots) ที่เจริญจากโคนต้นลงสู่พื้นดินในลักษณะโค้ง เพื่อช่วยพยุงลำต้นและทำ หน้าทีในการแลกเปลี่ยนก๊าซ

ใบเป็นใบเดี่ยว เรียงตรงข้ามแบบสลับตั้งฉาก ใบรูปรีถึงรูปรีกว้าง ขนาดกว้าง 5- 13 เซนติเมตร ยาว 8-24 เซนติเมตร ปลายใบแหลมมีติ่งแหลมเล็ก (mucro) โคนใบรูปลิ้ม

แผ่นใบหนา ผิวใบด้านบนสีเขียวเข้ม ด้านล่างสีเขียวอ่อน มีจุดเลนทิเซลกระจาย ก้านใบยาว 2.5–6 เซนติเมตร มีหูใบขนาดเล็กสีเขียวอ่อนที่โคนก้านใบ

ดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศ ออกเป็นช่อตามง่ามใบ แต่ละช่อประกอบด้วยดอก 2–12 ดอก กลีบเลี้ยงจำนวน 4 กลีบ รูปสามเหลี่ยมหรือรูปไข่กลับ กลีบดอกมี 4 กลีบ สีขาวถึงเหลืองอ่อน มีขนหนาแน่นบริเวณขอบกลีบ เกสรเพศผู้มีจำนวน 8 อัน รังไข่มีตำแหน่งอยู่ใต้ฐานดอก ก้านเกสรเพศเมียสั้น

ผลและการขยายพันธุ์ผลมีลักษณะเป็นฝักรูปทรงรีค่อนข้างเรียวยาว 3–8 เซนติเมตร เมื่อสุกมีสีเหลืองน้ำตาล เปลือกแข็ง ผิวหยาบ โกงกางใบใหญ่มีลักษณะการสืบพันธุ์แบบกึ่งอาศัยต้น (semi-viviparous) โดยฝักเริ่มงอกจากก่อนหลุดจากต้น มีความยาวราว 30–80 เซนติเมตร เมื่อหลุดจะลอยน้ำและเจริญเติบโตเมื่อถึงดินที่เหมาะสม

การกระจายพันธุ์และนิเวศวิทยาโกงกางใบใหญ่ขึ้นได้ดีในบริเวณที่มีน้ำกร่อย เช่น ปากแม่น้ำและริมคลองในเขตน้ำขึ้นน้ำลง พบมากในโซนกลางของป่าชายเลน มีบทบาทสำคัญต่อการรักษาเสถียรภาพของระบบนิเวศชายฝั่ง และเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพสูง



ภาพประกอบ 4 โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*)

บันทึกภาพเมื่อ 18 กันยายน 2565



ภาพประกอบ 5 แสมทะเล (*Avicennia marina*)

บันทึกภาพเมื่อ 18 กันยายน 2565

2. แสมทะเล (*Avicennia marina*) เป็นไม้ที่ขึ้นได้ดีในที่โล่งติดชายฝั่งทะเล หรือพื้นที่ดินเลนงอกใหม่ที่ดินค่อนข้างเป็นทราย กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2563) ได้กล่าวถึงลักษณะสำคัญทางพฤกษศาสตร์ของแสมทะเล ดังนี้

ลำต้นและระบบราก: ไม้ต้นขนาดเล็ก-กลาง สูงประมาณ 5–20 เมตร โดยทั่วไปพบสูง 5–8 เมตร มีการแตกกิ่งหลายกิ่ง ขึ้นเรือนยอดโปร่ง เปลือกลำต้นเรียบ มักมีสีขาวอมเทาหรือชมพูแก่ เมื่อเก่าเปลือกหลุดเป็นเกล็ด บนลำต้นไม่มีพู่พอน แต่มีระบบรากหายใจแบบ pencil-like (pneumatophores) สูงประมาณ 10–25 เซนติเมตร เพื่อแลกเปลี่ยนก๊าซใต้ดินและช่วยยึดจับชั้นโคลนพื้นดิน

ใบเป็นใบเดี่ยวเรียงตรงข้ามแบบสลับตั้งฉาก รูปร่างรีถึงใบหอกแกมไข่ ขนาดความกว้าง 1.5–5 เซนติเมตร ยาว 3–12 เซนติเมตร มีความหนาเหนียว ผิวด้านบนมันเงาสีเขียวคล้ำ ด้านล่างปกคลุมด้วยขนสั้นสีเทา-ขาวนวล เนื่องจากมีต่อมที่ใช้สำหรับขับเกลือ

ระบบนิเวศและการกระจายพันธุ์ แสมทะเลเป็นไม้บุกเบิกของป่าชายเลน พบตามดินเลนผสมทรายริมชายฝั่ง และโซนที่เปิดโล่ง รับน้ำขึ้น-ลง ได้ดี มักพบในพื้นที่เลนเกิดใหม่

การสำรวจป่าชายเลน

การสำรวจโครงสร้างป่าชายเลน

การสำรวจโครงสร้างของสังคมพืชป่าชายเลน โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้วิธีการสำรวจสังคมพืชทางด้านตั้ง (plant community stratification) หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าการทำแผนผัง

การกระจายของต้นไม้ (profile diagram) ซึ่งมักจะทำควบคู่ไปกับการทำแผนผังการปกคลุมของเรือนยอด (crown cover chart) นอกจากนี้ยังต้องนับจำนวนชนิดพันธุ์ของ ไม้หนุ่ม (sapling) และ ลูกไม้ (seedling) ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจโครงสร้างของสังคมพืชจะนำไปใช้ในการวางแผนการจัดการพื้นที่ป่าได้เป็นอย่างดี (สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2556)

การเก็บข้อมูลต่าง ๆ ในพื้นที่ป่าชายเลนโดยการวัดต้นไม้ทุกต้นในบริเวณป่าที่มีพื้นที่กว้างขวาง ทำให้มีความยุ่งยากในการวัดต้นไม้ทุกต้นและอาจมีการวัดซ้ำได้ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการสำรวจ รวมถึงเวลาและงบประมาณในการสำรวจ ดังนั้น ในการสำรวจทรัพยากรป่าไม้หรือการศึกษาวิจัย จึงต้องกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่จะสำรวจให้มีความเหมาะสม และเป็นตัวแทนของพื้นที่นั้น ๆ ชนิดของแปลงตัวอย่างโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. แปลงตัวอย่างชั่วคราว (temporary sample plot) เป็นแปลงตัวอย่างที่สร้างขึ้นในการเก็บข้อมูลสถิติต่าง ๆ เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูงของต้นไม้ นับจำนวนไม้หนุ่ม ลูกไม้เป็นต้นแปลงตัวอย่างนี้ไม่มีการหมายแนวเขตอย่างชัดเจนและถาวร เพียงแค่กำหนดขอบเขตเพื่อเก็บข้อมูลเพียงครั้งเดียว ซึ่งแปลงตัวอย่างนี้นิยมใช้ในการสำรวจทรัพยากรป่าไม้ทุกวิธี

2. แปลงตัวอย่างถาวร (permanent sample plot) เป็นแปลงที่สร้างขึ้นมาเพื่อเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่อง เช่น ข้อมูลการเติบโตของต้นไม้แปลงตัวอย่างที่สร้างขึ้นนี้ต้องมีการหมายขอบเขตที่แน่นอน ชัดเจน ซึ่งอาจชิงเชือก หรือพ่นสีให้เห็นขอบชัดเจน อาจติดหมายเลขประจำต้นเพื่อสะดวกในการติดตามวัดในครั้งต่อไป แปลงตัวอย่างถาวรนี้ส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลในการศึกษาวิจัย เช่น การศึกษาการทดแทนของชนิดพรรณไม้ การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง เป็นต้น

การกำหนดจุดสำรวจในแปลงตัวอย่าง

ในการวิจัยส่วนใหญ่การเก็บข้อมูลจากประชากรทุกหน่วยเพื่อนำมาศึกษานั้นทำได้ยาก เนื่องจากจำนวนของประชากรไม่สอดคล้องกับระยะเวลาหรืองบประมาณในการศึกษาวิจัย การเก็บข้อมูลจากประชากรบางส่วน หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าตัวอย่างจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะทำให้การวิจัยนั้นสำเร็จตามกำหนด กัญญสิริ จันทรเจริญ (ม.ป.ป.) ได้ให้ความหมายของคำว่า ประชากรและกลุ่มตัวอย่างไว้ ดังนี้

1. ประชากร หมายถึง สิ่งที่ผู้วิจัยสนใจทำการศึกษา อาจมีชีวิตหรือไม่ก็ได้ เช่น นักนิเทศศาสตร์ พรรณไม้ จำนวนของสัตว์ เป็นต้น

2. กลุ่มตัวอย่าง หมายถึง ส่วนหนึ่งของประชากรที่ผู้วิจัยเลือกมาเป็นตัวแทนในการศึกษาในที่นี้คือ แปลงตัวอย่าง โดยกลุ่มตัวอย่างที่เลือกมานั้นควรมีลักษณะที่ดีของประชากร

เพื่อให้การอ้างอิงไปถึงประชารณั้น ๆ มีความน่าเชื่อถือ โดยจะต้องมีการกำหนดตัวอย่างและขนาดอย่างเหมาะสม

การออกแบบกลุ่มตัวอย่าง (Sampling Design) หมายถึง การวางแผนการกำหนดกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้ทราบว่าควรใช้กลุ่มตัวอย่างขนาดเท่าใดในการวิจัยเรื่องนั้น ๆ การกำหนดกลุ่มตัวอย่างจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิจัย เช่น การกำหนดกลุ่มตัวอย่างที่มากหรือน้อยเกินไปนั้นส่งผลต่อความถูกต้องของผลการวิจัย โดยการออกแบบการสำรวจสามารถเลือกรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และ กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2563) ดังนี้

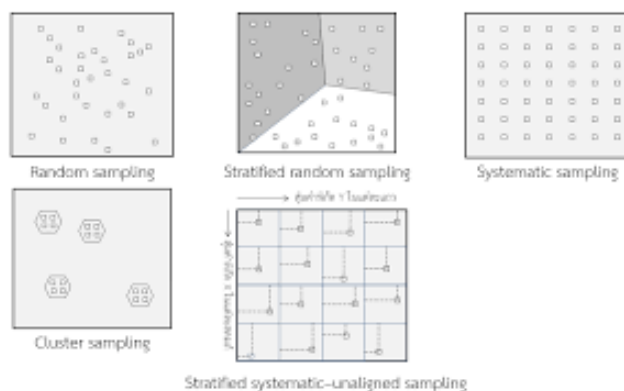
1. การกำหนดกลุ่มตัวอย่างแบบสุ่ม (Random sampling) ซึ่งในบางครั้งทำให้การเดินทางเข้าพื้นที่สำรวจมีความยาก และในบางชั้นข้อมูลอาจได้รับการสุ่มสำรวจน้อยหรือมากเกินไปซึ่งอาจส่งผลให้ผลการศึกษามีความคลาดเคลื่อนได้

2. การกำหนดกลุ่มตัวอย่างตามสัดส่วนของข้อมูล (Stratified Random Sampling) โดยตัวอย่างหรือจุดสำรวจจะเป็นแบบสุ่ม มีข้อดีคือ ทุกชั้นข้อมูลจะได้รับการประเมินอย่างเหมาะสมตามสัดส่วนของข้อมูลนั้น ๆ โดยการสำรวจในรูปแบบนี้จะต้องใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ GPS ในการเข้าถึงจุดสำรวจ

3. การกำหนดกลุ่มตัวอย่างอย่างเป็นระบบ (Systematic Sampling) จุดที่จะสำรวจจะมีการกระจายทั่วพื้นที่ที่สามารถสำรวจได้ด้วยเข็มทิศและเทปวัดแทนการใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ GPS แต่การกำหนดรูปแบบนี้อาจก่อให้เกิดการลำเอียงทางสถิติหากข้อมูลมีลักษณะที่มีสหสัมพันธ์ของตัวคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่สูง เช่นการสำรวจเพื่อประเมินพื้นที่ป่าในพื้นที่ภูเขาที่มีลักษณะเป็นเนินลูกระนาด ซึ่งมีผลทำให้เกิดความแตกต่างอย่างเป็นระบบตามระยะทางได้ทั้งความหนาแน่นและการกระจายตัวของสังคมพืช หรือความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทางได้ทั้งจากการวัดค่าของเครื่องมือ

4. การวางจุดสำรวจที่จะกำหนดจุดสำรวจเป็นกริด (Stratified Systematic Unaligned Sampling) เพื่อให้จุดตัวอย่างกระจายทั่วพื้นที่ศึกษา โดยในแต่ละช่องกริดให้เป็นไปโดยการสุ่ม เพื่อลดการเกิดสหสัมพันธ์ของตัวคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่

5. การกำหนดกลุ่มตัวอย่างเป็นกลุ่ม (Cluster Sampling) โดยเรียกว่า คลัสเตอร์ แล้วทำการสุ่มคลัสเตอร์เพื่อกำหนดเป็นกลุ่มจุดสำรวจหรือแปลงตัวอย่าง วิธีนี้มักถูกเลือกใช้เมื่อมีเวลาและงบประมาณที่จำกัดในการทำงานที่ต้องสำรวจในพื้นที่ที่มีขนาดกว้างใหญ่มาก ๆ โดยเฉพาะงานระดับภูมิภาคหรือระดับประเทศ วิธีนี้ไม่เหมาะกับการสำรวจเท่าไรนัก



ภาพประกอบ 6 ลักษณะการกระจายตัวอย่างตามแผนการสำรวจแบบต่าง ๆ

ที่มา: สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และ กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง (2563)

มวลชีวภาพ และการวัดการเจริญเติบโตของต้นไม้

มวลชีวภาพ

มวลชีวภาพ หมายถึง ปริมาณของสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็น พืช สัตว์ หรือจุลินทรีย์ สามารถวัดได้ในรูปของน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง น้ำหนักปราศจากซีเถ้า หรือน้ำหนักคาร์บอนโดยมีน้ำหนักต่อหน่วยของสิ่งมีชีวิต เช่น ต่อต้น หรือต่อหน่วยพื้นที่ แต่หากมองจากมุมมองทางชีวเคมี เซลลูโลส น้ำตาล ไขมัน และโปรตีน ก็นับเป็นชีวมวลรวมถึงเนื้อเยื่อพืชทั้งบนและใต้ดินด้วย เช่น ใบ กิ่ง กิ่ง ก้าน รวมไปถึงรากของต้นไม้และเหง้าของหญ้า (ภาณุ เนื่องจำนงค์ และคนอื่น ๆ, 2558) ในส่วนของพืชนั้น มวลชีวภาพจะเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยพืชจะทำการดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากอากาศเข้าไปสังเคราะห์ผ่านทางใบและปลดปล่อยก๊าซออกซิเจน (O_2) คืนสู่อากาศ ส่วนสารคาร์บอน (C) จะถูกสะสมในรูปของมวลชีวภาพโดยจะเรียกว่า การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน คือ อินทรีย์วัตถุของพืชที่ปรากฏอยู่เหนือพื้นดิน เช่น ลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ เป็นต้น และมวลชีวภาพใต้พื้นดิน คือ อินทรีย์วัตถุของพืชที่ปรากฏอยู่ใต้พื้นดิน เช่น ระบบรากต่าง ๆ ของพืช (พชร อุปมัย, 2559; ภาณุ เนื่องจำนงค์ และคนอื่น ๆ, 2558)

ในการคำนวณปริมาณมวลชีวภาพของต้นไม้สามารถทำได้ 2 วิธี (สุรเชษฐ์ ปิ่นแก้ว, 2558) ได้แก่

1. วิธีการตัดฟันต้นไม้ (harvest method) เป็นวิธีการที่จะตัดไม้ทุกต้นในพื้นที่ศึกษาแล้วนำมาอบให้แห้ง จึงนำไปชั่งหาน้ำหนักแห้ง และคำนวณค่ามวลชีวภาพ ซึ่งจะหาได้จากผลรวมของน้ำหนักแห้งต่อจำนวนพื้นที่ศึกษา ดังสมการ

$$\text{มวลชีวภาพ} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งทั้งหมด}}{\text{พื้นที่}}$$

2. การหามวลชีวภาพโดยสมการแอลโลเมตรี (Allometry method) มีหลักการสำคัญคือการเจริญเติบโตของพืชทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์กับการเจริญของส่วนต่าง ๆ ของพืช ในที่นี้คือความสูง (H) และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (GBH) ซึ่งเป็นวิธีการที่เป็นที่นิยมมากที่สุดโดยสำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2559) กล่าวว่าการหามวลชีวภาพวิธีดังกล่าวนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Log } W = a + b \text{ Log } D^2 H$$

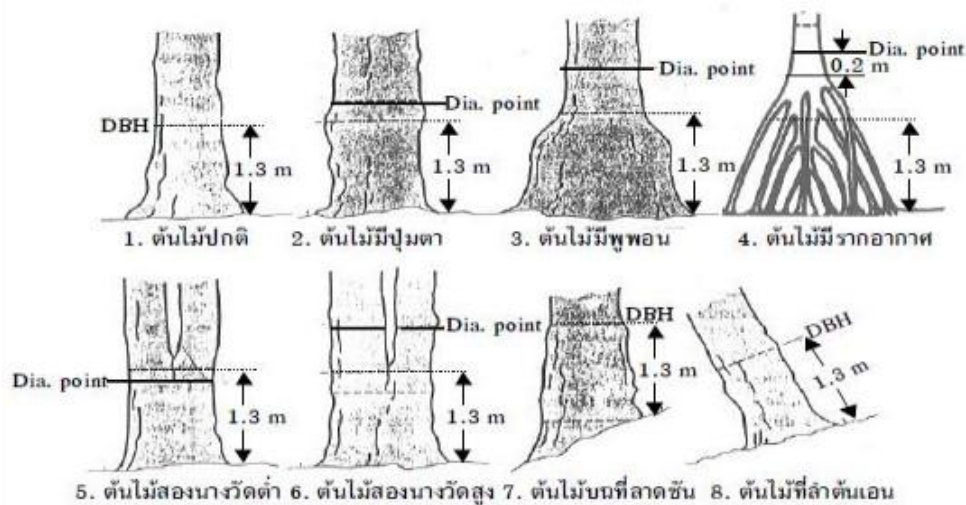
เมื่อ Log W	คือ มวลชีวภาพของส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้
A และ b	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (diameter at breast height)
H	คือ ความสูงของต้นไม้

การวัดความเจริญเติบโตของต้นไม้

การเจริญเติบโตของต้นไม้เป็นลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่า สิ่งมีชีวิตมีลักษณะแตกต่างจากสิ่งไม่มีชีวิต ซึ่งการเจริญเติบโต หมายถึงการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เพิ่มขนาดหรือจำนวนมากขึ้นของสิ่งมีชีวิต (สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2556) โดยส่วนใหญ่การเจริญเติบโตของต้นไม้จะวัดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) และความสูงของต้นไม้ (H) (ชิงชัย วิริยะบัญชา, 2546; วิจารย์ มีผล, 2553; สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2556) ซึ่งการวัดขนาด DBH ในป่าธรรมชาติถ้าเป็นพื้นที่ค่อนข้างเรียบหรือมีความลาดชันต่ำ ต้นไม้มีลักษณะลำต้นเดี่ยว และไม่มีพุ่มพอนก็จะทำให้วัด DBH ได้ง่ายแต่ในทางปฏิบัติไม่ได้เป็นเช่นนั้นเสมอไป เนื่องจากต้นไม้อาจจะมีความพิเศษที่แตกต่างกันออกไป และลักษณะพื้นที่ก็มีความลาดชันที่ต่างกันไป ดังนั้น การกำหนดการวัด DBH หรือที่ตำแหน่ง 1.30 เมตรจึงอาจมีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมและมีความเป็นมาตรฐานเดียวกันโดยชิงชัย วิริยะบัญชา (2546) ได้อธิบายการวัดขนาด DBH ของต้นไม้ที่มีลักษณะพิเศษ โดยสามารถจำแนกได้เป็น 8 ชนิด คือ

1. ต้นไม้ที่มีลักษณะลำต้นปกติและขึ้นอยู่บริเวณที่ราบจะทำการวัดที่ระดับ 1.3 เมตร หรือ DBH
2. ต้นไม้ที่มีลักษณะลำต้นมีปุ่มมีปมตรงกับระดับ DBH การวัดจึงอาจมีการขึ้นหรือลง เพื่อหลบปุ่มหรือปมดังกล่าว โดยให้ใกล้เคียงระดับ 1.3 เมตรมากที่สุด

3. ต้นไม้ที่มีพุ่มพอนมากจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงตำแหน่งวัดสูงขึ้นไปเป็นพิเศษจะพบมากในป่าที่มีต้นไม้ขนาดใหญ่ ในบางกรณีจำเป็นต้องวัดที่ระดับ 3.00 เมตร เพื่อหลบพุ่มพอนดังกล่าว
4. ต้นไม้ที่มีรากอากาศ เช่น ไม้โกงกางจะวัดที่ระดับ 0.20 เมตรเหนือคอราก
5. ต้นไม้ที่มีการแตกนางในระดับ 1.30 เมตรจะวัดต่ำลงมาประมาณ 1.00 – 1.20 เมตร เพื่อให้ได้ค่าลำต้นเพียงค่าเดียว
6. ต้นไม้ที่แตกนางตรงระดับต่ำหรือแตกนางใกล้ระดับ 1.30 เมตรและไม่สามารถวัดตรงตำแหน่งระดับต่ำได้เนื่องจากมีการพอกของเนื้อไม้โตกว่าปกติ จะวัดค่าเป็น 2 ลำต้นหรืออาจมากกว่า 2 ลำต้นก็ได้ ถ้าต้นไม้มีการแตกนางเป็นทรงพุ่มเหมือนต้นไม้ในป่าพรุ และป่าชายเลนที่มีลักษณะเป็น 3 – 4 นาง
7. ต้นไม้ที่ขึ้นอยู่บนที่ลาดชันสูงจะวัดตำแหน่ง 1.30 เมตร ด้านบนของความลาดชัน
8. ต้นไม้ที่มีลักษณะลำต้นที่เอน ให้วัดที่ตำแหน่ง 1.30 เมตรจากด้านบนออกไป การวัดขนาด DBH หรือเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงออกปกติจะใช้เทปวัดที่เรียกว่า Diameter tape ซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้าต้นไม้มีขนาดเล็กก็จะใช้ Caliper ในการวัด แต่เนื่องจากอุปกรณ์วัดขนาดดังกล่าวในประเทศไทยมีราคาที่สูงและหาค่อนข้าง จึงมีการประยุกต์นำเทปวัดเอวสำหรับงานตัดเสื้อผ้ามาใช้ทดแทนแต่ค่าที่วัดได้จะเป็นค่าเส้นรอบวงที่ระดับเพียงอก (GDH) จึงจำเป็นต้องนำไปแปลงเป็น DBH ด้วยการนำ GBH มาหารด้วย π หรือ 3.1416 (วีระ ปะทะชินัง, 2557) ส่วนในการวัดความสูงของต้นไม้จะใช้ไม้วัดความสูง (Measuring Pole) ที่ทำจากวัสดุพลาสติกหรืออะลูมิเนียมสามารถชักขึ้นชักลงได้ไม่เกิน 15 เมตร ถ้าสูงมากกว่านี้จำเป็นต้องใช้ Haga Hypsometer หรือ Suunto Clinometer โดยการวัดความสูงของต้นไม้(สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2556)ที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความแม่นยำต่ำเนื่องจากไม่สามารถเห็นเรือนยอดได้เนื่องจากการบดบังของพุ่มไม้ ดังนั้นในการเก็บข้อมูลจากแปลงสำรวจเราจะทำการสุ่มวัดความสูง 25 % จากจำนวนต้นไม้ที่อยู่ในแปลงโดยต้องครอบคลุมทุกขนาดความสูง ในขณะที่ DBH นั้นจะทำการวัดทั้งหมด 100 %



ภาพประกอบ 7 การวัดความเจริญเติบโตของต้นไม้ในระดับต่าง ๆ ของต้นไม้ที่มีลักษณะพิเศษ และพื้นที่ที่มีความลาดชัน

ที่มา : ชิงชัย วิริยะบัญชา (2546, น.14)

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอน

โดยทั่วไปป่าไม้จะมีบทบาทในการดูดซับและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของใบ (Photosynthesis) แต่ปริมาณในกระบวนการปลดปล่อยจะน้อยกว่ากระบวนการดูดซับ เพราะต้นไม้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้การแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของอินทรีย์สารที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุคาร์บอน และจะถูกนำมากักเก็บไว้ในรูปของส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ หรือที่เรียกกันว่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพมีทั้งส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (Aboveground Carbon) และส่วนที่อยู่ใต้พื้นดิน (Belowground Carbon) ซึ่งในกระบวนการกักเก็บและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ผลผลิตมวลชีวภาพ ปริมาณการดูดซึมน้ำของพืช ความหนาแน่นของป่า สภาพภูมิประเทศ ความเข้มของแสงอาทิตย์ ชนิดพันธุ์ และอายุของต้นไม้ ฯลฯ (วีระ ปะทะชินัง, 2557) โดยสามารถคำนวณออกมาในรูปของปริมาณน้ำหนักของธาตุคาร์บอน ซึ่งในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนสามารถประเมินได้ด้วย 2 วิธี (ทิวา โลลูพิมาน, กาญจนา นาคะภากร, อัจฉรา อัครวุฒิจุลชัย, สิทธิกร กาญจนสุนทร, และ สุเพชร จิระจรรกุล, 2559) ดังนี้

1. การประเมินโดยการเก็บตัวอย่างพืชพรรณทั้ง กิ่ง ใบ ลำต้น และราก นำมาอบให้แห้งเพื่อหาน้ำหนักแห้ง และวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนที่แต่ละส่วนของพืชสามารถกักเก็บได้ วิธีนี้จะสามารถนำไปวิเคราะห์ได้ทั้งเหนือพื้นดิน และใต้พื้นดิน

2. การหาการกักเก็บคาร์บอนโดยการนำไปคำนวณหาจากมวลชีวภาพของพืชพรรณแต่ละชนิด โดยจะคำนวณจากความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ (DBH) ในสมการแอลโลเมทรีเพื่อหามวลชีวภาพ (Hastuti, Suniada, และ Islamy, 2017; Muhsoni และคนอื่น ๆ, 2021; ศุภกานต์ ธิเตจ๊ะ และคนอื่น ๆ, 2563; สุรเชษฐ์ สีแดง, 2551) ซึ่งวิธีนี้สามารถคำนวณได้ในส่วนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน จากนั้นจึงนำผลการคำนวณมวลชีวภาพที่ได้จากสมการข้างต้นมาคำนวณหาการกักเก็บคาร์บอนจากพืชต่อไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณธาตุคาร์บอน} = \text{ปริมาณมวลชีวภาพของไม้} \times \text{conversion factor}$$

เมื่อ conversion factor = 47 (Bindu, Rajan, Jishnu, และ Joseph, 2020; วิจารย์ มีผล, 2553; สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ และ นรินทร จำวงษ์, 2563)

ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินในพรรณไม้ป่าชายเลนด้วยการคำนวณหาจากมวลชีวภาพโดยอาศัยสมการแอลโลเมตรีของพรรณไม้ป่าชายเลนที่ปรากฏในการศึกษาของสำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2559)

เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ

เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geo-Informatics หรือ Geomatics) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในหน่วยงานทั้งภาครัฐ และเอกชนในงานที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการ หรือติดตามทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เช่น ทรัพยากรที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ หรือทรัพยากรที่มนุษย์สร้างขึ้น (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และ กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2563) โดยประกอบด้วยเทคโนโลยี 3 ประเภท ดังนี้

ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก

เป็นระบบนำร่องโดยอาศัย คลื่นวิทยุ และรหัสที่ส่งจากดาวเทียมที่มีการโคจรอยู่เหนือพื้นโลก ไม่ว่าจะเป็นดาวเทียม NAVSTAR ของประเทศสหรัฐอเมริกา ดาวเทียม GLONASS ของประเทศรัสเซีย หรือดาวเทียม EGNOS และ GALILEO ของสหภาพยุโรป ทำให้สามารถหาตำแหน่งบนพื้นโลกได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยในการทำงานของระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกจะอาศัยการรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 3 ดวง ซึ่งสามารถคำนวณตำแหน่งที่อยู่ในแบบ 2 มิติ และหากระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกรับดาวเทียม 4 ดวงขึ้นไป จะทราบตำแหน่งที่อยู่ในแบบ 3 มิติ คือ ตำแหน่ง และ ความสูง (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ

(องค์การมหาชน) และ สมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย, 2553)



ภาพประกอบ 8 อุปกรณ์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกแบบพกพา
ที่มา : Garmin (n.d.)

1. องค์ประกอบของระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก

ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนอวกาศ (Space segment) ส่วนสถานีควบคุม (Control segment) และส่วนผู้ใช้ (User segment) ซึ่งสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และ สมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย (2553) ได้อธิบายไว้ดังนี้

1.1 ส่วนอวกาศ (Space segment) เป็นองค์ประกอบของระบบที่อยู่ในอวกาศประกอบด้วยดาวเทียม 24 ดวง โดยมีดาวเทียม 21 ดวงทำหน้าที่ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุจากอวกาศมายังพื้นโลก ส่วนอีก 3 ดวง เป็นดาวเทียมปฏิบัติการเสริม วงโคจรของดาวเทียมจัดเรียงอยู่ใน 6 วงโคจรรอบโลก โดยแต่ละวงโคจรมีดาวเทียม 4 ดวง ใช้เวลาโคจรรอบโลกหนึ่งรอบประมาณ 12 ชั่วโมง วงโคจรแต่ละวงทำมุมเอียงประมาณ 55° กับระนาบศูนย์สูตรโลก และมีระยะห่างระหว่างวงโคจรประมาณ 60° การจัดเรียงเช่นนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าทุกจุดบนพื้นโลกจะสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงตลอดเวลา 24 ชั่วโมงโดย ดาวเทียมชุดแรก เรียก GPS Block I มีทั้งหมด 10 ดวง ซึ่งดาวเทียมแต่ละดวงจะมีนาฬิกาที่มีความแม่นยำสูงแบ่งเป็นนาฬิกา

รูปเต็ม 2 เรือน และนาฬิกาซีเซียม 2 เรือน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของเวลา นาฬิกาที่มีความเที่ยงตรงสูงนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญในการคำนวณระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณบนพื้นโลก เพื่อหาค่าพิกัดตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ

1.2 ส่วนสถานีควบคุม (Control segment) ประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดินที่ควบคุมระบบ (Operational Control System : OCS) ที่กระจายอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของโลกมีหน้าที่ปรับปรุงให้ข้อมูล ดาวเทียม มีความถูกต้องและเป็นปัจจุบันอยู่เสมอ

1.3 ส่วนผู้ใช้ (User segment) ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม หรืออุปกรณ์ GPS ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ ทั้งแบบพกพาและแบบติดตั้งในยานพาหนะ เช่น รถยนต์ เรือ หรือเครื่องบิน อุปกรณ์ GPS ทำหน้าที่รับสัญญาณจากดาวเทียม (SVs) และคำนวณเป็นค่าตำแหน่ง ความเร็ว และเวลาโดยประมาณ ถ้าหากต้องการทราบค่า X Y Z (Position) และเวลาได้อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง โดยที่ความแม่นยำของตำแหน่งดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับนาฬิกาและตัว GPS ซึ่งในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสามารถระบุตำแหน่งด้วยความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3 ฟุต นาฬิกาที่ใช้จะมีความถูกต้องสามารถวัดได้ในเวลา 3×10^{-9} วินาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอ้างอิงสำหรับระบบดาวเทียม GPS เรียกว่าเวลา GPS (GPS Time)

2. หลักการทำงานของระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก

ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกมีหลักการทำงานโดยอาศัยตำแหน่งของดาวเทียมเป็นจุดอ้างอิงแล้ววัดระยะจากดาวเทียม 4 ดวงและใช้หลักการเลขาคณิตคำนวณหาตำแหน่งจากนั้นวัดระยะทางระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียมโดยวัดระยะเวลาที่คลื่นวิทยุใช้เดินทางจากดาวเทียมสู่เครื่องรับ (ระยะทาง(S) = ความเร็ว(V) x เวลา(T)) ซึ่งระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกจะได้ผลรับออกมา 3 รูปแบบ ได้แก่ จุดตำแหน่ง (Waypoint) เส้นทาง(Routes) และเส้นเชื่อมโยงจุดตำแหน่ง (Tracks)

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System) หมายถึงกระบวนการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ประกอบกับระบบการทำงานที่สามารถนำเข้าข้อมูล (Input) จัดเก็บ วิเคราะห์ ประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ ข้อมูลเอกสารอื่น ๆ ได้ เช่น ระวางที่ดิน ระวางศูนย์กำเนิด ภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียม ฯลฯ และนอกจากนั้นระบบยังสามารถเพิ่มเติมรายละเอียดของข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับข้อมูลเชิงพื้นที่เป็นข้อมูลเชิงบรรยาย (Attributes Data) ได้อีกด้วย (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และ กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2563)

1. องค์ประกอบของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย (2553) ได้อธิบายถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ไว้ ดังนี้

(1) ฮาร์ดแวร์ คืออุปกรณ์ทางกายภาพที่ใช้ในการดำเนินงานของระบบ GIS ซึ่งรวมถึงคอมพิวเตอร์, อุปกรณ์ป้อนข้อมูล (เช่น เครื่องสแกน, GPS Receiver, digitizing table) และอุปกรณ์แสดงผล/ส่งออกข้อมูล เช่น จอภาพความละเอียดสูง, เครื่องพิมพ์, plotter ฯลฯ ซึ่งการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับปริมาณข้อมูลและความซับซ้อนของการวิเคราะห์เป็นสิ่งสำคัญ เช่น คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลเร็ว (CPU), หน่วยความจำเข้าถึงโดยสุ่มสูง (RAM), และหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) ที่มีประสิทธิภาพ จะช่วยให้การประมวลผลข้อมูลเชิงพื้นที่ขนาดใหญ่เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

(2) ซอฟต์แวร์ หมายถึง ชุดคำสั่งหรือโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อสั่งการและควบคุมการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ให้สามารถประมวลผลข้อมูลและปฏิบัติงานตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

(2.1) ซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการ (operating software) เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่ควบคุม จัดการ และประสานการทำงานระหว่างฮาร์ดแวร์ของคอมพิวเตอร์กับซอฟต์แวร์อื่น ๆ รวมทั้งเป็นตัวกลางระหว่างผู้ใช้กับระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้งานและใช้ทรัพยากรของเครื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคอมพิวเตอร์แต่ละกลุ่มหรือแต่ละชนิดจะใช้ระบบปฏิบัติการที่แตกต่างกัน เช่น ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Microsoft หรือระบบปฏิบัติการตระกูล Mac (MacOS)

(2.2) ซอฟต์แวร์ประยุกต์ (application software) เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมา เพื่อให้ควบคุมการทำงานด้านการประยุกต์เฉพาะเรื่อง เช่น ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Package for Social Science: SPSS) ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียม หรืออากาศยานไร้คนขับ (Remote Sensing Software) และซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS Software) ปัจจุบัน มีซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่ใช้ในประเทศไทยหลายชนิด เช่น อาร์กวิว (Arc View) อาร์กจีไอเอสโพร (Arcgis Pro)

(3) กระบวนการวิเคราะห์ เป็นส่วนสำคัญของระบบงานสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยกระบวนการวิเคราะห์สามารถนำข้อมูลเชิงพื้นที่ และข้อมูลเชิงลักษณะมาวิเคราะห์ร่วมกัน ด้วยการผนวกชั้นข้อมูล (data layer) เช่น การนำแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินมาซ้อนทับกับ

แผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมและข้อมูลประชากร เมื่อรวมข้อมูลทั้งสามเข้าด้วยกัน จะสามารถระบุได้ว่าพื้นที่ใดมีความหนาแน่นของประชากรสูง พื้นที่ใดตั้งอยู่ในเขตน้ำท่วมบ่อยครั้ง และมีรูปแบบการใช้ที่ดินแบบใด เพื่อช่วยในการวางแผนอพยพและการจัดการภัยพิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถสร้างเป็น แผนที่ หรือ แดชบอร์ด (Dashboard) เพื่อใช้ในการบริหารจัดการพื้นที่ได้

(4) ข้อมูล แหล่งข้อมูลของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้มาจากแหล่งต่าง ๆ ทั้งที่เป็นข้อมูลปฐมภูมิที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม และข้อมูลทุติยภูมิ เช่น ข้อมูลจากดาวเทียม ภาพถ่ายทางอากาศ แผนที่เฉพาะด้านต่าง ๆ เป็นต้น โดยแหล่งข้อมูลอาจอยู่ในรูปของกระดาษหรือข้อมูลเชิงเลข

(5) บุคลากร คือผู้ที่มีบทบาทในกระบวนการทำงานทุกขั้นตอนของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) อาทิ ผู้ใช้แผนที่ซึ่งจะใช้แผนที่สำหรับการประกอบการตัดสินใจและวางแผนเฉพาะเรื่อง ผู้ทำแผนที่ซึ่งจัดทำแผนที่จากการผนวกข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงคุณลักษณะจากหลายชั้นข้อมูล เพื่อให้ได้แผนที่ที่ถูกต้องและมีคุณภาพ นักวิเคราะห์ก็จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่และภูมิศาสตร์ เช่น การกำหนดเส้นทาง การจัดการจราจร และประเมินพื้นที่เสี่ยงภัย เป็นต้น ผู้จัดทำข้อมูลทำหน้าที่นำเข้าข้อมูล จัดเก็บ และแก้ไขข้อมูลให้ถูกต้องสำหรับการวิเคราะห์ในด้านต่าง ๆ นักออกแบบระบบฐานข้อมูล ทำหน้าที่ออกแบบระบบฐานข้อมูลเชิงพื้นที่เพื่อให้การทำงานของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และนักพัฒนาโปรแกรม ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกล

การรับรู้ระยะไกลเป็นศาสตร์และศิลปะของการได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุ พื้นที่หรือปรากฏการณ์ต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากเครื่องมือที่ดำเนินการโดยไม่ต้องสัมผัสกับสิ่งต่าง ๆ เหล่านั้น ข้อมูลการรับรู้ระยะไกลสามารถนำมาใช้ศึกษาหาชนิดของวัตถุโดยอาศัยลักษณะการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการสะท้อนจากวัตถุ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุแต่ละชนิดจะมีลักษณะการแผ่รังสีหรือการสะท้อนแสงที่มีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกันการรับรู้ระยะไกลจึงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจำแนกและเข้าใจวัตถุหรือสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากลักษณะเฉพาะตัว ในการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีการรับรู้ระยะไกลอาศัยคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสื่อของการได้มาซึ่งข้อมูลใน 3 ลักษณะได้แก่ช่วงคลื่น (spectral) รูปทรงสัณฐานของวัตถุบนพื้นโลก (spatial) และการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา (temporal) ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของการรับรู้ระยะไกลคือคลื่นแสงที่เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์หรือพลังงานจากตัวเอง (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015; สุรภี อิงคากุล, 2548)

ดาวเทียม Sentinel-2



ภาพประกอบ 9 ดาวเทียม Sentinel-2
ที่มา : European Space Agency (2024)

ดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Copernicus ของสหภาพยุโรป ได้รับการออกแบบเพื่อการตรวจสอบทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะด้านการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การเกษตร และระบบนิเวศต่าง ๆ โดย Sentinel-2 ประกอบด้วยเซ็นเซอร์แบบ MultiSpectral Instrument (MSI) ที่สามารถตรวจวัดข้อมูลได้ถึง 13 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ครอบคลุมช่วงคลื่นตั้งแต่แสงที่ตามองเห็นได้ (Visible) ไปจนถึงอินฟราเรดคลื่นสั้น (Shortwave Infrared: SWIR) ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์พืชพรรณด้วยดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Indices) เช่น NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) และ VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) ที่มีความสัมพันธ์กับชีวมวลและการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (Muhsoni et al., 2021)

นอกจากนี้ Sentinel-2 ยังมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงถึง 10 เมตรในบางแถบสเปกตรัม และสามารถถ่ายภาพพื้นที่เดิมซ้ำได้ทุก 5 วัน เมื่อทำงานร่วมกับ Sentinel-2A และ 2B จึงเหมาะสมกับการติดตามการเปลี่ยนแปลงของพืชพรรณในระบบนิเวศที่มีความเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เช่น ป่าชายเลน อีกทั้งยังเปิดให้ใช้งานฟรีโดยไม่มีค่าใช้จ่าย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมให้มีการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติอย่างกว้างขวาง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2566)

ตาราง 1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

ช่วงคลื่น	ค่ากึ่งกลางช่วงคลื่น (ไมโครเมตร)	รายละเอียดจุดภาพ (เมตร)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.708	20
Band 6- Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7- Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

ที่มา : European Space Agency (2024)

ดัชนีพืชพรรณ

การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณเป็นการคำนวณโดยนำช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณจากกระบวนการสำรวจระยะไกลมาทำสัดส่วนซึ่งกันและกัน แล้วให้ผลลัพธ์ในการจำแนกบริเวณที่มีพืชพรรณปกคลุมกับบริเวณที่ไม่มีพืชปกคลุม เช่น ให้น้ำดินเปิดโล่ง ซีเมนต์ แหล่งน้ำ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการติดตามการปริมาณของพืชพรรณในพื้นที่ และช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณ ได้แก่ ช่วงคลื่นตามมองเห็นสีแดง (RED) ซึ่งมีคุณสมบัติในการวัดค่าการสะท้อนจากส่วนที่มีการสังเคราะห์แสงในใบพืชหรือส่วนที่มีคลอโรฟิลล์ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) มีคุณสมบัติในการแยกแยะพืชพรรณและการวัดปริมาณมวลชีวภาพ (Biomass) ช่วงคลื่นตามมองเห็นสีเขียวเป็นช่วงคลื่นที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสง (ชูเดช โลศิริ, 2564)

ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI

NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) เป็นการนำค่าสะท้อนของพื้นผิวระหว่างช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (NIR) กับช่วงคลื่นแสงสีแดง (Red) โดยนำค่าผลต่างของทั้งสองช่วงคลื่นมาหารด้วยค่าผลรวมของทั้งสองช่วงคลื่น เพื่อปรับให้ค่าที่ได้กระจายอยู่ในลักษณะมาตรฐานทำให้ค่า NDVI มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยคำนวณจากสูตรของ Geospatial (Harris Geospatial Solution, 2019; ชูเดช ไลศิริ, 2564) ดังสมการ

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

เมื่อ NDVI คือ ดัชนีพืชพรรณโดยวิธี Normalized Difference Vegetation Index

NIR คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

RED คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีแดง

ค่าดัชนีพืชพรรณ VARI

ดัชนีพืชพรรณ VARI เป็นดัชนีที่พัฒนามาจาก ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) ซึ่งมีรากฐานจาก NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) อีกทีหนึ่ง โดย VARI ออกแบบมาเพื่อประเมินลักษณะของพืชพรรณ โดยใช้เฉพาะข้อมูลในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Visible spectrum) และมีความทนทานต่อผลกระทบจากชั้นบรรยากาศมากขึ้นดัชนี VARI มักถูกใช้ในการคาดการณ์หรือประเมินสภาพต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพืช สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง (กิตติศักดิ์ เรืองกระโทก, 2560)

$$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE}$$

เมื่อ VARI คือ ค่าดัชนี Vegetation Atmospherically Resistant Index

GREEN คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีเขียว

RED คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีแดง

BLUE คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีฟ้า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ป่าชายเลน

ทนุงศ์ แสงเทียน และ พูลศรี วันธงไชย (2551) ได้ศึกษาปริมาณคาร์บอนที่ถูกกักเก็บในสวนป่าโกงกางใบใหญ่ในแต่ละช่วงชั้นอายุ ได้แก่ 5, 6, 9, 10, 11 และ 12 ปี ในพื้นที่ อำเภอมือเมือง จังหวัดตราด พบว่าต้นโกงกางใบใหญ่ในพื้นที่ศึกษามีอัตราการรอดตาย และการเจริญเติบโตสูง มีปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินและใต้ดินรวมกันเท่ากับ 11.65, 14.00, 89.71, 109.48, 189.08 และ 193.23 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ และมีการสะสมคาร์บอนในเนื้อไม้เท่ากับ 5.45, 6.56, 42.06, 51.36, 88.70 และ 90.66 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ตามลำดับ

วิจารณ์ มีผล (2553) ได้ศึกษาศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนของป่าชายเลนในพื้นที่สงวนชีวมณฑลระนอง ดำเนินการโดยการวางแปลงสำรวจแบบ Transect line ขนาด 10 × 500 เมตร จำนวน 6 แปลง เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างของสังคมพืชป่าชายเลนในพื้นที่ศึกษา และดำเนินการคัดเลือกไม้ตัวอย่างจำนวน 11 ชนิด ๆ ละ 11 ต้น โดยพิจารณาการกระจายของชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการประมาณค่ามวลชีวภาพ (biomass estimation equation) และวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพรรณไม้โดยวิธีการเผาแห้ง (dry combustion method) ผลการศึกษาพบว่า สังคมพืชในพื้นที่ป่าชายเลนที่ศึกษาประกอบด้วยพรรณไม้ทั้งหมด 17 ชนิด โดยมีความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลชีวภาพในแต่ละระดับการเจริญเติบโต ได้แก่ ไม้ใหญ่ 1,905 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ ไม้ขนาดกลาง 1,105 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ และกล้าไม้ 2,762 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ โดยไม้ใหญ่มีความสูงเฉลี่ย 12.05 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 10.13 เซนติเมตร ทั้งนี้ ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพตามสูตรของ Shannon-Wiener เฉลี่ยอยู่ที่ 0.7105 ซึ่งแสดงถึงระดับความหลากหลายที่อยู่ในระดับปานกลาง และจากการวิเคราะห์หีมวลชีวภาพ พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 119.76 ตันต่อเฮกตาร์ และสามารถกักเก็บคาร์บอนได้เฉลี่ย 57.85 ตันต่อเฮกตาร์ โดยปริมาณคาร์บอนที่สะสมในชีวมวลของพรรณไม้มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 47.72 ของน้ำหนักแห้ง เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาประเมินในภาพรวมของพื้นที่ พบว่าป่าชายเลนในเขตสงวนชีวมณฑลระนองมีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนรวมทั้งสิ้นประมาณ 398,971 ตันคาร์บอน หรือเทียบเท่ากับ 1.46 ล้านตันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Dung, Tue, Nhuan, and Omori (2016) ได้ศึกษาการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่พื้นที่ป่าชายเลน ในสวนป่าชายเลนเกินเหยื่อ ปากแม่น้ำโขง ประเทศเวียดนาม โดยประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในสวนป่าชายเลนเกินเหยื่อ ซึ่งเป็นพื้นที่ป่าชายเลนที่ได้รับการรบกวนจากพายุไต้ฝุ่น และโคลน โดยการวัดมวลชีวภาพของต้นไม้ราก เศษไม้ร่วง ตะกอนอินทรีย์คาร์บอน และ

ความลึกโดยรวมผลการศึกษาพบว่า การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ย $102 \pm 24.7, 298.1 \pm 14.1$ และ 243.6 ± 40.4 MgC/ha สำหรับ ชายขอบป่า, พื้นที่เปลี่ยนแปลงสภาพ และ ภายในป่า ตามลำดับ ซึ่งการกักเก็บคาร์บอนที่อยู่เหนือพื้นดินและใต้ดิน สามารถกักเก็บคาร์บอน ตั้งแต่ 765 ถึง 1,026 MgC/ha โดยค่าเฉลี่ยรวม 910.7 ± 32.3 MgC/ha และการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ป่าชายเลนที่ได้รับการรบกวนจากพายุไต้ฝุ่น และโคลนมีค่าน้อยกว่าป่าชายเลนสมบูรณ์คือมีค่าเท่ากับ 573.5 MgC/ha และ 619.8 ± 24.3 MgC/ha ตามลำดับ ในระดับภูมิภาคสวนป่าชายเลน เกิน เข่ยอ สามารถกักเก็บคาร์บอนได้ถึง 41.5 TgC ซึ่งเท่ากับ 152.3 Tg ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนด้วยการสำรวจระยะไกล

Myeong, Nowak, and Duggin (2006) ได้ประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของ ต้นไม้ในเมือง ณ เมืองซีราควิส รัฐนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการ ทางด้านการสำรวจระยะไกล (NDVI & PIFs) กับภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ในช่วงเวลาต่าง ๆ (1985, 1992, 1999) พบว่าการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ในพื้นที่ศึกษามีค่าประมาณ 146,800, 149,430 และ 148,660 ตันคาร์บอนคาร์บอนตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการศึกษาทำให้เห็นว่าการ วิเคราะห์ภาพดาวเทียมสามารถประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนได้ดีพอสมควร

สุริย์พร นิพิฐวิทยา (2555) ได้ประยุกต์ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมTheos เพื่อศึกษา ลักษณะพืชพรรณในป่าชายเลน บริเวณพื้นที่โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อม ผักเป็ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริตำบลแหลมผักเป็ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรีโดยการ สรุวจข้อมูลภาพสนาม ด้วยการวางแปลงตัวอย่าง จำนวน 95 แปลง และจำแนกพืชพรรณไม้ป่า ชายเลนจากภาพถ่ายดาวเทียมTheos ด้วยการใช้เทคนิค classification the maximum likelihood with multispectral band และแสดงออกมาให้รูปแบบของแผนที่ ซึ่งผลการศึกษา พบว่า ภาพถ่ายจากดาวเทียมTheos สามารถจำแนกพื้นที่ศึกษาออกเป็น 4 ประเภท คือ แหล่งน้ำ ตะกอนดิน พื้นที่ป่าชายเลนพืชผสมทะเล เนื้อที่ประมาณ 6.66 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็น 64.47 % และพื้นที่ป่าชายเลน พืชโกงกางใบใหญ่เนื้อที่ประมาณ 2.52 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็น 24.39 % ค่าความถูกต้องประเมินโดยการเปรียบเทียบกับแผนที่ดัชนีพืชพรรณธรรมชาติที่มีค่าอยู่ ระหว่าง 0.00-1.00 ในภาพถ่ายดาวเทียมTheos กำหนดพื้นที่สีเขียวเข้ม แทนค่าดัชนีพืชพรรณ ระหว่าง 0.51 - 1.00 เป็นช่วงที่มีพืชพรรณธรรมชาติความสมบูรณ์และเรือนยอดหนาแน่น ขณะที่ พื้นที่สีเขียวอ่อนแทนค่าดัชนีพืชพรรณระหว่าง 0.01- 0.50 เป็นช่วงที่มีพืชพรรณธรรมชาติขึ้นอยู่ อย่างบางเบา และพื้นที่สีส้มแทนพื้นที่ที่ไม่มีพืชพรรณธรรมชาติ

วีระ ปะทะซันัง (2557) ได้ศึกษาการประมาณค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) มวลชีวภาพ (Biomass) และการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของสวนสาธารณะในกรุงเทพมหานคร โดยมีพื้นที่ศึกษา คือ สวนลุมพินี สวนเบญจกิติ และสวนวชิรเบญจทัศ โดยวิธีการศึกษามีการประยุกต์ภูมิสารสนเทศ สมการแอลโลเมตรี ข้อมูลการสำรวจภาคสนาม มาบูรณาการร่วมกัน โดยในการศึกษาจะแบ่งผลการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ 1. ผลที่ได้จากการสำรวจภาคสนามพื้นที่สวนสาธารณะทั้ง 3 แห่ง พบว่าค่าดัชนีผิวใบ ของสวนวชิรเบญจทัศ สวนลุมพินี สวนเบญจกิติ มีค่าเท่ากับ 1.01 0.92 และ 0.61 ตามลำดับ มวลชีวภาพเท่ากับ 1,894,250.79 2,137,652.96 และ 449,889.23 กิโลกรัม ตามลำดับ และการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเท่ากับ 1,068,826.48 947,125.39 และ 224,944.62 กิโลกรัมคาร์บอนตามลำดับ และ 2. ผลที่ได้จากการประมาณผ่านภาพถ่ายดาวเทียมซึ่งได้จากการกำหนดแปลงสำรวจขนาด 15 x 15 ตารางเมตรในสวนสาธารณะทั้ง 3 แห่ง พบว่าค่าดัชนีผิวใบ ของสวนวชิรเบญจทัศ สวนลุมพินี สวนเบญจกิติ มีค่าเท่ากับ 3.82 3.75 และ 2.81 ตามลำดับ มวลชีวภาพเท่ากับ 75,800.70 88,674.00 และ 46,052.45 กิโลกรัม ตามลำดับ และการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเท่ากับ 37,921.36 44,339.10 และ 23,049.87 ตามลำดับ

Situmorang, Sugianto, and Darusman (2016) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของดัชนีพืชพรรณเพื่อใช้ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ในพื้นที่ Lembah Seulawah ประเทศอินโดนีเซีย ในงานนี้ได้ใช้สมการแอลโลเมตรีร่วมกับการสำรวจภาคสนามในการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนของกลุ่มตัวอย่าง จากนั้นจึงนำไปหาความสัมพันธ์กับดัชนีพืชพรรณ 2 ชนิดได้แก่ EVI และ NDVI ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ผลการศึกษาพบสมการความสัมพันธ์ระหว่าง EVI กับ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอน ($CS = 151.7(EVI) - 39.76$; $R^2 = 0.83$) จากสมการข้างต้นสามารถประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ศึกษาได้เท่ากับ 790,344.1 ตันคาร์บอน ($51.48 \text{ tons ha}^{-1}$) และสมการความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI กับ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอน ($CS = 204(NDVI) - 102.1$; $R^2 = 0.728$) จากสมการข้างต้นสามารถประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ศึกษาได้เท่ากับ 711,061.81 ตันคาร์บอน ($46.32 \text{ tons ha}^{-1}$)

กิตติศักดิ์ เรืองกระโทก (2560) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าชายเลนธรรมชาติกับดัชนีพืชพรรณจำนวน 10 ชนิดโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยในพื้นที่อำเภอบางคลอก จังหวัดภูเก็ต จากการศึกษาแบบจำลองทั้ง 51 แบบจำลอง วิธีการถดถอยซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีนมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ดัชนีพื้นที่ผิวใบดีที่สุด คือ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เท่ากับ 0.694 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0.292 ตารางเมตร ต่อตารางเมตร และมีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ได้จากการพยากรณ์เท่ากับ 3.94 ตารางเมตรต่อตาราง เมตร

ศุภกานต์ ธิเตจ๊ะ และคนอื่น ๆ (2563) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGC) ของป่าปลูก เพื่อการทดแทนพื้นที่การทำเหมืองแร่สังกะสีของ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด ในลุ่มน้ำแม่ตาบ อำเภอแม่สอดจังหวัดตาก ซึ่งประกอบด้วยแปลงปลูกจำนวน 2 แปลงคือ แปลงที่มีอายุ 19 ปี เนื้อที่ 328 ไร่ และแปลงที่มีอายุ 20 ปี เนื้อที่ 505 ไร่ ซึ่งเดิมเป็นป่าเบญจพรรณเสื่อมโทรมจากการบุกรุก ทำการเกษตร โดยในการศึกษาได้ทำการวางแปลงสุ่มตัวอย่างขนาด 40x40 เมตรชั้นอายุละ 5 แปลงรวม 10 แปลง แล้วทำการวัดการเจริญเติบโตของต้นไม้เพื่อนำมาคำนวณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยใช้สมการแอลโรเมตรรีพบว่า แปลงอายุ 19 ปีมีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยที่ 6,477 กก/ไร่ (40.48 Mg/ha) และแปลงอายุ 20 ปีมีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยที่ 9,202 กก/ไร่ (57.51 Mg/ha) และความสัมพันธ์ระหว่าง NDVI ในพื้นที่ศึกษาที่วิเคราะห์จากดาวเทียม Landsat8 และ AGC ในแปลงอายุ 19 ปี คือ $CS = 79,029(NDVI) - 16,215$; $R^2 = 0.96$ และในแปลงอายุ 20 ปี คือ $CS = 28,687(NDVI) - 517$; $R^2 = 0.9$ ได้ค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน 1800 และ 3800 เมกกะกรัมตามลำดับ

Novia and Wilson (2021) ได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับการกักเก็บคาร์บอนโดยใช้ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณในพื้นที่ป่าทุติยภูมิเพื่อใช้ในการติดตามการกักเก็บคาร์บอนในแต่ละเวลา ผลการศึกษาที่ได้คือปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ศึกษาเท่ากับ $15.33 \text{ tons ha}^{-1}$ และผลของความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแตกต่างพืชพรรณและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนคือ $CS = 48.358(NDVI) - 4.2339$; $R^2 = 0.431$

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ธนวุฒิ ทองมี, จตุรงค์ สมอาจ, และ วรวิทย์ จิตรสุขชา (2562) ได้ศึกษาการประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ป่าในมหาวิทยาลัยมหาสารคามโดยใช้ข้อมูลจากการรับรู้ระยะไกลโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกพื้นที่ป่าในมหาวิทยาลัยมหาสารคามด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับและภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 และประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินพื้นที่ป่าในปี 2561 ด้วยวิธีการจำแนกเชิงวัตถุ (Object-Based Image Analysis: OBIA) แบบจุดภาพใกล้เคียงที่สุด (Nearest Neighbor: NN) เพื่อจำแนกพื้นที่ป่าและเปรียบเทียบค่าความถูกต้อง โดยทำการรวบรวมข้อมูลภาคสนามแปลงตัวอย่าง 10x10 เมตร จำนวน 44 แปลง

ได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับเพิงอก ความสูงของต้นไม้ และจำนวนต้น เพื่อคำนวณค่ามวลชีวภาพและนำมาคำนวณค่าความสัมพันธ์กับค่าดัชนีสีเขียวส่วนเกิน (Excess Green Index: ExG) ร่วมกับข้อมูลภาคสนาม เพื่อประเมินการกักเก็บคาร์บอนด้วยสมการแอลโลเมตรี ผลการศึกษาพบว่า การจำแนกพื้นที่ป่าด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับและภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ร้อยละ 89 และ 68 ตามลำดับ โดยข้อมูลอากาศยานไร้คนขับมีความถูกต้องสูงกว่าเพราะมีความละเอียดจุดภาพสูง สามารถแบ่งภูมิภาควัตถุภาพได้ชัดเจน และถูกรบกวนจากชั้นบรรยากาศค่อนข้างน้อย การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามวลชีวภาพและดัชนีสีเขียวส่วนเกินมีความสัมพันธ์มากที่สุด ($r: 0.80$) และสามารถประเมินค่ามวลชีวภาพได้ประมาณ 16,166,339 กิโลกรัม และมีปริมาณกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดประมาณ 7,598,179 กิโลกรัม

รุจน์ ยศธสาร และ เพ็ญประภา เพชระบูรณิน (2563) ได้ศึกษาการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของต้นยางน้ำแดงโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ ในการสำรวจยางนาจำนวน 1,450 ต้นในพื้นที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น พบว่าต้นยางนามีความสัมพันธ์ระหว่างความสูงลำต้นและเส้นรอบวงในเชิงบวก และมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (R^2) 0.78 โดยสร้างสมการทำนายค่าดังนี้ เส้นรอบวงยางนา (ซม.) = $7.85 * \text{ความสูงต้นยางนา (ม.)} - 8.85$ ผลการประมวลภาพถ่ายทางอากาศได้ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ 3 ชั้นข้อมูล ได้แก่ ภาพถ่ายออร์โธรีสตีแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) และแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข (DTM) ที่ความละเอียด 2.42 4.81 และ 4.81 เซนติเมตรตามลำดับ สามารถแปลตีความต้นยางนาด้วยสายตาได้ 906 ต้น และวิเคราะห์ความสูงของต้นยางนาเพื่อทำนายค่าเส้นรอบวงของต้นยางนา พบว่าต้นยางนาในเขตมหาวิทยาลัยขอนแก่นมีค่ามวลชีวภาพเท่ากับ 820.32 ตันคาร์บอน และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพเท่ากับ 385.55 ตันคาร์บอน

Muhsoni et al. (2021) ได้ศึกษาการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนของป่าชายเลนโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ โดยมีพื้นที่ศึกษาคือเขตปกครองพิเศษลำเพ็ง ประเทศอินโดนีเซียโดยผู้ศึกษาได้ทำการลงสำรวจในพื้นที่ศึกษาเพื่อเก็บแปลงตัวอย่าง (ค่าการเจริญเติบโตของต้นไม้ , ความสูง , ชนิด) แล้วนำมาเข้าสมการแอลโลเมตรีเพื่อวิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บคาร์บอน จากนั้นจึงใช้อากาศยานไร้คนขับทำการบินถ่ายภาพเพื่อสร้างแบบจำลองความสูง (DEM) จากนั้นจึงนำการกักเก็บคาร์บอนที่ได้จากการลงสำรวจมาหาความสัมพันธ์ร่วมกับแบบจำลองความสูงดังกล่าวด้วยสมการ linear regression, non-linear regression, logarithmic regression and Polynomial regression ผลการศึกษาที่ได้คือการกักเก็บคาร์บอนของพื้นที่ศึกษาที่ประมาณได้

จาก logarithmic regression เป็นโมเดลที่ดีที่สุดในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนด้วยอากาศยานไร้คนขับ ($y = 0.055 \ln(x) + 0.244$, $R^2 = 0.7454$)

การประยุกต์ใช้ดัชนีพืชพรรณ VARI ในงานด้านเกษตรกรรมและป่าไม้

สาวิตรี จันทรสิงห์ (2566) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับผลผลิตกาแฟ เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับประเมินผลผลิตกาแฟพันธุ์อาราบิกา โดยใช้ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ ในพื้นที่บ้านสันเจริญ อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน โดยดำเนินการศึกษาในแปลงตัวอย่าง 4 แปลง ในช่วงฤดูเก็บเกี่ยวระหว่างปี 2021–2022 ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความสูง ขนาดทรงพุ่ม เส้นรอบวงลำต้น และดัชนีพืชพรรณความเขียวในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (VARI) การวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ และประเมินความน่าเชื่อถือทางสถิติด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ผลการศึกษา พบว่า สมการประมาณค่าผลผลิตกาแฟของทั้ง 4 แปลง โดยใช้ตัวแปรความสูง ขนาดทรงพุ่ม เส้นรอบวงลำต้น และ VARI สามารถอธิบายความผันแปรของผลผลิตได้ในช่วง 74–88% และทุกตัวแปรีผลต่อการคาดการณ์ผลผลิตเฉลี่ยรายต้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 95% โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตมากที่สุด คือ เส้นรอบวงลำต้น (0.582) รองลงมาคือ ดัชนีพืชพรรณ VARI (0.411) ขนาดทรงพุ่ม (0.406) และความสูง (-0.401) เมื่อวิเคราะห์ผลผลิตเฉลี่ยรายต้นของทุกแปลง พบว่าค่า RMSE เท่ากับ 2.12 กิโลกรัมต่อต้น และเมื่อทดสอบสมการคาดการณ์กับแปลงตรวจสอบ พบว่าค่า RMSE อยู่ที่ 2.37 กิโลกรัมต่อต้น ผลการวิจัยครั้งนี้สามารถเป็นต้นแบบในการใช้ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ เพื่อวางแผนการจัดการผลผลิตทางการเกษตรต่อไปได้

วิภาวรัตน์ อัมพะวัน (2561) ได้ทำการศึกษาเทคนิคการประมาณสภาพกายภาพของต้นยางพารา โดยใช้ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ ในสวนยางพาราบริเวณตำบลวังนกแอ่น อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย แบบจำลองระดับพื้นผิว (DSM) แบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) และภาพสีออร์โธ ที่ได้จากกระบวนการโฟโตแกรมเมตรีด้วยโปรแกรม Pix4Dmapper เพื่อนำไปประมาณค่าความสูง ประมาณค่าชีวมวลเหนือพื้นดิน และใช้ภาพสีออร์โธเพื่อตรวจสอบค่าดัชนีความเขียว (VARI) ผลการวิเคราะห์พบว่า ความสูงของต้นยางพาราที่ได้จากข้อมูล CHM มีความสัมพันธ์สูงกับค่าความสูงที่วัดด้วยเครื่องวัดต้นไม้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) สูงทั้งในสวนยางพาราแปลงที่ 1 และแปลงที่ 2 การตรวจสอบความแม่นยำของค่าความสูงจากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ พบว่าค่า RMSE เท่ากับ 1.009 และ 1.129 เมตร ตามลำดับ จากการคำนวณค่าดัชนี VARI พบว่า ในสวนยางพาราแปลงที่ 1 ค่าความเขียวกระจายไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณกลางแปลงมีค่าความเขียวน้อย (ปรากฏเป็นสีเหลือง) ในขณะที่

ที่บริเวณโดยรอบมีค่าความเขียวสูงและมีสีเหลืองเพียงเล็กน้อย ส่วนในสวนยางพาราแปลงที่ 2 พบว่าค่าความเขียวมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแปลง ซึ่งสอดคล้องกับสภาพต้นยางพาราจริงในพื้นที่ จึงสรุปได้ว่า ดัชนี VARI สามารถใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของต้นยางพาราจากค่าความเขียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากต้องการประเมินสุขภาพพืชอย่างละเอียดด้วยค่าดัชนี NDVI จำเป็นต้องใช้อากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งเซนเซอร์ NIR (Near-Infrared)



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

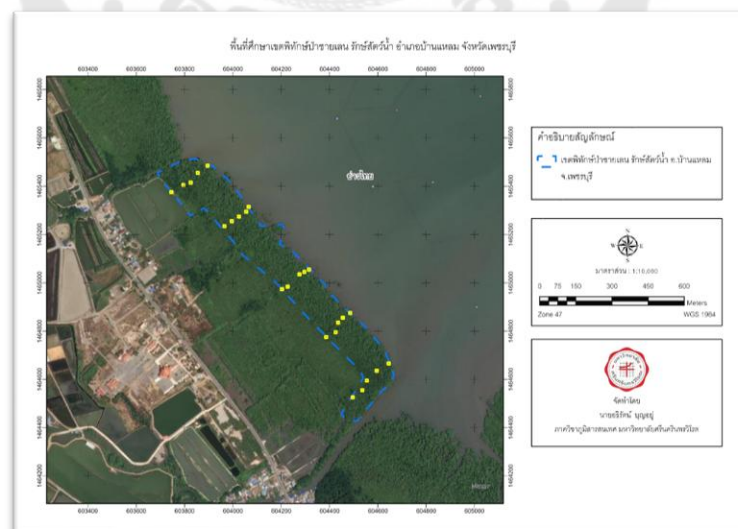
พื้นที่ศึกษา

เขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี

บริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี มีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบชายฝั่งอ่าวไทย ด้านทิศเหนือและทิศใต้มีลำคลองไหลผ่านทำให้มีความชุ่มชื้นตลอดทั้งปี พรรณไม้ป่าชายเลนที่พบมากที่สุด คือ แสมทะเล (*Avicennia marina*) และ โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora Mucronata*) ตามลำดับ

ป่าชายเลนบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี มีพื้นที่ประมาณ 126 ไร่ ในพิกัด UTM ที่ 1464400 ถึง 1456000 เหนือ และ 603600 ถึง 605000 ตะวันออก โดยมีพื้นที่ติดต่อดังนี้

- ทิศเหนือ** ติดต่อกับ คลองสาธารณะ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี
- ทิศใต้** ติดต่อกับ คลองสาธารณะ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี
- ทิศตะวันออก** ติดต่อกับ อ่าวไทย
- ทิศตะวันตก** ติดต่อกับ ต.บางตะบูนออก อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี



ภาพประกอบ 10 พื้นที่ศึกษาเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

อุปกรณ์ในสำนักงาน

1. ภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดปานกลาง
2. อุปกรณ์คอมพิวเตอร์สำหรับใช้ประมวลผลข้อมูลภาพ และวิเคราะห์ข้อมูล
3. ซอฟต์แวร์ในการจัดการข้อมูลภาพ การนำเข้าข้อมูล และการผลิตแผนที่ Arcgis Pro

Pro

การเก็บข้อมูลภาคสนาม

1. สายวัด diameter tape
2. เครื่องมือวัดความสูงของต้นไม้
3. เทปวัดระยะยาว 50 เมตร
4. เชือกโยยักษ์ ความยาวไม่น้อยกว่า 50 เมตร
5. เข็มทิศ
6. เครื่องกำหนดพิกัดภูมิศาสตร์ด้วยดาวเทียม (GNSS)
7. แบบฟอร์มสำหรับกรอกข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเตรียมและรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

1. ข้อมูลขอบเขตการปกครองจังหวัดเพชรบุรี เป็นข้อมูลที่ได้ความอนุเคราะห์จากกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย
2. ข้อมูลขอบเขตเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี
3. ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 เป็นภาพถ่ายดาวเทียมลายละเอียดปานกลางครอบคลุมบริเวณพื้นที่ศึกษา ซึ่งบันทึกภาพเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2567
4. สมการแอลโลเมตรี เป็นสมการที่ใช้ในการประมาณค่ามวลชีวภาพเพื่อติดตามปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บไว้ในส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ โดยในการศึกษาคั้งนี้จะใช้สมการของพรรณไม้ป่าชายเลนฝั่งอ่าวไทย ของสำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2559)

การเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ

การสำรวจข้อมูล เป็นขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาคสนาม เป็นการเก็บข้อมูลเพื่อให้ทราบปริมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. สำรวจและนับจำนวนต้นไม้ในแปลงตัวอย่าง โดยมีต้นไม้ที่สนใจคือโกงกาง ใบใหญ่ และแสมทะเลซึ่งเป็นพันธุ์ไม้เด่นของพื้นที่ศึกษา (Nipithwittaya & Bualert, 2012) โดยเลือกกลุ่มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับเพียงอก 1.30 เมตรตั้งแต่ 4.5 เซนติเมตรขึ้นไป และใช้เครื่องมือกำหนดพิกัดภูมิศาสตร์ (GNSS) บันทึกค่าพิกัดของต้นไม้ พร้อมทั้งบันทึกชนิดของต้นไม้ในพื้นที่ให้ตรงกับค่าพิกัดที่สามารถบันทึกได้ด้วย

2. วัดความเจริญเติบโตของต้นไม้ โดยวัดเส้นรอบวงของต้นไม้ที่ระดับความสูงเพียงอก หรือ 1.30 เมตร ในกรณีที่ต้นไม้เป็นต้นไม้ที่มีรากอากาศ เช่น ไม้โกงกางจะวัดที่ระดับ 0.20 เมตรเหนือคอราก และประมาณความสูงของต้นไม้ดังกล่าวด้วยเครื่องมือวัดความสูง

การจัดการและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการศึกษาการประมาณการกักเก็บคาร์บอนด้วยเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในครั้งนี้ สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินการได้ ดังนี้

การจัดการข้อมูล

1. การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมก่อนการวิเคราะห์

1.1 การตรึงภาพ (Rectification) เป็นกระบวนการใส่ค่าพิกัดให้กับภาพถ่ายดาวเทียมในกรณีที่ภาพถ่ายดาวเทียมไม่มีค่าพิกัด

1.2 การสร้างขอบเขตพื้นที่ศึกษาให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลภูมิสารสนเทศ (Shapefile) จากแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ

1.3 การตัดภาพถ่ายดาวเทียม (Subset Image) กับขอบเขตพื้นที่ศึกษา ซึ่งจะทำให้ได้ภาพเฉพาะพื้นที่ศึกษาในที่นี้คือ ป่าชายเลนบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี

2. การเตรียมข้อมูลสำหรับสำรวจภาคสนาม

2.1 กำหนดพื้นที่วางแปลงสุ่มตัวอย่างขนาด 10 x 10 เมตร ซึ่งใช้รูปแบบการกำหนดจุดสำรวจแบบ Systematic Random Sampling (Wirasatriya et al., 2022) จำนวน 25 แปลงโดยกำหนดระยะห่างระหว่างแปลงอย่างสม่ำเสมอ และด้วยลักษณะเฉพาะของระบบนิเวศป่าชายเลนที่มีการกระจายของพรรณไม้ที่แปรผันตามความใกล้ไกลจากชายฝั่งทะเล เนื่องจากความเค็มของดิน ความถี่ของการท่วมขัง และความลึกของน้ำทะเลที่แตกต่างกันในแต่ละแนว (Akira, Jin, & Sasitorn, 2008) ดังนั้นในการวางแปลงครั้งนี้จึงได้กำหนดแนววางแปลงจากแนวชายฝั่งทะเลเข้าสู่แผ่นดิน โดยวางแนวเส้นสำรวจในแนวตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง

เพื่อให้สามารถสะท้อนรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างป่าชายเลนที่เกิดขึ้นตามลักษณะทางนิเวศวิทยาได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน

เขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชชสิทธิ์วน้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี มีพื้นที่ทั้งหมด 126 ไร่ หรือประมาณ 202,709 ตารางเมตร สามารถกำหนดแปลงตัวอย่างขนาด 10×10 เมตร ทั้งพื้นที่ได้ 2,258 แปลง และได้ทำการสุ่มแปลงตัวอย่างสำหรับศึกษาทั้งหมด 25 แปลงกระจายทั่วพื้นที่ เนื้อที่รวมประมาณ 2,500 ตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.23 ของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด

2.2 วางแผนการสำรวจภาคสนาม ประกอบด้วย การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ การสร้างดัชนีรายชื่อต้นไม้ และแบบฟอร์มการสำรวจ โดยในการสำรวจภาคสนามจะสำรวจเฉพาะโก่งกางใบใหญ่ และแสมทะเลที่เป็นพันธุ์ไม้เด่นของพื้นที่ศึกษา

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในการศึกษาครั้งนี้ ใช้กระบวนการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ ซึ่งเป็นการคำนวณโดยนำแผนที่ภาพถ่ายในช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณของพื้นที่ศึกษาได้แก่ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีแดง (RED) ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีเขียว (GREEN) ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีฟ้า (BLUE) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) ที่มาทำสัดส่วนซึ่งกันและกัน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะประกอบด้วย ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI , VARI สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

(1) ดัชนีความต่างของพืชพรรณ (NDVI)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

เมื่อ NDVI คือ ดัชนีพืชพรรณโดยวิธี Normalized Difference Vegetation Index

NIR คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

RED คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีแดง

(2) ดัชนีความแตกต่างของช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ในชั้นบรรยากาศ (VARI)

$$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE}$$

เมื่อ VARI คือ ค่าดัชนี Vegetation Atmospherically Resistant Index)

GREEN คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีเขียว

RED คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีแดง

BLUE คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นแสงสีฟ้า

2. การประมาณค่ามวลชีวภาพ

การประมาณค่ามวลชีวภาพเป็นการประมาณค่าปริมาณมวลชีวภาพของพันธุ์ไม้ในแปลงตัวอย่างจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเป็นรายต้น จากนั้นจึงนำมาหาผลรวมของผลผลิตมวลชีวภาพ ซึ่งในการศึกษาคั้งนี้จะใช้สมการแอลโลเมตรีที่เป็นสมการที่สร้างขึ้นสำหรับป่าชายเลนของประเทศไทยที่เป็นผลการศึกษาของ กองส่งเสริมการบริหารจัดการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ดังตาราง 2 และ 3

ตาราง 2 สมการแอลโลเมตรีของพรรณไม้ป่าชายเลนฝั่งอ่าวไทย

พันธุ์ไม้	สมการ	R ²
โกงกางใบใหญ่		
มวลชีวภาพของลำต้น	$\text{Log } W_s = -1.198902 + 0.916833(\text{Log } D^2H)$	0.9969
มวลชีวภาพของกิ่งไม้	$\text{Log } W_b = -1.092804 + 0.693067(\text{Log } D^2H)$	0.9813
มวลชีวภาพของใบไม้	$\text{Log } W_l = -0.989968 + 0.548757(\text{Log } D^2H)$	0.9069
มวลชีวภาพของรากค้ำยัน	$\text{Log } W_{pr} = -0.822479 + 0.684073(\text{Log } D^2H)$	0.9407

ที่มา : สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2559)

ตาราง 3 สมการแอลโลเมตรีของพรรณไม้ป่าชายเลนฝั่งอันดามัน

พันธุ์ไม้	สมการ	R ²
แสมทะเล		
มวลชีวภาพของลำต้น	$\text{Log } W_s = -1.267919 + 0.897218 (\text{Log } D^2H)$	0.9939
มวลชีวภาพของกิ่งไม้	$\text{Log } W_b = -2.712308 + 1.242563 (\text{Log } D^2H)$	0.8939
มวลชีวภาพของใบไม้	$\text{Log } W_l = -2.317307 + 0.844606 (\text{Log } D^2H)$	0.8496

ที่มา : สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2559)

โดยกำหนดให้ W_s = มวลชีวภาพของลำต้น (กก.)

W_b = มวลชีวภาพของกิ่งไม้ (กก.)

W_l = มวลชีวภาพของใบไม้ (กก.)

W_{pr} = มวลชีวภาพของรากค้ำยัน (กก.)

DBH = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ที่ระดับความสูง
เพียงอก หรือ 1.30 เมตรเหนือพื้นดิน) หรือในกรณี
ของโกงกางใบใหญ่คือ 0.2 เมตรเหนือคอราก (ซม.)

H = ความสูงเรือนยอด (เมตร)

3. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอน

ค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพรรณไม้ป่าชายเลนแยกรายชนิด
คำนวณจากตัวเลขค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ป่าชายเลนโดยปริมาณ
คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกใช้โดยกระบวนการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่ปกคลุมพื้นที่ป่า สามารถ
คำนวณออกมาในรูปของปริมาณน้ำหนักของธาตุคาร์บอนที่อยู่ในมวลชีวภาพ ดังนี้

$$\text{ปริมาณธาตุคาร์บอน} = \text{ปริมาณมวลชีวภาพของไม้} \times \text{conversion factor}$$

เมื่อ conversion factor = 47 (Bindu et al., 2020; วิจารย์ มีผล, 2553; สาทิศ
ดิลกสัมพันธ์ และ นรินทร จำวงษ์, 2563)

4. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ด้วยภาพถ่ายดาวเทียม

การศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของแปลงตัวอย่าง (ตัวแปรตาม) กับ ดัชนีพืชพรรณทั้งสองชนิดได้แก่ NDVI และ VARI ที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมในตำแหน่งพิกัดแปลงตัวอย่างเดียวกันด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดียว (linear regression) (Situmorang et al., 2016; สุรเชษฐ์ สีแดง, 2551) ดังสมการ

$$Y = a + b(x)$$

เมื่อ Y = ค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม

X = ค่าดัชนีพืชพรรณ (VI)

a = ค่าที่เส้นสมการถดถอยตัดแกน y

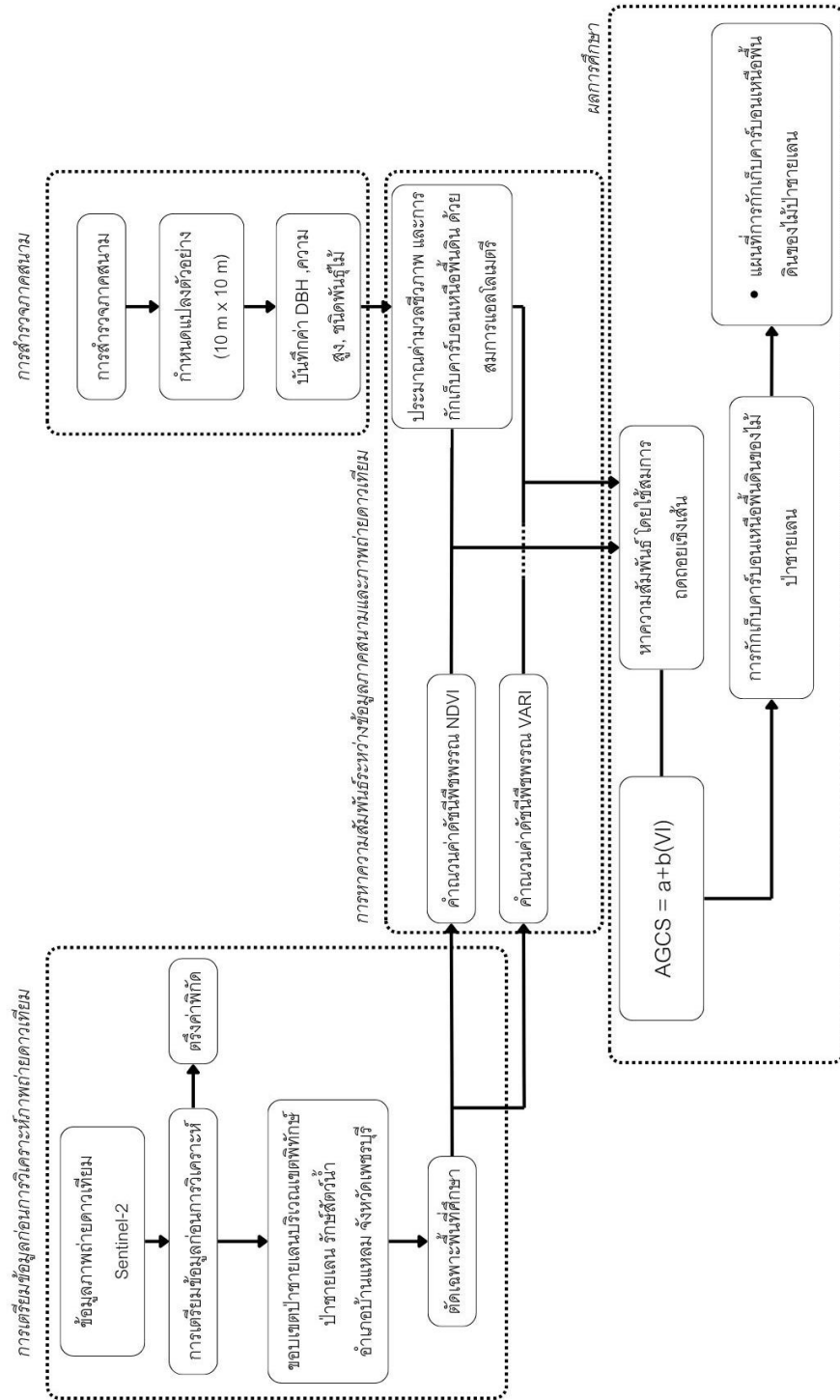
b = ค่าความลาดชันของเส้นการถดถอย หรือ สัมประสิทธิ์ของการถดถอย

5. การจัดทำแผนที่

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณที่ได้จากดาวเทียมไปทำการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอน กับ ดัชนีพืชพรรณทั้งสองชนิด จากนั้นจึงจัดทำแผนที่ด้วยโปรแกรม Arcgis pro

6. สรุปและอภิปรายผล

สรุปและอภิปรายผลข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา



ภาพประกอบ 11 กระบวนการวิจัย

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่น โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ 2 ชนิด ได้แก่ NDVI และ VARI และทำการเปรียบเทียบการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่น โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI ผลการศึกษาแบ่งได้ดังนี้

1. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรีด้วยการสำรวจภาคสนาม
2. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่น โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ NDVI
3. การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่น โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ VARI

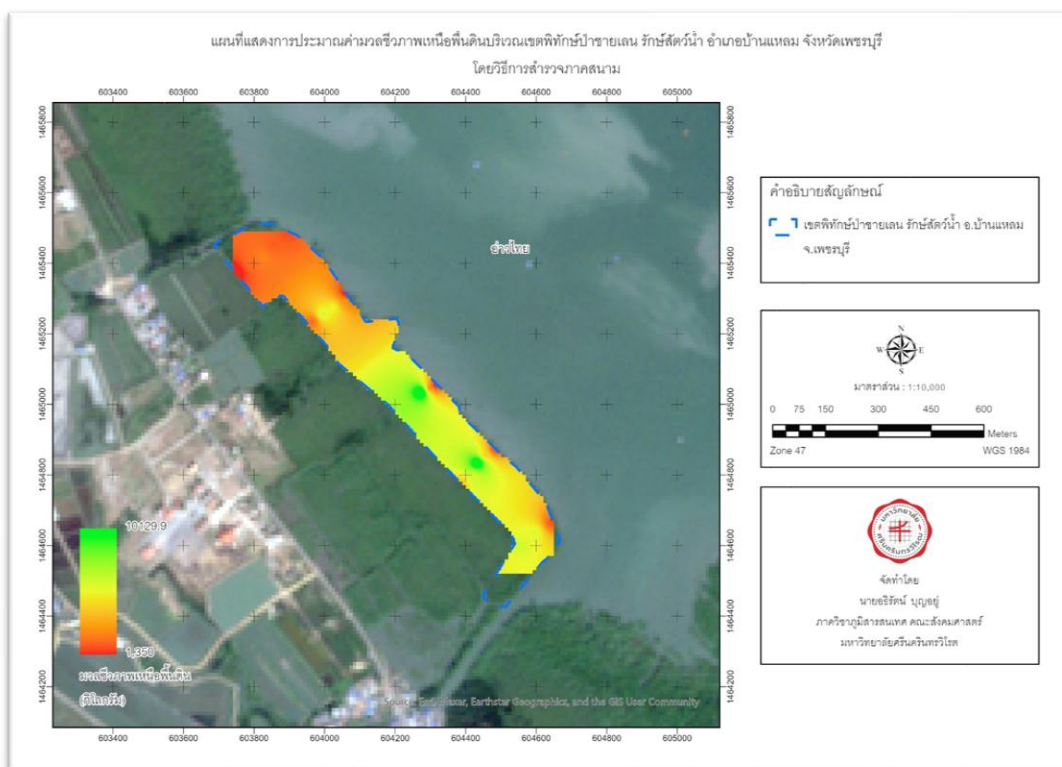
การสำรวจภาคสนามของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี

การศึกษาพื้นที่เขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี มีเนื้อที่ประมาณ 126 ไร่ จากการเก็บข้อมูลภาคสนามโดยการวางแปลงตัวอย่าง จำนวน 25 แปลง ขนาด 10 × 10 เมตร พบว่ามีพันธุ์ไม้เด่น คือ แสมทะเลจำนวน 246 ต้น และโกงกางใบใหญ่ จำนวน 14 ต้นตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม โดยใช้สมการแอลโลเมตรี ที่เป็นสมการที่สร้างขึ้นสำหรับป่าชายเลนของประเทศไทยที่เป็นผลการศึกษาของสำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2559) พบว่า พื้นที่เขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรีมีมวลชีวภาพประมาณ 7,778 ตัน คิดเป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินประมาณ 3,863 ตันคาร์บอน คิดเป็น 30.65 ตันคาร์บอนต่อไร่ รายละเอียดตามตาราง 4 และภาพประกอบ 12 -13

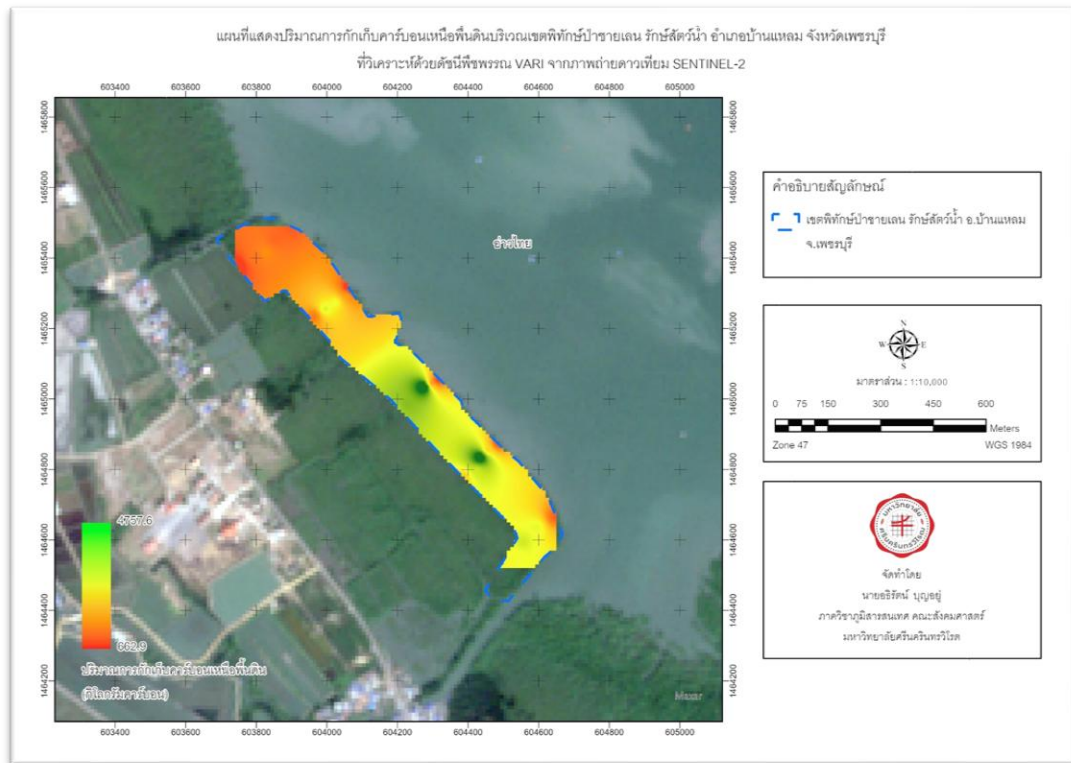
ตาราง 4 การประมาณค่ามลชีวภาพ และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยการสำรวจภาคสนาม

มลชีวภาพ (ตัน)	ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (ตันคาร์บอน)	ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (ตันคาร์บอนต่อไร่)
7,778	3,863	30.65



ภาพประกอบ 12 การประมาณค่ามลชีวภาพเหนือพื้นดินบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ตีร์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี โดยวิธีการสำรวจภาคสนาม

จากภาพประกอบ 12 แสดงการประมาณค่ามลชีวภาพโดยวิธีการสำรวจภาคสนามตามลำดับ ด้วยวิธีการประมาณค่าช่วง (Interpolation) โดยใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ Arc Pro ซึ่งในแผนที่จะใช้สีเขียวเข้มแทนพื้นที่ที่พบมลชีวภาพมากที่สุด สีเขียวอ่อนแทนพื้นที่ที่พบมลชีวภาพมาก สีเหลืองแทนพื้นที่ที่มลชีวภาพปานกลาง สีส้มแทนพื้นที่ที่มลชีวภาพน้อย และสีแดงแทนพื้นที่ที่มลชีวภาพน้อยที่สุด

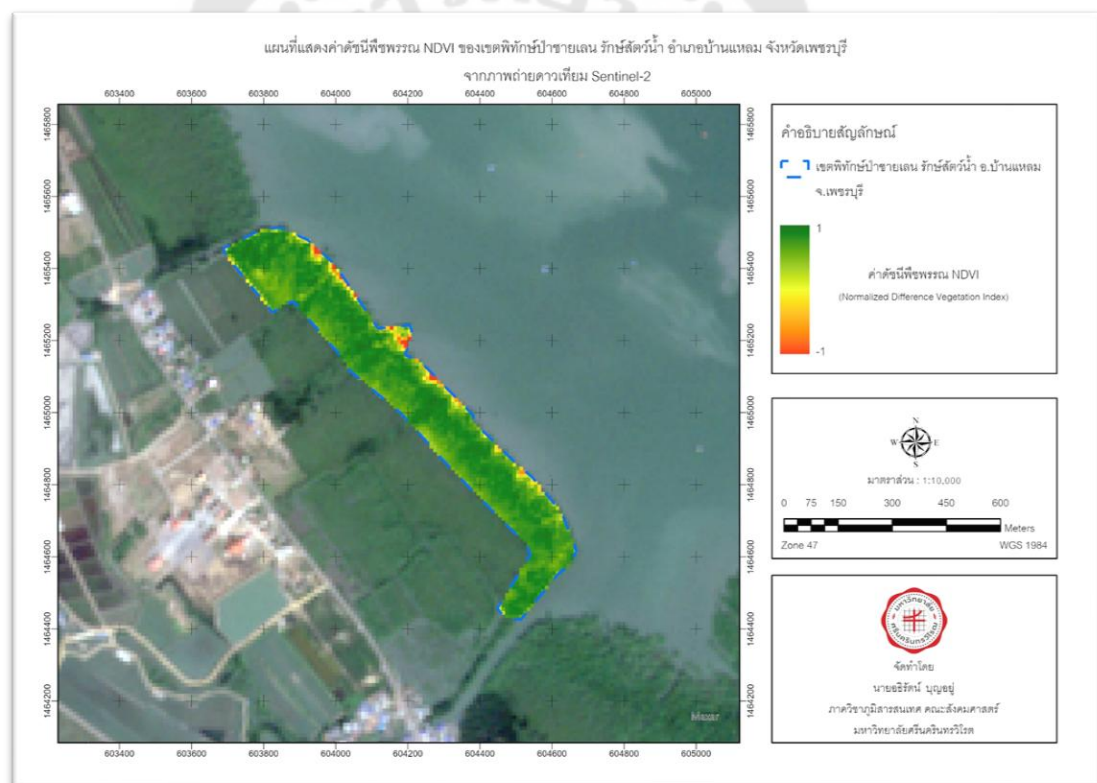


ภาพประกอบ 13 การประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินบริเวณเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี โดยวิธีการสำรวจภาคสนาม

จากภาพประกอบ 13 แสดงการประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินโดยวิธีการสำรวจภาคสนามตามลำดับ ด้วยวิธีการประมาณค่าช่วง (Interpolation) โดยใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ Arc Pro ซึ่งในแผนที่จะใช้สีเขียวเข้มแทนพื้นที่ที่พบปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมากที่สุด สีเขียวอ่อนแทนพื้นที่ที่พบปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมาก สีเหลืองแทนพื้นที่ที่พบปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินปานกลาง สีส้มแทนพื้นที่ที่พบปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินน้อย และสีแดงแทนพื้นที่ที่พบปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินน้อยที่สุด

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนในพื้นที่ศึกษา จากภาพถ่ายดาวเทียม sentinel-2 โดยในการศึกษาค้างนี้เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดพิกเซล (Pixel) ของภาพถ่ายดาวเทียมซึ่งมีขนาด 10×10 เมตร จึงใช้วิธีการกำหนดแปลงตัวอย่างขนาด 10×10 เมตร ได้พื้นที่ขนาด 100 ตารางเมตร ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้งหมด ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนในพื้นที่ศึกษาจากภาพถ่ายดาวเทียม โดยการนำค่าการสะท้อนของวัตถุบนผิวโลกมาหาค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่ตำแหน่งเดียวกันกับแปลงตัวอย่าง แล้วนำค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน และสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์



ภาพประกอบ 14 ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ถรณ์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

จากการศึกษาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน ที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามคำนวณด้วยสมการแอลโลเมตรี และค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่ได้จากดาวเทียม Sentinel-2 รายละเอียดปรากฏตามตาราง 5

ตาราง 5 การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนที่คำนวณได้จากสมการแอลโลเมตรีตามตำแหน่งแปลงตัวอย่าง และค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

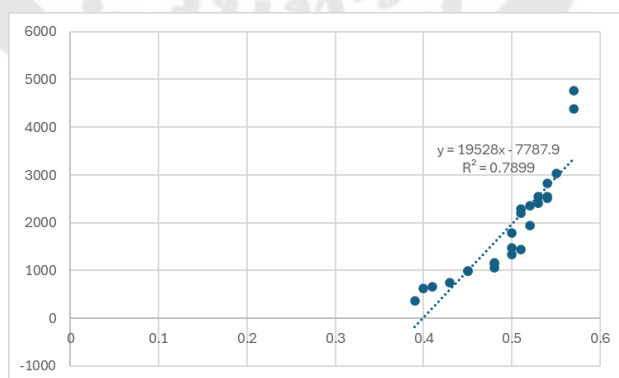
แปลงที่	ตำแหน่งพิกัดแปลง (UTM)		ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (กิโลกรัมคาร์บอน)	ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI
	ตะวันออก	เหนือ		
1	604496	1464525	2205.2	0.51
2	604535	1464555	2281.72	0.51
3	604554	1464595	2554.41	0.54
4	604595	1464636	2414.65	0.53
5	604645	1464665	988.49	0.45
6	604425	1464795	2542.06	0.53
7	604455	1464855	1946.36	0.52
8	604435	1464835	4385.26	0.57
9	604386	1464775	1786.49	0.50
10	604485	1464875	750.86	0.43
11	604203	1464974	2824.08	0.54
12	604025	1465274	2357.15	0.52
13	604276	1465035	4762.56	0.57
14	604296	1465045	1444.43	0.51
15	604315	1465055	663.99	0.41
16	603965	1465235	1139.83	0.48
17	603995	1465255	2518.9	0.54
18	604227	1464984	3038.54	0.55
19	604055	1465295	1481.26	0.50
20	604065	1465315	375.05	0.39

ตาราง 5 (ต่อ)

แปลงที่	ตำแหน่งพิกัดแปลง (UTM)		ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (กิโลกรัมคาร์บอน)	ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI
	ตะวันออก	เหนือ		
21	603745	1465375	634.48	0.40
22	603795	1465405	1171.88	0.48
23	603825	1465415	1332.73	0.50
24	603854	1465455	1060.02	0.48
25	603895	1465485	983.1	0.45

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 จากตาราง 5 มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการแอลโดเมตรีจากรายการ 5 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยเส้นตรง (Linear Regression Analysis) โดยกำหนดให้ค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เป็นตัวแปรตาม (y) และค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI เป็นตัวแปรอิสระ (x) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูล ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 Scatter Plot และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

จากภาพประกอบ 15 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน ของพื้นที่ศึกษา จากผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเส้นตรง พบว่า ทั้งสองตัวแปรมีความสัมพันธ์ที่เป็นบวก หมายความว่าเมื่อดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่เป็นตัวแปรอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินซึ่งเป็นตัวแปรตามจะเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน แสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 สมการความสัมพันธ์ที่ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS)

ตัวแปรอิสระ (x)	ตัวแปรตาม (y)	สมการความสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R^2)
NDVI	AGCS	$y = 19528x - 7787.9$	$R^2 = 0.7899$

การหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) โดยกำหนดให้ ดัชนีพืชพรรณ NDVI เป็นตัวแปรอิสระ (x) และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนเป็นตัวแปรตาม (y) ในรูปแบบสมการถดถอยเส้นตรง มีรูปแบบสมการคือ $y = 19528x - 7787.9$ มีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R^2) = 0.7899 นำดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) มาคำนวณความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาค่าความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการความสัมพันธ์ที่ได้ โดยตั้งสมมติฐานอย่างง่ายจากตัวทดสอบสถิติแบบ F ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ดังต่อไปนี้

$H_0 : \beta_1 = 0$ คือ AGCS (y) ไม่มีความสัมพันธ์กับ NDVI (x) ในรูปแบบสมการเส้นตรง

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ คือ AGCS (y) มีความสัมพันธ์กับ NDVI (x) ในรูปแบบสมการเส้นตรง ผลการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยตัวทดสอบสถิติแบบ F ได้ผลดังตาราง 7 โดยให้ค่าตัวทดสอบสถิติ $F = 86.48$ หมายความว่า มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) มีช่วงค่าวิกฤติ $CR \geq 0.05 (1,23) = 4.28$ ซึ่งค่า F จากการทดสอบมีค่าทางสถิติมากกว่าค่าในช่วงวิกฤติ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0

และยอมรับสมมติฐาน H1 หมายความว่าดัชนีพืชพรรณ NDVI (x) สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) (y) ได้

ตาราง 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS)

Source of Variation	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression	1	23252576.85	23252576.85	86.48
Residual	23	6183915.029	268865.8708	
Total	24	29436491.88		

$$F_{0.05}(1,23) = 4.28$$

2. การประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

การประมาณค่าการปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) ของพื้นที่ศึกษาด้วยภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 โดยนำสมการเส้นตรงที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ดังนี้

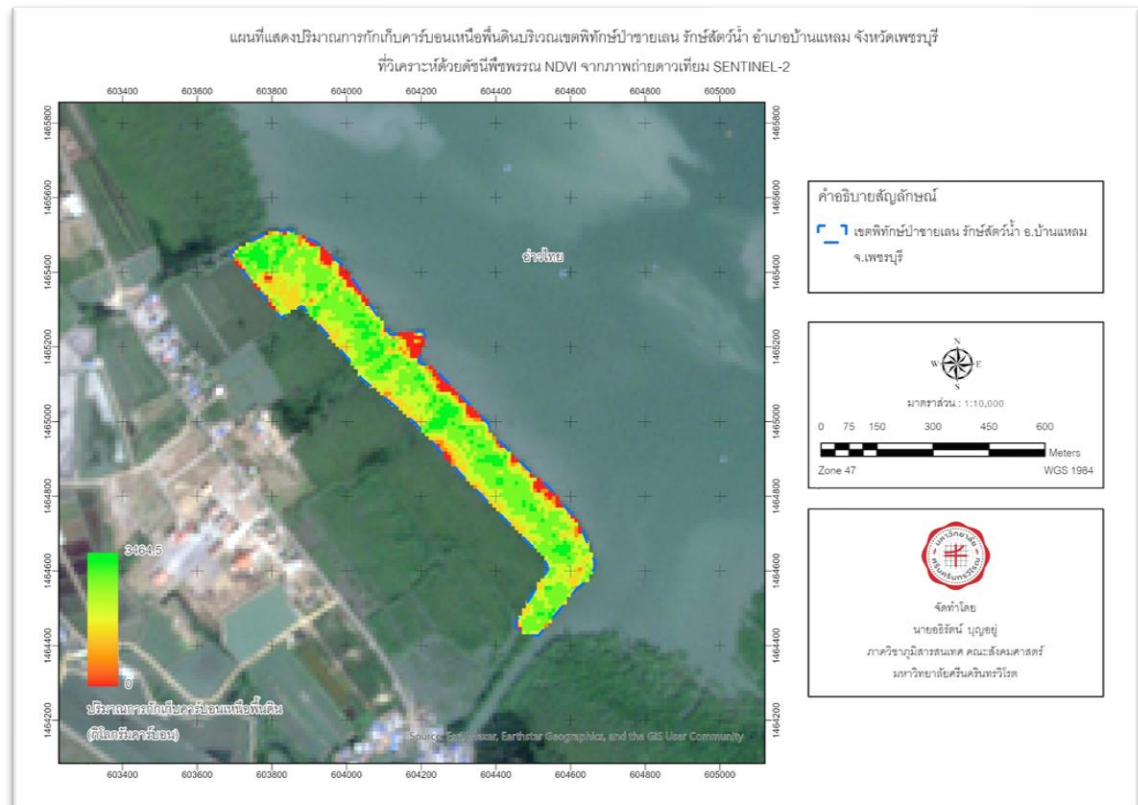
$$y = 19528x - 7787.9 \quad R^2 = 0.7899$$

เมื่อกำหนดให้ x คือ ดัชนีพืชพรรณ NDVI ที่ได้จาก ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

Y คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) (กิโลกรัมคาร์บอน)

เมื่อแทนค่าในสมการพบว่าพื้นที่ศึกษามีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) ทั้งหมดประมาณ 3,394,354 กิโลกรัมคาร์บอน หรือ 3,394 ตันคาร์บอน คิดเป็น 26.95 ตันคาร์บอนต่อไร่

3. แผนที่แสดงปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ที่วิเคราะห์ด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2



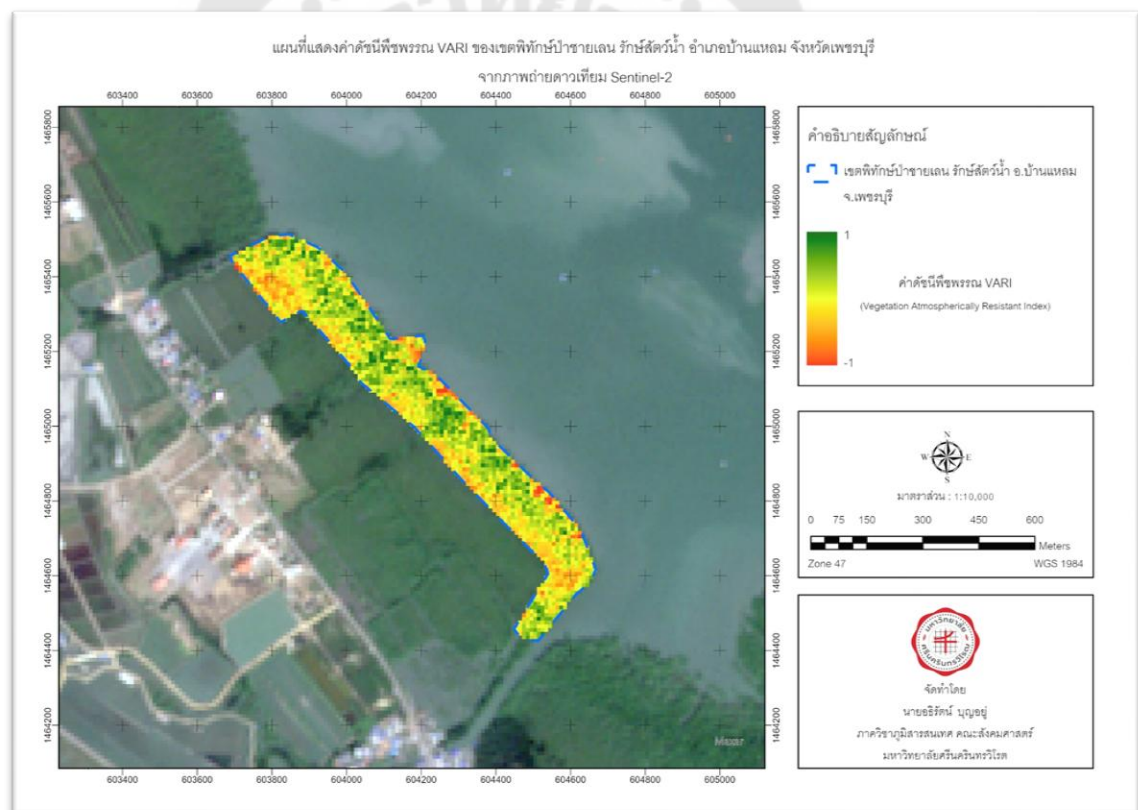
ภาพประกอบ 16 ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ที่วิเคราะห์ด้วยดัชนีพืชพรรณ NDVI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

การจัดทำแผนที่แสดงปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) ในเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ ด้วยภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 โดยการนำภาพถ่ายดาวเทียมที่แสดงค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ของพื้นที่อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ไปวิเคราะห์ร่วมกับสมการเส้นตรงที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) โดยใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ Arc Pro ซึ่งในแผนที่จะใช้สีเขียวเข้มแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมากที่สุด สีเขียวอ่อนแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมาก สีเหลืองแทนพื้นที่ที่พบ

การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินปานกลาง สีส้มแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินน้อย และสีแดงแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินน้อยที่สุด ผลปรากฏดังภาพประกอบ 16

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนในพื้นที่ศึกษา จากภาพถ่ายดาวเทียม โดยการนำค่าการสะท้อนของวัตถุบนผิวโลกมาหาค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ที่ตำแหน่งเดียวกันกับแปลงตัวอย่าง แล้วนำค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน และสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์



ภาพประกอบ 17 ค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชสีดร์วน้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

จากการศึกษาพบว่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน ที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามคำนวณด้วยสมการแอลโลเมตรี และค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ที่ได้จากดาวเทียม Sentinel-2 รายละเอียดปรากฏตามตาราง 8

ตาราง 8 ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการแอลโลเมตรีตามตำแหน่งแปลงตัวอย่าง และค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

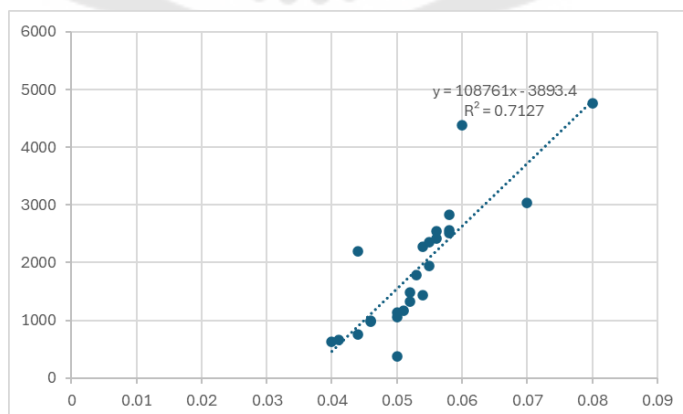
แปลงที่	ตำแหน่งพิกัดแปลง (UTM)		ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (กิโลกรัมคาร์บอน)	ค่าดัชนีพืชพรรณ VARI
	ตะวันออก	เหนือ		
1	604496	1464525	2205.2	0.044
2	604535	1464555	2281.72	0.054
3	604554	1464595	2554.41	0.058
4	604595	1464636	2414.65	0.056
5	604645	1464665	988.49	0.046
6	604425	1464795	2542.06	0.056
7	604455	1464855	1946.36	0.055
8	604435	1464835	4385.26	0.060
9	604386	1464775	1786.49	0.053
10	604485	1464875	750.86	0.044
11	604203	1464974	2824.08	0.058
12	604025	1465274	2357.15	0.055
13	604276	1465035	4762.56	0.080
14	604296	1465045	1444.43	0.054
15	604315	1465055	663.99	0.041
16	603965	1465235	1139.83	0.050
17	603995	1465255	2518.9	0.058
18	604227	1464984	3038.54	0.070
19	604055	1465295	1481.26	0.052
20	604065	1465315	375.05	0.050

ตาราง 8 (ต่อ)

แปลงที่	ตำแหน่งพิกัดแปลง (UTM)		ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (กิโลกรัมคาร์บอน)	ค่าดัชนีพืชพรรณ VARI
	ตะวันออก	เหนือ		
21	603745	1465375	634.48	0.040
22	603795	1465405	1171.88	0.051
23	603825	1465415	1332.73	0.052
24	603854	1465455	1060.02	0.050
25	603895	1465485	983.1	0.046

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพืชพรรณ VARI กับ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน

ค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 จากตาราง 8 มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่คำนวณได้จากสมการแอลโลเมตรีจากตาราง 8 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยเส้นตรง (Linear Regression Analysis) โดยกำหนดให้ค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน เป็นตัวแปรตาม (y) และค่าดัชนีพืชพรรณ VARI เป็นตัวแปรอิสระ (x) เพื่อดูความสัมพันธ์กันของข้อมูล ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 Scatter Plot และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI (x) และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (y)

จากภาพประกอบ 18 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน ของพื้นที่ศึกษา จากผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเส้นตรง แสดงให้เห็นว่า ทั้งสองตัวแปรมีความสัมพันธ์ที่เป็นบวก หมายความว่าเมื่อดัชนีพืชพรรณ VARI ที่เป็นตัวแปรอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินซึ่งเป็นตัวแปรตามจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน แสดงดังตาราง 9

ตาราง 9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS)

ตัวแปรอิสระ (x)	ตัวแปรตาม (y)	สมการความสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R^2)
VARI	AGCS	$y = 108761x - 3893.4$	$R^2 = 0.7127$

การหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) โดยกำหนดให้ ดัชนีพืชพรรณ VARI เป็นตัวแปรอิสระ (x) และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินเป็นตัวแปรตาม (y) ในรูปแบบสมการถดถอยเส้นตรง มีรูปแบบสมการคือ $y = 108761x - 3893.4$ มีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R^2) = 0.7127 นำดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) มาคำนวณความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาค่าความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการความสัมพันธ์ที่ได้ โดยตั้งสมมติฐานอย่างง่ายจากตัวทดสอบสถิติแบบ F ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ดังต่อไปนี้

$H_0 : \beta_1 = 0$ คือ AGCS (y) ไม่มีความสัมพันธ์กับ VARI (x) ในรูปแบบสมการเส้นตรง

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ คือ AGCS (y) มีความสัมพันธ์กับ VARI (x) ในรูปแบบสมการเส้นตรง ผลการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยตัวทดสอบสถิติแบบ F ได้ผลดังตาราง 10 โดยให้ค่าตัวทดสอบสถิติ $F = 57.04$ หมายความว่า มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) มีช่วงค่าวิกฤติ $CR \geq 0.05$ (1,23) = 4.28 ซึ่งค่า F จากการทดสอบมีค่าทางสถิติมากกว่าค่าในช่วงวิกฤติ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 หมายความว่าดัชนีพืชพรรณ VARI (x) สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) (y) ได้

ตาราง 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS)

Source of Variation	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression	1	20977964.39	20977964.39	57.04
Residual	23	8458527.484	367762.0645	
Total	24	29436491.88		

2. การประมาณค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ด้วยดัชนีพืชพรรณ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

การประมาณค่าการปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) ของพื้นที่ศึกษาด้วยภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 โดยนำสมการเส้นตรงที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ดังนี้

$$y = 108761x - 3893.4 \quad R^2 = 0.7127$$

เมื่อกำหนดให้ x คือ ดัชนีพืชพรรณ VARI ที่ได้จาก ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

Y คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน

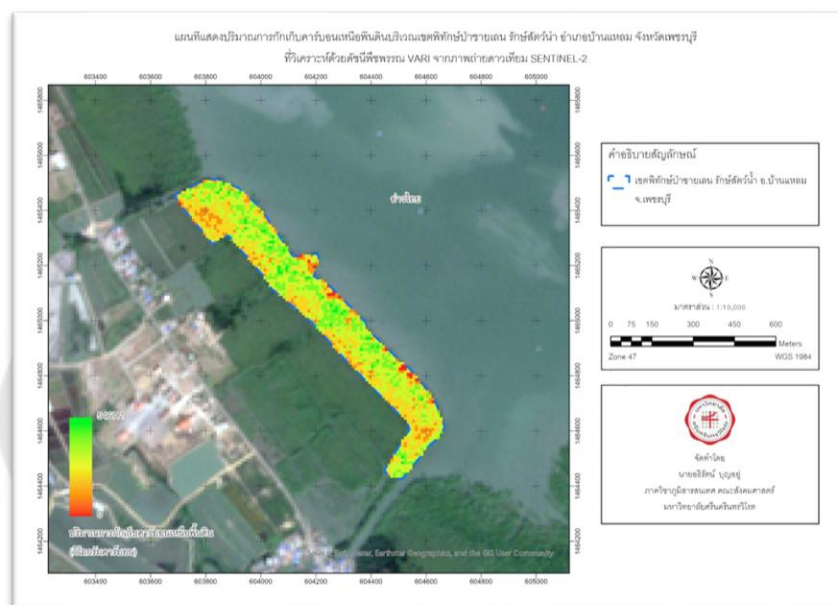
เมื่อแทนค่าในสมการพบว่าพื้นที่ศึกษามีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) ประมาณ 4,815,856 กิโลกรัมคาร์บอน หรือ 4,815 ตันคาร์บอน คิดเป็น 38.21 ตันคาร์บอนต่อไร่

3. แผนที่แสดงปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ที่วิเคราะห์ด้วยดัชนีพืชพรรณ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

การจัดทำแผนที่แสดงปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) ในเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ ด้วยภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 โดยการนำภาพถ่ายดาวเทียมที่แสดงค่าดัชนีพืชพรรณ VARI ของพื้นที่อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ไปวิเคราะห์ร่วมกับสมการเส้นตรงที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ VARI และ

ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน (AGCS) โดยใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ Arc Pro ซึ่งในแผนที่จะใช้สีเขียวเข้มแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมากที่สุด สีเขียวอ่อนแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมากที่สุด สีเหลืองแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินปานกลาง สีส้มแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินน้อย และสีแดงแทนพื้นที่ที่พบการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินน้อยที่สุดผลปรากฏดังภาพประกอบ

19



ภาพประกอบ 19 การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน ราษฎร์ศัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ด้วยดัชนีพืชพรรณ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI

การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของป่าชายเลนเปรียบเทียบกับจากการสำรวจภาคสนาม เปรียบเทียบกับการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) ของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ของเขตพิทักษ์ป่าชายเลน ราษฎร์ศัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี แสดงดังตาราง 11

ตาราง 11 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแบบหลายช่วงคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI

วิธีการวิเคราะห์	AGCS (ตันคาร์บอน)	ผลต่าง (%)
ข้อมูลภาคสนาม	3,863	-
NDVI	3,394	12.04
VARI	4,815	24.64

จากตาราง 11 พบว่าการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาคสนาม และจากสมการความสัมพันธ์ของการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนกับดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 มีค่าเท่ากับ 3,863 , 3,394 และ 4,815 ตันคาร์บอน หรือ 30.65 , 26.95 และ 38.21 ตันคาร์บอนต่อไร่ตามลำดับ ซึ่งมีผลต่างระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่วิเคราะห์จากข้อมูลภาคสนามกับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่วิเคราะห์จากสมการความสัมพันธ์ของการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนกับดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 อยู่ที่ 12.14% และ 24.64% ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามนั้นใช้ข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) และความสูงเรือนยอด (H) จริงทำให้แม่นยำและสะท้อนลักษณะของพันธุ์ไม้ได้ดี แต่ดัชนีพืชพรรณทั้ง 2 ชนิดนั้นใช้ค่าค่าการสะท้อนแสงของวัตถุจากภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งเป็นค่าประมาณทั่วทั้งพิกเซลขนาด 10 เมตร × 10 เมตร และอาจไม่สามารถเป็นตัวแทนความแตกต่างภายในพื้นที่ย่อยได้ชัดเจนรวมทั้งชนิดของดัชนีและช่วงคลื่นที่ตอบสนองต่อปัจจัยที่ต่างกัน

บทที่ 5

สรุป และอภิปรายผลการศึกษา

จากการศึกษาการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลน บริเวณพื้นที่ศึกษาเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ด้วยกระบวนการสำรวจภาคสนาม และการประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ พร้อมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 กับค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

ในพื้นที่เขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี มีพรรณไม้ป่าชายเลนที่เป็นพันธุ์ไม้เด่นได้แก่ แสมทะเล และโกงกางใบใหญ่ มีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 24.11 เซนติเมตร และมีความสูงเฉลี่ย 12.04 เมตร คำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินได้ 3,863 ตันคาร์บอน คิดเป็น 30.65 ตันคาร์บอนต่อไร่ และจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI และ VARI ที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (AGCS) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยเส้นตรง (Linear Regression Analysis) ได้สมการความสัมพันธ์ $AGCS = 19528(NDVI) - 7787.9$ ($R^2 = 0.7899$) และ $AGCS = 108761(VARI) - 3893.4$ ($R^2 = 0.7111$) และเมื่อคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินที่วิเคราะห์ได้จาก NDVI และ VARI มีค่าเท่ากับ 26.95 ตันคาร์บอนต่อไร่ 38.21 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า NDVI เป็นดัชนีที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ประเมินคาร์บอนเหนือดินในป่าชายเลนซึ่งมีความเชื่อมั่นที่ R^2 0.79 เมื่อเทียบกับ VARI ซึ่งมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 0.71 โดย NDVI ให้ความแม่นยำและสอดคล้องกับค่าภาคสนามมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม VARI ก็สามารถเป็นทางเลือกที่มีประโยชน์โดยเฉพาะในบริบทของการใช้ข้อมูลจากโดรนหรือกล้อง RGB

อภิปรายผล

ในการศึกษานี้ มวลชีวภาพเหนือดิน (Above-Ground Biomass) ของป่าชายเลนในเขตพิทักษ์ป่าชายเลน รัชส์ัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ได้รับการประเมินผ่านการใช้สมการแอลโลเมตรีที่พัฒนาโดยสำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน (2559) โดยใช้ข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางอก (DBH) และความสูงของพันธุ์ไม้หลัก ซึ่งได้แก่ แสมทะเล และโกงกางใบใหญ่ ซึ่งเป็นไม้ชายเลนที่มีการเจริญเติบโตดีและมีความหนาแน่นของเนื้อไม้สูง

จากการศึกษาลักษณะทางพื้นที่และตำแหน่งเชิงพื้นที่ของแปลงตัวอย่าง มีความสัมพันธ์กับระดับการกักเก็บคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล ซึ่งมีผลต่อชนิดพันธุ์ไม้ ความหนาแน่นของต้นไม้ และสมรรถภาพในการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละแปลง พื้นที่ที่อยู่ ลึกเข้ามาจากแนวชายฝั่ง (ชั้นใน) มักมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกว่า ได้แก่ ความเค็มเจือจางมากขึ้น ความนิ่งของระดับน้ำ ดินลึก และมีการสะสมอินทรีย์วัตถุสูง ส่งผลให้พันธุ์ไม้ชายเลนสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่า พื้นที่เหล่านี้มักพบต้นโกงกางใบใหญ่หรือแสมทะเลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นมาก และสูงกว่า ทำให้มวลชีวภาพเหนือดินรวมถึงปริมาณคาร์บอนที่สะสมอยู่ในเนื้อไม้มีค่าสูงขึ้นในทางตรงกันข้าม พื้นที่ที่อยู่ ใกล้ชายฝั่ง (ชั้นนอก) มักถูกกระทบจากคลื่นลม ความเค็มสูง และการทับถมของตะกอนที่เปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง ทำให้พันธุ์ไม้มีขนาดเล็ก เจริญเติบโตช้า และมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้มีการกักเก็บคาร์บอนในระดับต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Alongi (2002) และ Akira et al. (2008) ที่ระบุว่า zonation หรือชั้นของป่าชายเลนตามระยะจากทะเล มีผลต่อขนาดต้นไม้และความสามารถในการสะสมคาร์บอน ทั้งในส่วนเหนือดินและใต้ดิน

นอกจากนี้มวลชีวภาพทั้งหมดของพื้นที่ศึกษาอยู่ในระดับที่สอดคล้องกับระดับความสมบูรณ์ของป่าธรรมชาติชายฝั่ง โดยเฉพาะในแปลงที่มีต้นไม้หนาแน่นและมีอายุมากจะให้ค่ามวลชีวภาพสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งมวลชีวภาพมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณคาร์บอนที่สะสมในเนื้อไม้ เนื่องจากโดยทั่วไป ปริมาณคาร์บอนเหนือดินจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 45-50% ของมวลชีวภาพ (สนธิ อักษรแก้ว, 2541)

การประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนในเขตพิทักษ์ป่าชายเลนรักษ์สัตว์น้ำ อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.65 ตันคาร์บอนต่อไร่ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้า เช่น งานของ วิจารณ์ มีผล (2553) ที่รายงานค่าเฉลี่ยเพียง 9.26 ตันคาร์บอนต่อไร่ ในพื้นที่ป่าชายเลนจังหวัดระนอง และยังต่ำกว่างานของ Dung et al. (2016) ในประเทศเวียดนามที่รายงานค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนสูงถึง 41.5 ตันคาร์บอนต่อไร่ ในพื้นที่ป่าชายเลนพื้นที่ฟู อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน ได้แก่ ชนิดพันธุ์ไม้ ลักษณะพื้นที่ อายุของพืช และกระบวนการฟื้นฟูหรือการรบกวนจากมนุษย์

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาคั้งนี้กับการศึกษาของวีระ ปะทะชินัง (2557) ที่ศึกษาการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพรรณไม้ในสวนสาธารณะ 3 แห่งในกรุงเทพมหานคร ได้แก่ สวนลุมพินี สวนเบญจกิติ และสวนวชิรเบญจทัศด้วยการสำรวจภาคสนามร่วมกับการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชติ พบว่าพื้นที่ป่าชายเลนในเขตพิทักษ์

ป่าชายเลน รัชส์สัตว์น้ำ จังหวัดเพชรบุรี มีปริมาณคาร์บอนเหนือดินเฉลี่ยอยู่ที่ 30.65 ตันต่อไร่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคาร์บอนเหนือพื้นดินเฉลี่ยของสวนวชิรเบญจทัศ ซึ่งมีขนาด 375 ไร่ และสามารถกักเก็บคาร์บอนเหนือดินรวมได้ 1,068.83 ตันคาร์บอน จะได้ค่าเฉลี่ยเพียง 2.85 ตันต่อไร่ เท่านั้นผลการเปรียบเทียบดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ป่าชายเลนมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนมากกว่าสวนสาธารณะในเขตเมืองถึง 10 เท่าซึ่งอาจเป็นผลมาจากพันธุ์ไม้ที่มีการเจริญเติบโตแบบยืนต้นหนาแน่นมากกว่า สภาพแวดล้อมธรรมชาติที่เอื้อต่อการสะสมอินทรีย์วัตถุ และการสะสมชีวมวลต่อเนื่องตลอดทั้งปี

ผลการประเมินค่าคาร์บอนด้วยดัชนีพืชพรรณจากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ NDVI และ VARI พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพืชพรรณกับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนที่ได้จากภาคสนามอยู่ในระดับสูง โดย NDVI ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.7899 และ VARI ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.7111 ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถใช้ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนได้สอดคล้องกับงานของ Situmorang et al. (2016) ที่รายงานค่า R^2 เท่ากับ 0.728 จากการศึกษาในป่าชายเลนประเทศอินโดนีเซีย รวมถึงผลการศึกษาของศุภกานต์ ธิเตจ๊ะ และคนอื่น ๆ (2563) ที่กล่าวว่า NDVI มีความสัมพันธ์กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนสูงถึง R^2 เท่ากับ 0.96 ในพื้นที่ป่าฟื้นฟูจังหวัดตาก แม้ว่าค่าความสัมพันธ์ในการศึกษานี้จะต่ำกว่า แต่ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และแสดงให้เห็นว่า NDVI เป็นดัชนีที่สามารถใช้ประเมินความหนาแน่นของพืชพรรณและมวลชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพในบริบทต่าง ๆ

สำหรับ ดัชนี VARI (Vegetation Atmospherically Resistant Index) ซึ่งพัฒนาจากข้อมูลภาพถ่าย RGB ของ Sentinel-2 มีค่าความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนที่ได้จากการสำรวจภาคสนามในระดับดี โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.7111 ซึ่งแม้จะต่ำกว่า NDVI ($R^2 = 0.7899$) แต่ยังคงถือว่าอยู่ในระดับที่สามารถใช้ในการประเมินความเขียวและชีวมวลของพืชพรรณได้อย่างเหมาะสม VARI มีจุดเด่นคือ สามารถใช้กับข้อมูลจากกล้อง RGB ทั่วไป โดยไม่จำเป็นต้องใช้แถบคลื่น NIR เหมือน NDVI ทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานกับภาพจากโดรน กล้องมือถือ หรือดาวเทียมที่ไม่มีข้อมูลใกล้อินฟราเรด อีกทั้งยังมีความต้านทานต่อผลกระทบจากบรรยากาศ เช่น หมอก ควัน หรือฝุ่น (กิตติศักดิ์ เรืองระโทก, 2560) อย่างไรก็ตาม VARI มีข้อจำกัดเมื่อใช้ในพื้นที่ที่มีหลังคาเรือนยอดหนาแน่น เช่น ป่าชายเลนที่เจริญเต็มที่ เนื่องจากค่าความเขียวจะอิ่มตัวและไม่สามารถแยกความแตกต่างของมวลชีวภาพได้ชัดเจนเท่ากับดัชนีที่ใช้ NIR เช่น NDVI หรือ EVI นอกจากนี้ VARI ยังมีความไวต่อเงา ความชื้น และสภาพผิวดิน เช่น น้ำหรือดินเปียก ซึ่งอาจรบกวนค่า Reflectance และส่งผลให้ค่าคาร์บอนที่ประเมินได้มีแนวโน้มคลาดเคลื่อน

งานวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel-2 ร่วมกับดัชนีพืชพรรณ NDVI มีความเหมาะสมในการประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมากกว่า VARI เนื่องจากสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงการวิเคราะห์จากข้อมูลจากภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตาม หากในกรณีที่ไม่มีข้อมูลในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (NIR) ดัชนีพืชพรรณก็ยังสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการนำเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลมาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินมีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนในระบบนิเวศป่าชายเลนระดับภูมิภาคได้ ทั้งยังช่วยลดภาระในการลงพื้นที่ สำรวจภาคสนาม และสนับสนุนแนวทางการจัดการทรัพยากรธรรมชาติในบริบทของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาว

ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. จำนวนแปลงตัวอย่างภาคสนามมีจำกัด แม้ใช้สัดส่วน 1% ของพื้นที่ทั้งหมด แต่จำนวนแปลงเพียง 25 แปลงอาจยังไม่เพียงพอต่อการแทนความแปรปรวนของพืชพรรณในพื้นที่ทั้งหมด
2. ช่วงเวลาของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมภาพถ่าย Sentinel-2 ที่นำมาใช้ประเมินอาจไม่ตรงกับช่วงเวลาของการสำรวจภาคสนามอย่างแม่นยำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าการสะท้อนแสง
3. งานวิจัยนี้ยังเน้นเฉพาะการประเมินคาร์บอนที่สะสมในมวลชีวภาพเหนือดิน โดยไม่ได้รวมคาร์บอนในดินหรือรากพืช
4. ในการเก็บข้อมูลภาคสนามยังไม่มีกรเก็บข้อมูลอายุของพืชพรรณทำให้บอกได้ในภาพรวมแต่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองที่ศึกษาเหมาะสมกับป่าชายเลนที่มีอายุเท่าไร

ข้อเสนอแนะ

1. หากต้องการวิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนในระดับประเทศควรมีการวางแผนสำรวจให้ครอบคลุมพรรณไม้ป่าชายเลนทุกชนิดจะทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ที่ครอบคลุม
2. ควรขยายพื้นที่ศึกษาไปยังป่าชายเลนที่มีระดับความสมบูรณ์ต่างกัน เช่น พื้นที่เสื่อมโทรม พื้นที่ฟื้นฟูใหม่ และพื้นที่ป่าชุมชน เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอน
3. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น อายุของต้นไม้ ความเค็มของดิน ธาตุในดิน เพื่อนำมาพัฒนาแบบจำลองการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

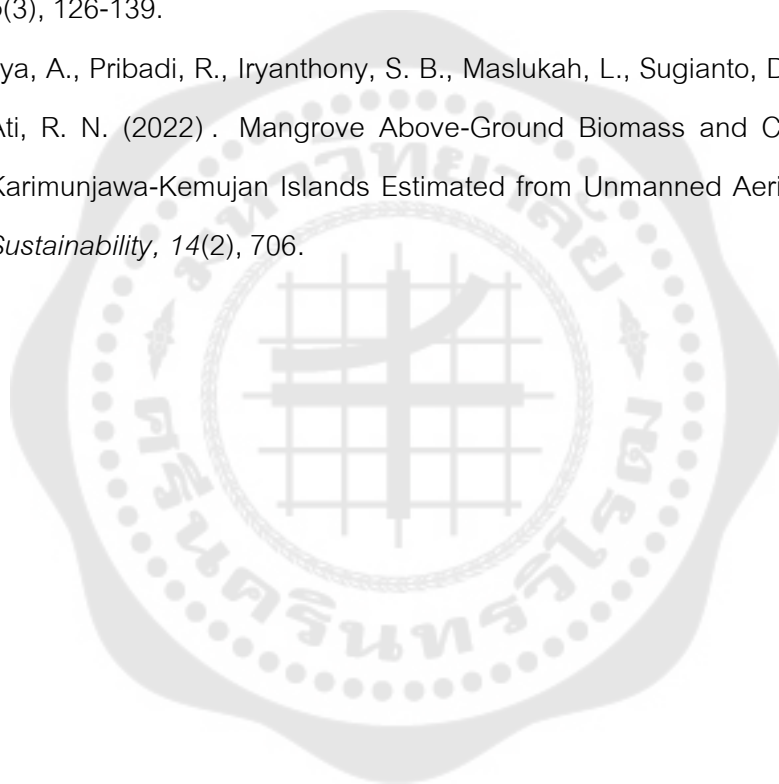
- กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. (2554). *ลดร้อน...ให้โลก ด้วยป่าชายเลน*. สืบค้นจาก <http://saveoursea.net/forums/showthread.php?p=24678>
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2566). *การประยุกต์ใช้ฐานข้อมูลการสำรวจระยะไกลจากซอฟต์แวร์รหัสเปิดและคลาวด์คอมพิวเตอร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน*. สืบค้นจาก <https://e-library.ldd.go.th/library/flip/bib10892f/bib10892f.html#p=32>
- กรีนพีซ ประเทศไทย. (2565). *การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ*. สืบค้นจาก <https://www.greenpeace.org/thailand/explore/protect/climate/climate-change/>
- กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน. (2563). *พันธุ์ไม้ป่าชายเลน*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน. (2564). *คู่มือความรู้เรื่องป่าชายเลน* (พิมพ์ครั้งที่ 7). กรุงเทพฯ: พลอย มีเดีย.
- กัญญ์สิริ จันทรเจริญ. (ม.ป.ป.). *การกำหนดประชากรและกลุ่มตัวอย่าง* [เอกสารประกอบการสอน]. ม.ป.ท.
- กิตติศักดิ์ เรืองกระโทก. (2560). *การประมาณค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าชายเลนโดยใช้การสำรวจระยะไกลแบบไฮเปอร์สเปกตรัล*. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา. (ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต).
- เจอร์รี โพลเลย์. (2538). *โลกร้อน: บทเรียนจากอนาคต* (จิฑูรย์ ปัญญากุล, ผู้แปล). กรุงเทพฯ: สถาบันชุมชนท้องถิ่นพัฒนา.
- ชิงชัย วิริยะบัญชา. (2546). *คู่มือการประมาณมวลชีวภาพของหมู่ไม้*. กรุงเทพฯ: วนวัฒนวิจัยและพฤกษศาสตร์ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- ชูเดช โลศิริ. (2564). *การปรับปรุงคุณภาพข้อมูลภาพจากดาวเทียม* [เอกสารประกอบการสอน]. กรุงเทพฯ: คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ทनुวงศ์ แสงเทียน, และ พูลศรี วันธงไชย. (2551). *ปริมาณคาร์บอนที่ถูกกักเก็บในสวนป่าไม้โกงกางใบใหญ่ที่ขึ้นอายุต่าง ๆ กัน*. トラด: ม.ป.พ.
- ทิวา โฉมพิมาน, กาญจนา นาคะภากร, อัจฉรา อัครจุฑิฑุฑชัย, สิริกร กาญจนสุนทร, และ สุเพชร จิระจรกุล. (2559). *การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนยางพาราโดยการ*

- ประยุกต์เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล กรณีศึกษา จังหวัดระยอง. *Thai Science and Technology Journal*, 914-926.
- ธนวุฒิ ทองมี, จตุรงค์ สมอาจ, และ วรวิทย์ จิตรสุखा. (2562). การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของพื้นที่ป่ามหาวิทยาลัยมหาสารคามด้วยข้อมูลจากการรับรู้ระยะไกล. *Journal of Science & Technology MSU*, 38(6).
- พชร อุปมัย. (2559). สมการแอลโลเมตรีสำหรับการตรวจติดตามมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นโกงกางใบใหญ่ที่ปลูกร่วมกับหัวเข้หรือรากัดเม็ด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี. (ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต).
- ภานุ เนื่องจำนงค์, กาญจนา นาคะภากร, และ สิริกร กาญจนสุนทร. (2558). การประเมินการสะสมคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนด้วยข้อมูลดาวเทียม WORLDVIEW-2 ในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี. *วารสารวิทยาลัยนครราชสีมา*, 2(1), 137-145.
- รุจน์ ยศธสาร, และ เพ็ญประภา เพชระบูรณิน. (2563). การศึกษาวิธีประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของต้นยางนาโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 20(4), 1-12.
- วิจารณ์ มีผล. (2553). การกักเก็บคาร์บอนของป่าชายเลน บริเวณพื้นที่สงวนชีวมณฑลระนอง. *วารสารการจัดการป่าไม้*, 4(7), 33-47.
- วิภารัตน์ อัมพะวัน. (2561). การศึกษาเทคนิคการประมาณสภาพกายภาพต้นยางพาราจากข้อมูลอากาศยานไร้คนขับ. มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก. (ปริญญาานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต).
- วีระ ปะทะซิ่นง. (2557). การประยุกต์ใช้ภูมิสารสนเทศเพื่อการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนสาธารณะ ในกรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ. (ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต).
- ศุภกานต์ ธิเตจ๊ะ, สุนทร คำยอง, อัมรินทร์ บุญตัน, อริศรา เจริญปัญญาเนตร, และ พันธุ์พล หัตถโกศล. (2563). การใช้ดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณประเมินปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของป่าปลูกในลุ่มน้ำแม่ดาวที่ทำเหมืองแร่สังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. *วารสารวิทยาศาสตร์ บุรพา*, 25(1), 51-63.
- สนธิ อักษรแก้ว. (2541). *ป่าชายเลน ... นิเวศวิทยาและการจัดการ* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน, และ รุ่งสุริยา บัวสาลี. (2554). *ป่าชายเลน : นิเวศวิทยาและพรรณไม้* กรุงเทพฯ: มูลนิธิกระต่ายในดวงจันทร์.

- สภาพิต ดิลกสัมพันธ์, และ นรินทร จำวงษ์. (2563). การประเมินการกักเก็บคาร์บอนในภาคป่าไม้ และ
โครงการ T-VER [เอกสารประกอบการสอน]. ม.ป.ท.
- สาวิตรี จันทรสิงห์. (2566). การประเมินผลผลิตกาแฟด้วยเทคนิคอากาศยานไร้คนขับ. จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. (ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต).
- สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), และ กรมทรัพยากรทาง
ทะเลและชายฝั่ง. (2563). โครงการจัดทำระบบฐานข้อมูลทรัพยากรป่าชายเลน โดยการ
จำแนกเขตการใช้ประโยชน์ที่ดินป่าชายเลน ด้วยภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูง
(ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563). กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง.
- สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), และ สมาคมสำรวจข้อมูล
ระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย. (2553). ตำราเทคโนโลยีอวกาศและ
ภูมิสารสนเทศศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน. (2556). คู่มือการสำรวจทรัพยากรป่าชายเลน. กรุงเทพฯ: ชุมนุม
สหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน. (2559). ความหลากหลายทางชีวภาพป่าชายเลนฝั่งอ่าวไทยและ
อันดามันตอนล่าง. กรุงเทพฯ: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- สุรเชษฐ์ ปิ่นแก้ว. (2558). การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินและดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าชาย
เลนโดยใช้การสำรวจระยะไกล: กรณีศึกษา อ่าวป่าคลอก จังหวัดภูเก็ต. มหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์, กรุงเทพฯ. (ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต).
- สุรเชษฐ์ สีแดง. (2551). การประมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของป่าชายเลนบริเวณเกาะล้าน
ตา จังหวัดกระบี่ ด้วยเทคนิคการรับรู้ระยะไกล. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
(ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต).
- สุรณี อิงคากุล. (2548). การวิเคราะห์ข้อมูลระยะไกล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- สุรีย์พร นิพัฏฐวิทยา. (2555). การประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม THEOS ในการศึกษาลักษณะ
พืชพรรณในป่าชายเลนในพื้นที่โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอัน
เนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี. กรุงเทพฯ:
ภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Akira, K., Jin, E. O., & Sasitorn, P. (2008) . Allometry, biomass, and productivity of
mangrove forests: A review. *Science Direct*, 89(2), 128-137.

- Alongi, D. M. (2002) . Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331-349.
- Bindu, G., Rajan, P., Jishnu, E. S., & Joseph, K. A. (2020). Carbon stock assessment of mangroves using remote sensing and geographic information system. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(1), 1-9.
- Dung, L. V., Tue, N. T., Nhuan, M. T., & Omori, K. (2016). Carbon storage in a restored mangrove forest in Can Gio Mangrove Forest Park, Mekong Delta, Vietnam. *Forest Ecology and Management*, 380, 31-40.
- European Space Agency. (2024). Sentinel-2. Retrieved from <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-2>
- Garmin. (n.d.). Handhelds & Wearables. Retrived from <https://www.garmin.com/en-US/c/outdoor-recreation/handheld-hiking-gps/>
- Harris Geospatial Solution. (2019). Broadband Greenness. Retrived from <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/broadbandgreenness.html>
- Hastuti, A. W., Suniada, K. I., & Islamy, F. (2017). Carbon stock estimation of mangrove vegetation using remote sensing in Perancak Estuary, Jembrana District, Bali. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 14(2), 137-150.
- Igeogers. (n.d.). Mangroves. Retrieved from <http://igeogers.weebly.com/coastal-ecosystems-conflicts-and-management.html>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015) . *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). New York: Wiley.
- MangroveWatch. (n.d.). Where do Mangroves grow? Retrived from <http://mangrovewatch.org.au/learn/>
- Muhsoni, F. F., Abida, I. W., Rini, D. A. S., & Putera, A. J. (2021). Estimation of mangrove carbon using drone images. *Depik*, 10(1), 41-46.
- Myeong, S., Nowak, D. J., & Duggin, M. J. (2006) . A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 101(2), 277-282.
- Nipithwittaya, S., & Bualert, S. (2012). Above ground carbon sequestration in mangrove

- forest filtration system. *Journal of Applied Sciences*, 12(15), 1537-1546.
- Novia, E. M., & Wilson, N. (2021). Estimation of Carbon Stock Using NDVI Vegetation Index in Secondary Forest of Gajabuih, West Sumatra. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PROGRESSIVE SCIENCES AND TECHNOLOGIES*, 28(1), 151-155.
- Situmorang, J. P., Sugianto, S., & Darusman, D. (2016). Estimation of Carbon Stock Stands using EVI and NDVI vegetation index in production forest of lembah Seulawah sub-district, Aceh Indonesia. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 5(3), 126-139.
- Wirasatriya, A., Pribadi, R., Iryanthony, S. B., Maslukah, L., Sugianto, D. N., Helmi, M., . . . Ati, R. N. (2022) . Mangrove Above-Ground Biomass and Carbon Stock in the Karimunjawa-Kemujan Islands Estimated from Unmanned Aerial Vehicle-Imagery. *Sustainability*, 14(2), 706.



ประวัติผู้เขียน

