



การปรับปรุงผลการศึกษาของการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อน 5 สายพันธุ์ โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัล:

กรณีศึกษาบริเวณแหลมตะลุมพุก ประเทศไทย

An Updated Results of Five Tropical Mangrove Species Classification

Using Recent PRISMA Hyperspectral Imagery :

A Case Study in Talumpuk Cape, Thailand

ศุภนิดา เมื่องกเสม¹, ชัยโชค ไวกาษา^{1*} และ กฤษญาณ อินทร์ตัน²

Supphanida Muangkasem¹, Chaichoke Vaiphasa^{1*} and Kritchayan Intarat²

¹ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

²สาขาวิชาภูมิศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประเทศไทย

¹Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

²Department of Geography, Faculty of Liberal Arts, Thammasat University, Thailand

Received : 11 May 2023

Revised : 23 August 2023

Accepted : 21 September 2023

บทคัดย่อ

การติดตามระบบนิเวศป่าชายเลนและความหลากหลายทางสายพันธุ์ภายใต้บัญชีแดงระบบนิเวศขององค์การระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (IUCN Red List of Ecosystems) เป็นสิ่งที่สำคัญ มีรายงานว่าป่าชายเลนจำนวน 11 จาก 70 สายพันธุ์อยู่ในภาวะเสี่ยงสูญพันธุ์ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมไฮเปอร์สเปกตรัลถูกนำมาใช้จำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน และให้ผลการจำแนกที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีแถบสเปกตรัมที่แคบจำนวนมากสามารถให้รายละเอียดการสะท้อนช่วงคลื่นของพันธุ์ไม้ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามพบปัญหาในชนิดโกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*, RM) และโกงกางใบเล็ก (*Rhizophora apiculata*, RA) ซึ่งลักษณะของใบมีความใกล้เคียงกันมากส่งผลให้เกิดความสับสนของแถบช่วงคลื่นในการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน งานวิจัยนี้ได้นำภาพถ่ายระบบไฮเปอร์สเปกตรัลจากดาวเทียม PRISMA ที่มีเมฆปกคลุมต่ำ (ร้อยละ 0.03) ร่วมกับวิธีการจำแนกแบบ spectral angle mapper (SAM) มาจำแนกป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุก ในกระบวนการจะแยกชุดข้อมูลแถบช่วงคลื่น PRISMA ออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) แถบช่วงคลื่นทั้งหมด และ 2) แถบช่วงคลื่นจำนวน 7 ช่วงคลื่น (วิเคราะห์จาก genetic algorithm) ทดสอบผลการจำแนกโดยใช้ค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) และค่าสถิติการทดสอบ dependent sample t-test ผลการศึกษาพบว่าภาพที่ใช้แถบช่วงคลื่นทั้งหมดและภาพที่ใช้ 7 ช่วงคลื่นให้ความถูกต้องโดยรวมสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 81.3 และ 76.0 ตามลำดับ ผลการทดสอบทางสถิติปฏิเสธสมมติฐานหลัก $H_0: (0.7 - 0.6) = 0.1$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.0 (p -value < 0.001) แม้ว่าการจำแนกด้วยภาพที่ใช้ 7 ช่วงคลื่นจะให้ความถูกต้องโดยรวม



น้อยกว่าภาพที่ใช้แถบช่วงคลื่นทั้งหมด อย่างไรก็ตามภาพที่ใช้ 7 ช่วงคลื่นให้ผลลัพธ์การแยกระดับสายพันธุ์ของชนิดโกงกางใบเล็กออกจากโกงกางใบใหญ่ได้ดีกว่าโดยพิจารณาจากค่าความถูกต้องผู้ผลิตและผู้ใช้ที่ได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ จึงพิสูจน์ถึงประสิทธิภาพการติดตามระบบนิเวศป่าชายเลนของระบบไฮเปอร์สเปกตรัลจากดาวเทียม PRISMA ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : ภาพถ่ายดาวเทียมพรินซ์ไฮเปอร์สเปกตรัล ; การรับรู้จากระยะไกล ; การจำแนก ; พันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อน

Abstract

Monitoring coastal ecosystem regarding the IUCN Red List of Threatened Species are essential. It was reported that 11 of 70 mangrove species are at risk of extinction. Hyperspectral imagery, hundreds of narrow spectral bands, has been effectively utilized to discriminate mangrove species. It is capable of delivering detailed spectral reflectance of mangrove varieties—however, some confusion between *Rhizophora* mangroves (*Rhizophora mucronata* and *Rhizophora apiculata*) still remains. This study aimed to classify mangrove species by utilizing a clearer PRISMA hyperspectral image of the Talumpuk cape with less than 0.03% cloud coverage and a spectral angle mapper (SAM) algorithm. Two sets of data were subsequently prepared 1) all spectral bands and 2) seven spectral bands selected by a genetic algorithm. Overall accuracy and dependent sample t-tests were then employed to evaluate the classification results of the two datasets, gaining 81.3% and 76.0%, respectively. Statistical testing revealed that null hypothesis $H_0: (0.7 - 0.6) = 0.1$ was significantly rejected at 99.0% confident level (p -value < 0.001). Despite comparable overall accuracies between the two datasets, it was evident that the genetic algorithm helped reduce the confusion between the two *Rhizophora* species. This was supported by improved producer and user accuracies. It is anticipated that the capabilities of PRISMA satellite images have many advantages in mangrove ecosystem monitoring.

Keywords : PRISMA hyperspectral imagery; remote sensing ; classification ; tropical mangrove species



บทนำ

การจำแนกป่าชายเลนระดับสายพันธุ์ยังคงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการประเมินสภาพพื้นที่ป่าที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัต (Vaiphasa *et al.*, 2005; Vaiphasa, 2006, as cited in McLeod & Salm, 2006; Vaiphasa *et al.*, 2006; Vaiphasa *et al.*, 2007b; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Intarat, 2018; Muangkasem *et al.*, 2022) โดยสอดคล้องกับการอนุรักษ์ป่าชายเลนอย่างมีประสิทธิภาพจาก IUCN Red List of Ecosystems (Sievers *et al.*, 2020) การรายงานของ IUCN Red List of Threatened Species พบว่าป่าชายเลน 11 สายพันธุ์จาก 70 สายพันธุ์ (ร้อยละ 16.00) อยู่ในภาวะเสี่ยงสูญพันธุ์ (Polidoro *et al.*, 2010) ดังนั้นหากสามารถตรวจสอบความหลากหลายของชนิดพันธุ์ได้อย่างรวดเร็วและจำแนกได้ถูกต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสากลของ United States Geological Survey (USGS) (Anderson, 1976) องค์ประกอบเหล่านี้ช่วยบ่งชี้ถึงความอุดมสมบูรณ์และความเสื่อมโทรมของพื้นที่ป่าได้ทั้งยังเป็นแนวทางป้องกันภัยคุกคามที่กำลังส่งผลกระทบต่อพันธุ์ไม้ป่าชายเลนทั่วโลก (Vaiphasa, 2006, as cited in McLeod & Salm, 2006) โดยเฉพาะปัญหาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการรุกรานของชนิดพันธุ์ต่างถิ่น (Invasive alien species) รวมถึงปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) และลานีญา (La Niña) ที่มีผลต่อความแปรปรวนของระดับน้ำทะเลตลอดจนปัญหาจากการก่อสร้างถนนที่เปลี่ยนแปลงการไหลของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) (Cardenas *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023) ในขณะเดียวกันป่าชายเลนจัดเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่ามหาศาลทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมช่วยรักษาคุณภาพของระบบนิเวศชายฝั่งและเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่สำคัญของโลก (Chen *et al.*, 2022; Morrissette *et al.*, 2023) ประกอบด้วยพันธุ์ไม้ที่มีความสามารถในการสังเคราะห์แสงสูง เช่น โกงกางใบใหญ่ (RM) โกงกางใบเล็ก (RA) และแสมทะเล (*Avicennia marina*, AM) ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage, CCS) ได้มากกว่าระบบนิเวศป่าไม้ประเภทอื่น (Rodda *et al.*, 2022; Hayati *et al.*, 2023) ด้วยเหตุนี้องค์การภาครัฐและเอกชนจึงฟื้นฟูและอนุรักษ์พื้นที่ป่าอย่างต่อเนื่องตามแผนยุทธศาสตร์การจัดการทรัพยากรป่าชายเลนอย่างยั่งยืน (Vaiphasa *et al.*, 2007a, as cited in Cochard, 2017; Mahmood *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021; Soeprbowati *et al.*, 2022; Titisari *et al.*, 2022; Suyadi *et al.*, 2023)

เทคนิคการรับรู้จากระยะไกลแบบไฮเปอร์สเปกตรัลถูกนำมาใช้เพื่ออนุรักษ์ป่าชายเลนผ่านการจำแนกระดับสายพันธุ์เนื่องจากมีความยาวคลื่นต่อเนื่องกันหลายร้อยช่วงคลื่น จึงสามารถใช้ตรวจสอบความหลากหลายของชนิดพันธุ์ได้ทั้งยังให้ค่าความถูกต้องสูง (Vaiphasa *et al.*, 2005; Vaiphasa *et al.*, 2007b; Hati *et al.*, 2021) จากการทดสอบข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลภายในห้องปฏิบัติการพบว่าช่วงคลื่น 350 nm ถึง 2500 nm มีประสิทธิภาพในการจำแนกป่าชายเลนเขตร้อน (Vaiphasa *et al.*, 2005) และเมื่อใช้ชุดสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 513 ± 19 nm, 717 ± 16 nm, 1263 ± 23 nm, 1385 ± 27 nm, 1489 ± 21 nm และ 1669 ± 25 nm จะสามารถเพิ่มความถูกต้องของการจำแนกได้มากขึ้น (Vaiphasa *et al.*, 2007b) ระยะเวลาเมื่อไฮเปอร์สเปกตรัลเซนเซอร์มีวิวัฒนาการที่ทันสมัยจึงนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion มาใช้จำแนกป่าชายเลนพบว่าหากทำการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมต่อการจำแนกเหลือเพียง 7 ช่วงคลื่นจะสามารถเพิ่มความถูกต้องของการจำแนกได้มากถึงร้อยละ 6.0 เมื่อเทียบกับผลการจำแนกที่ได้จากการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมด (Koedsin & Vaiphasa, 2013)

ภายหลังจากดาวเทียมระบบ Hyperion ถูกปลดประจำการไปเมื่อวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2560 (Jing *et al.*, 2019) ดาวเทียม PRISMA (Precursore Iperspettrale della Missione Applicativa) จึงเป็นดาวเทียมสังเกตการณ์โลกดวงใหม่ที่ใช้ไฮเปอร์สเปกตรัลเซนเซอร์ซึ่งอยู่ภายใต้โครงการสาธิตเทคโนโลยีขององค์การอวกาศอิตาลี (Italian Space Agency) (Loizzo *et al.*, 2018; Loizzo *et al.*, 2019) เนื่องจากดาวเทียม PRISMA สามารถกำหนดการถ่ายภาพได้ภายใน 1 วัน (Minimum order validity time) จึงเหมาะสมนำมาใช้ตรวจสอบความหลากหลายของชนิดพันธุ์ได้รวดเร็ว จากผลงานตีพิมพ์ในครั้งก่อนได้ทดสอบประสิทธิภาพข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม PRISMA โดยใช้ภาพมีเมฆกระจายตัวในตำแหน่งสำคัญที่มีข้อมูลภาคสนามจำแนกป่าชายเลนพบว่าภาพที่ใช้ 9 ช่วงคลื่นจากแถบสเปกตรัมทั้งหมดช่วยปรับปรุงความถูกต้องโดยรวมเพิ่มขึ้นได้ร้อยละ 1.2 แต่ไม่สามารถให้ผลลัพธ์การแยกระดับสายพันธุ์ระหว่างคลาสโกกกาบใหญ่และโกกกาบเล็กได้อย่างชัดเจน (Muangkasem *et al.*, 2022) เนื่องจากลักษณะของใบมีความใกล้เคียงกันมากส่งผลให้ค่าการสะท้อนของจุดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ปัญหาดังกล่าวถูกพบเมื่อต้องจำแนกโกกกาบสองสายพันธุ์ในพื้นที่ศึกษาเดียวกันซึ่งปรากฏอยู่ในงานวิจัยของ Vaiphasa *et al.* (2006); Koedsin & Vaiphasa (2013); Watanakij & Vaiphasa (2016); Intarat & Sillaparat (2019); Muangkasem *et al.* (2022) งานวิจัยนี้จึงจำแนกป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุกโดยใช้ภาพถ่ายระบบไฮเปอร์สเปกตรัลจากดาวเทียม PRISMA ซึ่งปราศจากเมฆในตำแหน่งสำคัญที่มีข้อมูลภาคสนามเพื่อต้องการปรับปรุงผลใหม่ของการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนด้วยภาพถ่ายดาวเทียมพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัล

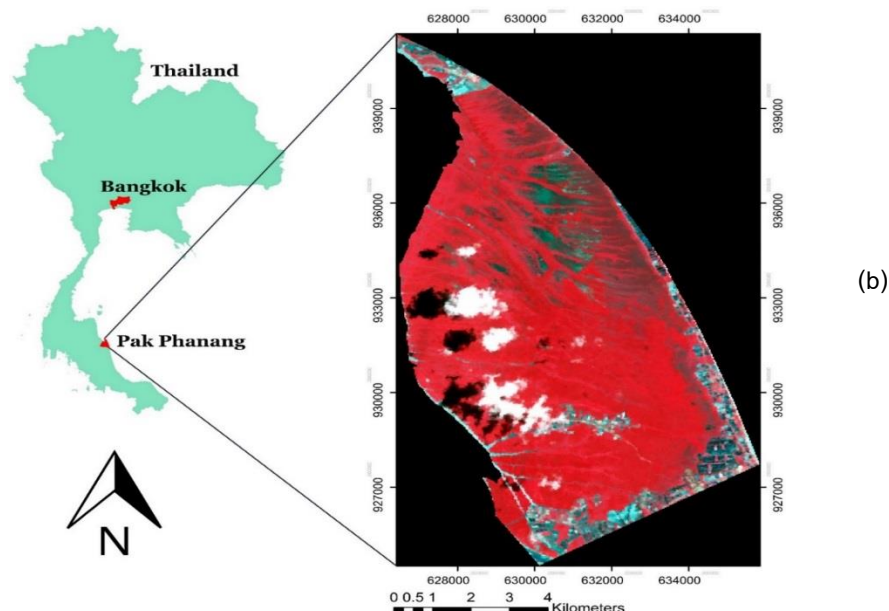


Figure 1 (a) The location of the Talumpuk cape, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province, Thailand
(b) False color composite image of PRISMA hyperspectral data (Captured on 13 August 2022)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ที่เก็บข้อมูลมาล่าสุดและไม่มีเมฆมารบกวน (Cloud coverage ร้อยละ 0.03) ในการจำแนกป่าชายเลนระดับสายพันธุ์บริเวณแหลมตะลุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมุ่งเน้นการจำแนกข้อมูลภาพด้วยตัวจำแนก spectral angle mapper (SAM) (Koedsin & Vaiphasa, 2013) ด้วยแถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA และคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมจำนวน 7 ช่วงคลื่น โดยมีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับชุดสเปกตรัมที่ให้ค่าความถูกต้องของการจำแนกแบบ SAM สูงสุดจากผลการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วย genetic algorithm (GA) ที่ได้ทดลองไว้ในกรณีขนาดโครโมโซมที่ 7 ร่วมกับภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion (Koedsin & Vaiphasa, 2013) จากนั้นจึงตรวจสอบ overall accuracy (OA) เพื่อเลือกความถูกต้องสูงสุดพร้อมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างด้วย dependent sample t-test และเปรียบเทียบกับผลงานตีพิมพ์ในครั้งก่อน (Muangkasem *et al.*, 2022)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งได้รับการตั้งเป็นเขตห้ามล่าสัตว์ป่าแหลมตะลุมพุกตามพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2503 ตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์ ละติจูด $8^{\circ} 31'$ เหนือ และลองจิจูด $100^{\circ} 9'$ ตะวันออก ทางด้านทิศตะวันออกของแหลมตะลุมพุกเป็นหาดทรายยาวส่วนทิศตะวันตกถูกปกคลุมด้วยป่าชายเลนหนาที่ 56.73 ตารางกิโลเมตร (Figure 1) โดยทับซ้อนกับเขตป่าสงวนแห่งชาติ 2 ส่วน (Teeratanatom, 2000; Vaiphasa *et al.*, 2006; Muangkasem *et al.*, 2022) แหลมตะลุมพุกมีพันธุ์ไม้ป่าชายเลนจำนวน 11 วงศ์ 23 ชนิด เป็นพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่โดดเด่น 5 สายพันธุ์ ได้แก่ โกงกางใบใหญ่, โกงกางใบเล็ก, แสมทะเล (AM), แสมขาว (*Avicennia alba*, AA) และถั่วดำ (*Bruguiera parviflora*, BP) โดยพบต้นโกงกางใบเล็กที่มีพฤติกรรมขึ้นแทรกกับต้นโกงกางใบใหญ่ปกคลุมหนึ่งในสามของพื้นที่แหลมตะลุมพุกทางทิศตะวันตกซึ่งมีต้นแสมขาวขึ้นปะปนกับโกงกางทั้งสองสายพันธุ์บริเวณดินทราย (Vaiphasa *et al.*, 2006; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Muangkasem *et al.*, 2022)

2. ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและการประมวลผลภาพจากดาวเทียม PRISMA

ข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากภาพถ่ายจากดาวเทียม PRISMA ครอบคลุมพื้นที่ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุก (พื้นที่ศึกษา) ถ่ายเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม 2565 เวลา 11.15 น. (ตามเวลาของประเทศอิตาลี) ในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ละติจูด $8.4446^{\circ} N$ และลองจิจูด $100.1825^{\circ} E$ ถ่ายเป็น spot image 30×30 กิโลเมตร start epoch: 12/8/2565 เวลา 12.00 น. และ stop epoch: 19/8/2565 เวลา 12.00 น. กำหนด look angle min/max เท่ากับ -20.7 และ 20.7 ตามลำดับ ภายหลังจากการส่งถ่ายภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ได้ทำการบันทึกข้อมูลภาพเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2565 cloud coverage ร้อยละ 0.03 (Figure 1b) โดยเป็นข้อมูลภาพใหม่และปราศจากเมฆในตำแหน่งสำคัญที่มีข้อมูลภาคสนามทั้งยังมี cloud coverage น้อยกว่าภาพส่งถ่ายจากดาวเทียม PRISMA ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งก่อนซึ่งเคยบันทึกไว้เมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2564 (Cloud coverage ร้อยละ 6.04) (Muangkasem *et al.*, 2022)



Table 1 Main characteristics of the PRISMA Level 1 data, adapted from Vangi *et al.* (2021)

Feature	Description
Inventory date/ Sun zenith angle	2022-08-13 08:52:39.850Z/ 20.994°
Orbit altitude reference/ Swath	615 km/ 30 km
Available product	Top-of-Atmosphere Spectral Radiance; Cloud mask; Sun-glint Mask; Calibration and characterization data used; Classification Mask
Ground Sampling Distance	Hyperspectral: 30 m; Panchromatic: 5 m
Spatial pixels	Hyperspectral:1000; Panchromatic: 6000
Pixel size	Hyperspectral: 30 x 30 µm; Panchromatic: 6.5 x 6.5 µm
Spectral range	VNIR: 400-1010 nm (66 bands); SWIR: 920-2500 nm (173 bands) PAN: 400-700 nm
Spectral width	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 12 nm
Spectral calibration accuracy	±0.1 nm
Radiometric quantization	12 bits

งานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นภาพถ่าย Level 1 (Table 1) โดยพิจารณาที่ hyperspectral cubes (VNIR cube และ SWIR cube) จากนั้นจึงปรับแก้ข้อมูลเชิงคลื่น (Radiometric correction) และปรับแก้ข้อมูลชั้นบรรยากาศ (Atmospheric correction) ด้วยแบบจำลอง MODTRAN-4 และ Fast Line of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube (FLAASH) ในโปรแกรม ENVI 5.6 (E-Contract No.E21-0076 สัญญาเลขที่ 003/2564) (L3HARRIS, 2021) โดยเลือกใช้แถบสเปกตรัม 164 ช่วงคลื่นจากแถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA hyperspectral cubes จำนวน 239 ช่วงคลื่น (Carfora *et al.*, 2022) ซึ่งมีช่วงคลื่นจำนวน 75 ช่วงคลื่นถูกคัดออกและไม่นำมาใช้ในการจำแนก (Table 2) จากนั้นทำการ de-streaking แถบสเปกตรัมที่เลือกใช้เพื่อกำจัดริ้วในแนวตั้ง (Vertical striping) พร้อมกำหนดพิกัดภาพถ่ายด้วยระบบพิกัดฐานอ้างอิงแบบ World Geodetic System 1984 (WGS84) ระบบพิกัด UTM Zone 47 North จากนั้นทำ masking ก่อนนำข้อมูลภาพเข้าสู่อารวิเคราะห์จำแนกในขั้นตอนต่อไป

Table 2 List of eliminated bands of the PRISMA Level 1 data.

Bands	Description
64-66 (VNIR cube)	No information
1-2 (SWIR cube)	
1-2, 32 (VNIR cube)	Higher noise levels
3, 54, 79, 84-85, 104-111, 151-168 (SWIR cube)	
22, 42-53, 86-103, 169-173 (SWIR cube)	Bad band list

3. การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ข้อมูลภาคสนามทำการบันทึกครั้งแรกในเดือนกุมภาพันธ์และมีนาคม พ.ศ. 2554 โดยวางแปลงขนาด 30×30 เมตร จำนวน 100 แปลง และเลือกข้อมูลในแปลงทดสอบแต่ละแปลงโดยนับจำนวนต้นที่มีความสูงเกิน 2.5 เมตร แยกตามสายพันธุ์ จากนั้นจึงนำข้อมูลพันธุ์ไม้ทั้งหมดจัดกลุ่มด้วยเทคนิค grow ในโปรแกรม ENVI 4.7 ซึ่งเป็นการขยายตัวอย่างชุดข้อมูล (เพิ่มจำนวน samples) ให้มีขนาดเท่า pixel size ของภาพถ่ายดาวเทียมโดยอ้างอิงจากพันธุ์ไม้ป่าชายเลน 5 ชนิดในแหลมตะลุมพุก (Koedsin & Vaiphasa, 2013) ต่อมาได้รับการสำรวจเพิ่มเติมและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลครั้งที่ 2 ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 (Intarat, 2018) จากการศึกษาของ Vaiphasa *et al.* (2006); Koedsin & Vaiphasa (2013); Intarat (2018) พบว่าในช่วงเวลาบันทึกภาพถ่ายดาวเทียมจนถึงการเก็บข้อมูลภาคสนามพันธุ์ไม้ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุกมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ (Panapitukkul *et al.*, 1998) เนื่องจากพื้นที่ศึกษาเป็นป่าปลูกและเป็นพื้นที่ป่าอนุรักษ์จึงถูกกำหนดขอบเขตอย่างชัดเจนไม่ให้เกิดการบุกรุกส่งผลให้พันธุ์ไม้ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุกมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำสำหรับผลงานตีพิมพ์ในครั้งก่อนพบว่าภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ที่นำมาใช้งานมีเมฆบดบังในตำแหน่งสำคัญที่มีข้อมูลภาคสนาม (Muangkasem *et al.*, 2022) แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA Level 1 ภาพใหม่ (บันทึกข้อมูลภาพเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2565) ที่ปราศจากเมฆในตำแหน่งสำคัญ (Cloud coverage ร้อยละ 0.03) จึงได้นำข้อมูลภาคสนามของ Koedsin & Vaiphasa (2013) มาปรับปรุงบางส่วน (Table 3) โดยตัวอย่างชุดข้อมูลพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่ผ่านการปรับปรุงแล้วถูกนำมาเฉลี่ยแต่ละช่วงคลื่นแยกตามสายพันธุ์บนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA Level 1 จำนวน 164 ช่วงคลื่นจะได้กราฟแสดงค่าการสะท้อนเชิงคลื่น (Spectral reflectance profiles) (Figure 2)

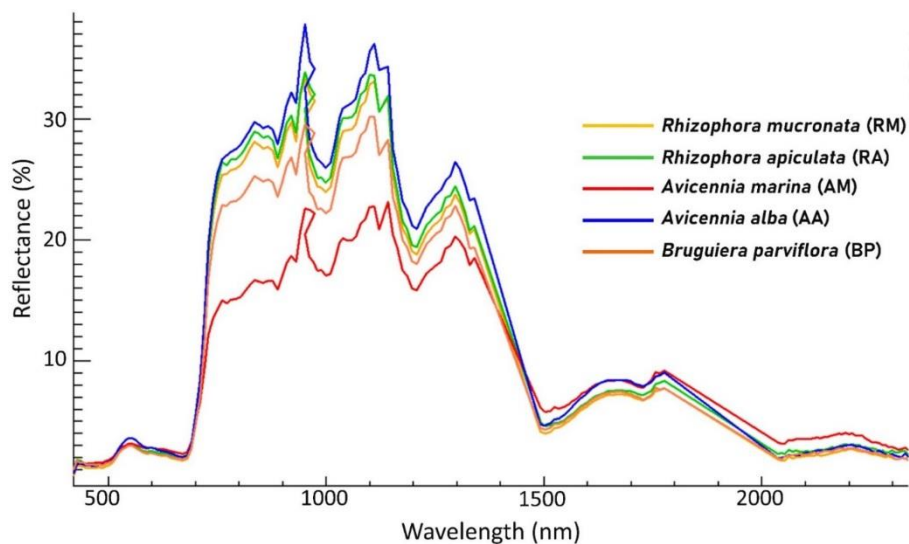


Figure 2 The stacked plot of average reflectance curves of five tropical mangrove species from PRISMA hyperspectral image (164 stable bands ranging from 419 nm to 2335 nm)



Table 3 The number of training and testing samples per species (1 dataset)

Mangroves Species	Abbreviations	Training Samples	Testing Samples
<i>Rhizophora mucronata</i>	RM	38	29
<i>Rhizophora apiculata</i>	RA	51	22
<i>Avicennia marina</i>	AM	44	42
<i>Avicennia alba</i>	AA	30	28
<i>Bruguiera parviflora</i>	BP	38	29
Total		201	150

4. การจำแนกโดยใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA

เลือกใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA 164 ช่วงคลื่นจาก 239 ช่วงคลื่นใน hyperspectral cubes (Carfora *et al.*, 2022) โดยไม่เลือกช่วงคลื่นที่มีสถานะ no information, higher noise levels และ bad band list มาใช้งานจึงทำการคัดออกเป็นจำนวน 75 ช่วงคลื่นและไม่นำมาใช้ในการจำแนก (Table 2) ดังนั้นในกระบวนการจำแนกจึงเลือกใช้แถบสเปกตรัมที่เหลือ 164 ช่วงคลื่นร่วมกับตัวจำแนกแบบ SAM โดยใช้ข้อมูลการสอน (Training samples) (Table 3) ที่แบ่งไว้ทั้งหมด 30 ชุด (เลือกใช้ 4,725 ข้อมูล) ซึ่งได้รับการปรับปรุงโดยเทียบ intra-sample จากลายเซ็นสเปกตรัม (Spectral signature) ของพันธุ์ไม้ป่าชายเลนในสายพันธุ์เดียวกันโดยตัดข้อมูลบางส่วนออกเมื่อพบลายเซ็นสเปกตรัมแตกต่างไปจากเดิม ในการจำแนกได้สุ่มตัวอย่างข้อมูลด้วยวิธีการสุ่มแบบเลือกลำดับชั้นภูมิ (Stratified random sampling) (Wan *et al.*, 2020) โดยใช้ข้อมูลการสอนที่ผ่านการหมุนแล้ว (Data rotation) สุ่มป้อนเข้าสู่อัลกอริทึมจำนวน 1 ชุด/รอบ (ทำซ้ำทั้งหมด 30 ชุด) โดยใช้ spectral angle mapper classification ในโปรแกรม ENVI 5.6 (L3HARRIS, 2021) และตรวจสอบค่าความถูกต้องด้วยข้อมูลทดสอบ (Testing samples) (Table 3) ที่แบ่งไว้ทั้งหมด 30 ชุด (4,500 ข้อมูล) โดยสุ่มป้อนเข้าสู่การตรวจสอบผลการจำแนกจำนวน 1 ชุด/รอบ (ทำซ้ำทั้งหมด 30 ชุด) เพื่อให้เปรียบเทียบหาค่าความถูกต้องโดยรวม (OA) ของข้อมูลทดสอบที่มีค่ามากที่สุด (Figure 3)

5. การจำแนกโดยการคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA

การคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA ได้จำกัดจำนวนช่วงคลื่นไว้เป็น 7 ช่วงคลื่น โดยกำหนดให้เลือกชุดสเปกตรัมของ PRISMA ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับช่วงคลื่นของภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion ได้แก่ ช่วงคลื่น 549 nm, 712 nm, 732 nm, 1034 nm, 1235 nm, 2073 nm, และ 2083 nm ที่ได้จากผลการทดลองของการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm, GA) ในกรณีการทดสอบขนาดโครโมโซมที่ 7 ซึ่งให้ค่าความถูกต้องของการจำแนกสูงสุด (Koedsin & Vaiphasa, 2013) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA ที่มีความยาวคลื่น 546 nm, 709 nm, 729 nm, 1038 nm, 1240 nm, 2070 nm และ 2086 nm มาใช้ร่วมกับตัวจำแนก SAM และเพื่อให้ผลการเปรียบเทียบไม่มีความลำเอียง (Bias) จึงกำหนดข้อมูลการสอน (ทั้งหมด 30 ชุด) และข้อมูลทดสอบ (ทั้งหมด 30 ชุด) ให้เป็นข้อมูลชุด

เดียวกันกับกรณีการจำแนกด้วยสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จำนวน 164 ช่วงคลื่น จากนั้นเปรียบเทียบหาค่าความถูกต้องโดยรวมของข้อมูลทดสอบที่มีค่ามากที่สุด (Figure 3)

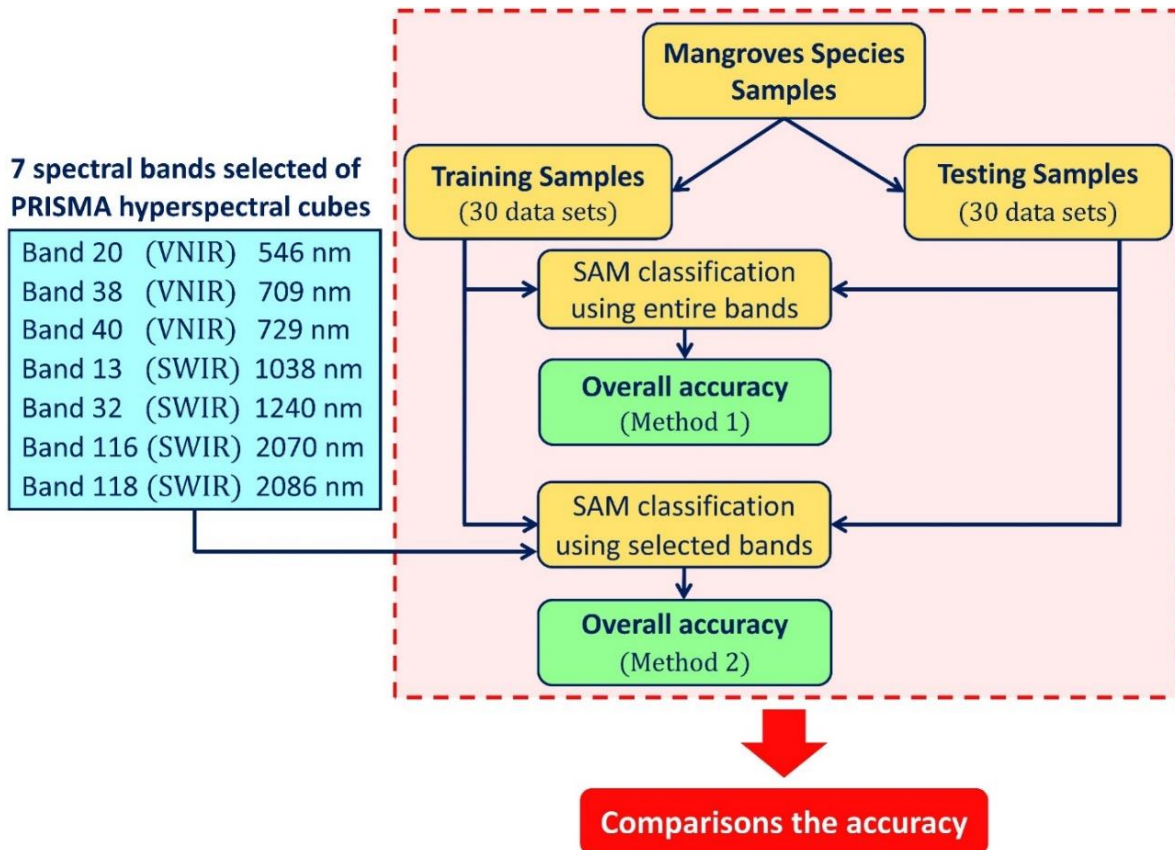


Figure 3 Flow-chart of five mangrove species classification using the spectral angle mapper (SAM) algorithm

6. การตรวจสอบผลการจำแนก

ผลการจำแนกป่าชายเลน 5 สายพันธุ์ถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องและประเมินประสิทธิภาพของการจำแนกด้วยเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน (Confusion matrix) โดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการจำแนก (Classified data) และข้อมูลอ้างอิง (Reference data) (Koedsin & Vaiphasa, 2013; Congalton & Green, 2019) จากนั้นจึงตรวจสอบหาความสอดคล้องของการจำแนกด้วยค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa hat coefficient, K) ดังสมการที่ (1) (Carletta, 1996)



$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ $P(A)$ คือความน่าจะเป็นความสอดคล้องของข้อมูลการจำแนกและ $P(E)$ คือความน่าจะเป็นความสอดคล้องของข้อมูลอ้างอิง โดยที่ K แบ่งได้ 3 ช่วง ประกอบด้วย 1) $K > 0.8$ มีความสอดคล้องกันมาก 2) $0.67 < K < 0.8$ มีความสอดคล้องกันปานกลาง และ 3) $K < 0.67$ มีความสอดคล้องกันต่ำ (Carletta, 1996) โดยผลลัพธ์ที่ให้ความถูกต้องสูงสุด (Maximum of overall accuracy และ Maximum of kappa) จากการจำแนกด้วย SAM ในกรณีการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA และกรณีภายหลังการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมจะถูกนำมาแสดงผลการจำแนกภาพถ่าย (Figure 4)

7. การทดสอบทางสถิติ

7.1 การเปรียบเทียบภายในกลุ่ม

ผลลัพธ์สุดท้ายของการจำแนก (ค่า Overall accuracy และ Kappa) ด้วยตัวจำแนกแบบ SAM ภายหลังการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จำนวน 164 ช่วงคลื่น และการคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA จำนวน 7 ช่วงคลื่น ถูกนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่มีการแจกแจงแบบปกติด้วย dependent sample t-test กำหนดให้สมมติฐานหลัก $H_0: \mu_1 = \mu_2$ (ค่าไม่มีความแตกต่าง) และสมมติฐานรอง $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (ค่ามีความแตกต่าง) โดยที่ H_0 จะถูกปฏิเสธเมื่อ $t \geq t_{\alpha,2}$ เมื่อ α_2 คือระดับความเชื่อมั่นทางสถิติค่า t แบบ 2 ทาง มีองศาอิสระเป็นค่าอนันต์ (Wilkerson, 2008; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Gerald, 2018)

7.2 การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม

ผลลัพธ์สุดท้ายของการจำแนกด้วยตัวจำแนกแบบ SAM โดยการคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA จำนวน 7 ช่วงคลื่น จากงานวิจัยนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลงานตีพิมพ์ในครั้งก่อนซึ่งเคยได้ทดลองคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมของ PRISMA ไว้จำนวน 9 ช่วงคลื่นด้วยวิธี GA โดยใช้กรณีขนาดโครโมโซมที่ 9 ร่วมกับตัวจำแนกแบบ SAM (Muangkasem *et al.*, 2022) ทั้งนี้จึงนำผลการจำแนกภายหลังการใช้แถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 9 และ 7 ช่วงคลื่นมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่มีการแจกแจงแบบปกติด้วย dependent sample t-test โดยกำหนดให้สมมติฐานหลัก $H_0: \mu_1 = \mu_2$ (ค่าไม่มีความแตกต่าง) และสมมติฐานรอง $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (ค่ามีความแตกต่าง) โดยที่ H_0 จะถูกปฏิเสธเมื่อ $t \geq t_{\alpha,2}$ เมื่อ α_2 คือระดับความเชื่อมั่นทางสถิติค่า t แบบ 2 ทาง มีองศาอิสระเป็นค่าอนันต์ (Wilkerson, 2008; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Gerald, 2018)

ผลการวิจัย

1. ผลการจำแนกโดยใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA

ผลการจำแนกป่าชายเลนด้วยแถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จำนวน 164 ช่วงคลื่นร่วมกับตัวจำแนกแบบ SAM โดยใช้ข้อมูลการสอน (ทั้งหมด 30 ชุด) และข้อมูลทดสอบ (ทั้งหมด 30 ชุด) พบว่าสามารถรายงานค่าความถูกต้องโดยรวมเฉลี่ยของข้อมูลทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 74.3 และค่าความถูกต้องโดยรวม (OA) ของข้อมูลทดสอบที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับร้อยละ



81.3 (Table 4) ซึ่งเป็นการปรับปรุงค่าความถูกต้องของการจำแนกเพิ่มขึ้นได้ร้อยละ 0.6 เมื่อเทียบกับการจำแนกโดยใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จำนวน 170 ช่วงคลื่น (OA ร้อยละ 80.7) (Muangkasem *et al.*, 2022) (Table 5)

2. ผลการจำแนกโดยการคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA

ผลการคัดเลือกช่วงคลื่นของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ถูกจำกัดจำนวนช่วงคลื่นไว้เป็น 7 ช่วงคลื่นโดยเลือกชุดสเปกตรัมของ PRISMA ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับช่วงคลื่นของภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion จากผลการทดลองด้วยวิธี GA ในกรณีการทดสอบขนาดโครโมโซมที่ 7 ซึ่งให้ค่าความถูกต้องของการจำแนกสูงสุดจากตัวจำแนก SAM (Koedsin & Vaiphasa, 2013) ทั้งนี้จึงใช้ข้อมูลการสอนและข้อมูลทดสอบที่เป็นชุดเดียวกันกับข้อมูลที่ใช้จำแนกในงานวิจัยครั้งนี้ที่ใช้สเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จำนวน 164 ช่วงคลื่นพบว่าเมื่อใช้ PRISMA เพียง 7 ช่วงคลื่นซึ่งประกอบด้วยความยาวคลื่นที่ 546 nm, 709 nm, 729 nm, 1038 nm, 1240 nm, 2070 nm และ 2086 nm ร่วมกับ SAM ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมเฉลี่ยของข้อมูลทดสอบร้อยละ 65.9 และค่าความถูกต้องโดยรวมของข้อมูลทดสอบที่มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 76.0 (Table 4)

Table 4 Overall accuracy (OA) and Kappa hat coefficient (Kappa) were compared for species classification between the case of 164 spectral bands and 7 spectral bands of PRISMA hyperspectral data.

Statistics	Overall accuracy (%)		Kappa hat coefficient	
	164 spectral bands	7 spectral bands	164 spectral bands	7 spectral bands
Minimum	67.3 (23 rd dataset)	60.7 (27 th dataset)	0.6 (23 rd dataset)	0.5 (27 th dataset)
Maximum	81.3 (29 th dataset)	76.0 (22 nd dataset)	0.8 (29 th dataset)	0.7 (22 nd dataset)
Average	74.3	65.9	0.7	0.6
Standard Deviation	3.3	2.9	0.0	0.0

Table 5 Overall accuracy (OA) and Kappa hat coefficient (Kappa) were compared for species classification between the case of 170 spectral bands and 164 spectral bands of PRISMA hyperspectral data.

Statistics	Overall accuracy (%)		Kappa hat coefficient	
	170 spectral bands	164 spectral bands	170 spectral bands	164 spectral bands
Minimum	62.7 (28 th dataset*)	67.3 (23 rd dataset)	0.5 (28 th dataset*)	0.6 (23 rd dataset)
Maximum	80.7 (8 th dataset*)	81.3 (29 th dataset)	0.8 (8 th dataset*)	0.8 (29 th dataset)
Average	72.9	74.3	0.7	0.7
Standard Deviation	4.3	3.3	0.1	0.0

Note : * Mangrove samples used for image classification in research article from Muangkasem *et al.* (2022) (30 datasets in total)



3. ผลการจำแนกภาพถ่าย

ผลการจำแนกและเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะกรณีที่ทำให้ผลการจำแนกสูงสุดจากตัวจำแนก SAM โดยใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA 164 ช่วงคลื่น (Table 6) และคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA 7 ช่วงคลื่น (Table 7) พบว่าค่าความถูกต้องโดยรวมลดลงจากร้อยละ 81.3 เป็นร้อยละ 76.0 เมื่อคัดเลือกชุดสเปกตรัมของ PRISMA ในความยาวคลื่นใกล้เคียงกับ 7 ช่วงคลื่นของภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion ประกอบด้วยช่วงคลื่น 549 nm, 712 nm, 732 nm, 1034 nm, 1235 nm, 2073 nm, และ 2083 nm (Koedsin & Vaiphasa, 2013) ทั้งนี้ค่าความถูกต้องที่ลดลงร้อยละ 5.3 เกิดขึ้นในคลาสของต้นโกงกางใบใหญ่ ต้นแสมขาวและถั่วดำ (Figure 4) ดังนั้นแม้ว่าจะใช้ช่วงคลื่นที่ใกล้เคียงกับ Hyperion แต่ความแตกต่างทางด้าน spectral range จากข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลของ PRISMA และ Hyperion จึงต้องพิจารณาไปถึงการเลือกใช้ช่วงคลื่นที่จำเพาะมากขึ้นตามสุขภาพพืชและความหลากหลายทางชนิดพันธุ์ที่ต่างกัน (Vangi *et al.*, 2021; Lassalle *et al.*, 2023)

ความลำเอียงของผลการจำแนกเกิดขึ้นเมื่อใช้จำนวนช่วงคลื่นที่แตกต่างกัน โดยค่าความถูกต้องของผู้ใช้และผู้ผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA อย่างไรก็ตามหากทำการคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA เหลือเพียง 7 ช่วงคลื่น ประกอบด้วยความยาวคลื่น 546 nm, 709 nm, 729 nm, 1038 nm, 1240 nm, 2070 nm และ 2086 nm พบว่าจะสามารถแยกความแตกต่างของคลาสดั้งโกงกางใบเล็กออกจากต้นโกงกางใบใหญ่ได้มากขึ้น (Figure 5) ทั้งยังปรับปรุงค่าความถูกต้องของผู้ผลิตและผู้ใช้กรณีการจำแนกโกงกางใบเล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Table 7) เพราะความแตกต่างปริมาณเม็ดสีคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์และลิกนินของใบป่าชายเลนซึ่งส่งผลโดยตรงกับค่าการสะท้อนในช่วงคลื่น 350 nm ถึง 700 nm รวมทั้งแถบสเปกตรัม NIR และ SWIR (Manjunath, 2013, as cited in Prasad & Gnanappazham, 2014) โดย 7 ตำแหน่งช่วงคลื่นที่ใช้จำแนกครั้งนี้สามารถแยกไม้สกุลโกงกาง (*Rhizophora* spp.) ออกจากกันได้แต่ยังไม่เหมาะสมสำหรับจำแนกต้นโกงกางใบใหญ่ ต้นแสมขาวและถั่วดำออกจากพันธุ์ไม้ชนิดอื่นอาจเนื่องมาจากสภาวะกดดันของสิ่งแวดล้อม (Environmental stressors) ที่กระทบกับสุขภาพพืชจึงมีผลต่อความแปรปรวนของสเปกตรัมระหว่างสายพันธุ์ที่ใช้จำแนกป่าชายเลนออกจากกันด้วยภาพถ่ายดาวเทียม (Zhang *et al.*, 2014, Flores-de-Santiago *et al.*, 2016, as cited in Lassalle *et al.*, 2023)

Table 6 The confusion matrix (a) user's and producer's accuracy of entire band combination (OA = 81.3%)

		Ground truth (Pixels)					Total	User's accuracy (%)	Producer's accuracy (%)
		RM	RA	AM	AA	BP			
Classification results (a)	RM	24	11	0	1	3	39	61.5	82.8
	RA	3	7	0	0	2	12	58.3	31.8
	AM	0	2	42	0	2	46	91.3	100.0
	AA	2	0	0	27	0	29	93.1	96.4
	BP	0	2	0	0	22	24	91.7	75.9
	Total	29	22	42	28	29	150		

RM = *Rhizophora mucronata*, RA = *Rhizophora apiculata*, AM = *Avicennia marina*, AA = *Avicennia alba*, BP = *Bruguiera parviflora*



Table 7 The confusion matrix (b) user's and producer's accuracy of the 7 spectral-band combination (OA = 76.0%)

		Ground truth (Pixels)					Total	User's accuracy (%)	Producer's accuracy (%)
		RM	RA	AM	AA	BP			
Classification results (b)	RM	15	5	0	1	3	24	62.5	51.7
	RA	6	12	0	0	2	20	60.0	54.5
	AM	0	3	42	0	2	47	89.4	100.0
	AA	2	1	0	25	2	30	83.3	89.3
	BP	6	1	0	2	20	29	69.0	69.0
	Total	29	22	42	28	29	150		

RM = *Rhizophora mucronata*, RA = *Rhizophora apiculata*, AM = *Avicennia marina*, AA = *Avicennia alba*,
 BP = *Bruguiera parviflora*

4. ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการจำแนกทางสถิติ

ค่าความถูกต้องของการจำแนกป่าชายเลนจากการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA และการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมจำนวน 7 ช่วงคลื่น ถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างด้วย dependent sample t-test ผลการทดสอบสรุปว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก $H_0: (0.7 - 0.6) = 0.1$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.0 ($p\text{-value} < 0.001$) (Table 8) จึงเป็นการยืนยันได้ว่าการจำแนกป่าชายเลนด้วยแถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จำนวน 164 ช่วงคลื่นให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องสูงกว่าการใช้แถบสเปกตรัมจำนวน 7 ช่วงคลื่น

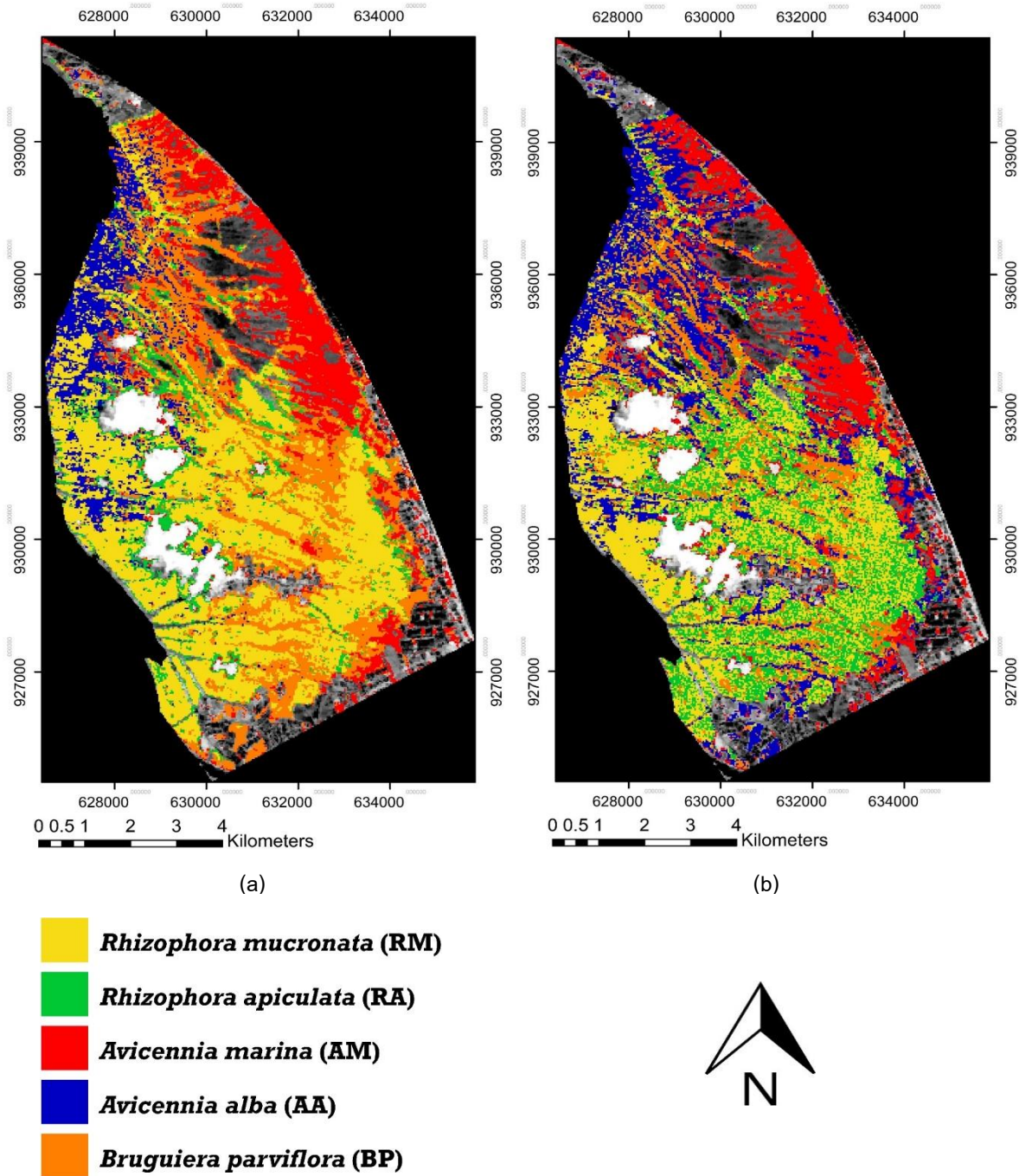


Figure 4 (a) The classified image using the entire band combination with 164 spectral bands (OA = 81.3%)
(b) The classified image using the 7 spectral-band combination (OA = 76.0%)

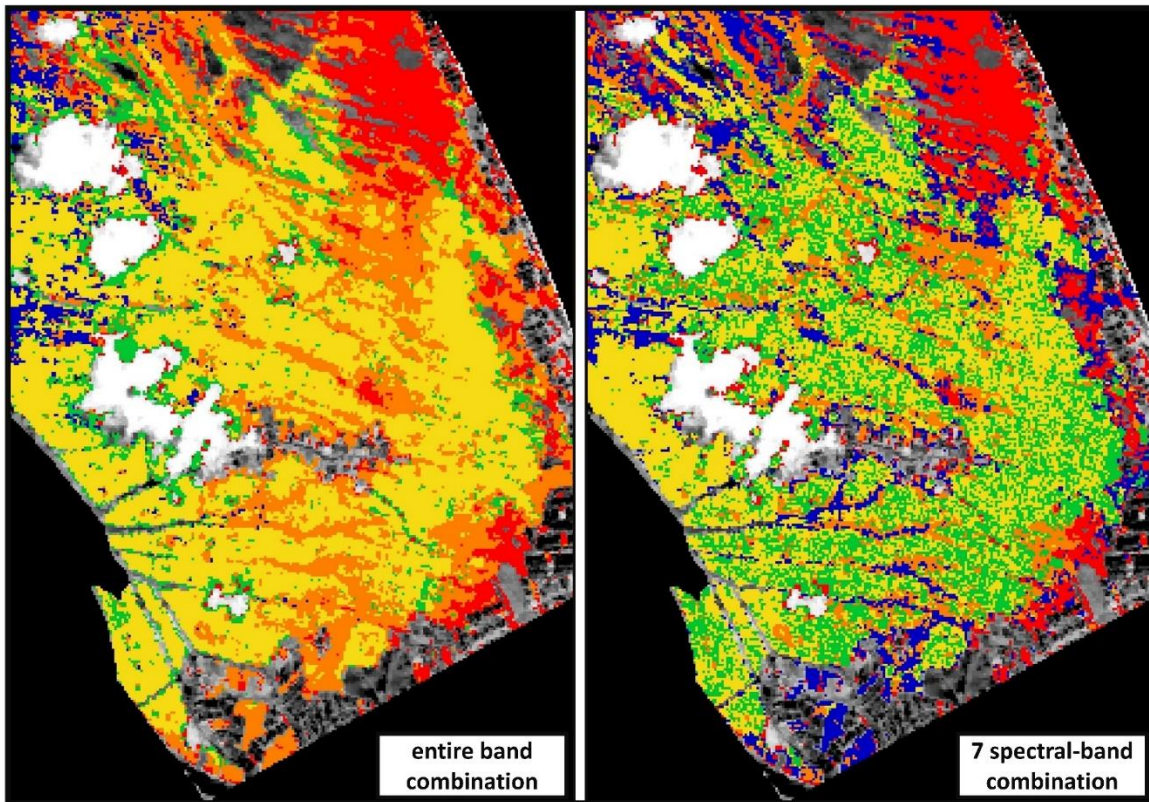


Figure 5 Mangrove species classification using the seven selected spectral bands increases the accuracy of detecting the *Rhizophora apiculata* (RA) class more than all spectral bands. (From this experiment)

Table 8 The statistical comparisons to evaluate the average overall accuracy of two different spectral datasets

Accuracy Assessment	t-test statistic (Confidence interval 99%)	Degrees of Freedom (DF)	p-value
Overall Accuracy	14.0	29	0.000
Kappa hat coefficient	13.8	29	0.000



5. ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการจำแนกทางสถิติระหว่างการใช้แถบสเปกตรัม PRISMA จำนวน 170 และ 164 ช่วงคลื่น

ค่าความถูกต้องของการจำแนกป่าชายเลนโดยใช้ตัวจำแนกแบบ SAM ร่วมกับแถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จำนวน 170 ช่วงคลื่นจากงานวิจัยตีพิมพ์ครั้งก่อน (Muangkasem *et al.*, 2022) และ 164 ช่วงคลื่นที่ปรากฏในงานวิจัยนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างด้วย dependent sample t-test โดยใช้ผลลัพธ์สุดท้ายของการจำแนกทั้งหมด 30 observations ผลการทดสอบสรุปว่ายอมรับสมมติฐานหลัก $H_0: (0.7 - 0.7) = 0$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.0 ($p\text{-value} > 0.001$) (Table 9) จึงยืนยันได้ว่าการจำแนกด้วยตัวจำแนก SAM ร่วมกับแถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 170 ช่วงคลื่น (Muangkasem *et al.*, 2022) ให้ผลการทดลองที่ไม่มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้แถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 164 ช่วงคลื่น อย่างไรก็ตามพบว่าผลการจำแนกป่าชายเลนด้วย PRISMA 164 ช่วงคลื่นให้ความถูกต้องสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 81.3 (Table 5) โดยสามารถปรับปรุงค่าความถูกต้องเพิ่มขึ้นได้ร้อยละ 0.6 เมื่อเทียบกับการจำแนกด้วย PRISMA 170 ช่วงคลื่นที่ให้ความถูกต้องสูงสุดเท่ากับร้อยละ 80.7 (Muangkasem *et al.*, 2022) (Table 5)

Table 9 The statistical comparisons to evaluate the average overall accuracy of two different spectral datasets

Accuracy Assessment	t-test statistic (Confidence interval 99%)	Degrees of Freedom (DF)	p-value
Overall Accuracy	-1.3	29	0.209
Kappa hat coefficient	-1.2	29	0.251

6. ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการจำแนกทางสถิติระหว่างการใช้แถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 9 และ 7 ช่วงคลื่น

ค่าความถูกต้องของการจำแนกป่าชายเลนจากงานวิจัยตีพิมพ์ในครั้งก่อนของ Muangkasem *et al.* (2022) ซึ่งใช้ตัวจำแนก SAM ร่วมกับแถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 9 ช่วงคลื่นโดยคัดเลือกมาจากวิธี GA ในกรณีขนาดโครโมโซมที่ 9 และรายงานค่าความเหมาะสมของโครโมโซมอยู่ที่ร้อยละ 99.0 ผลลัพธ์สุดท้ายของการจำแนกดังกล่าว (30 observations) ถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างด้วย dependent sample t-test กับผลลัพธ์สุดท้ายของการจำแนกจากงานวิจัยนี้ที่ใช้แถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 7 ช่วงคลื่น จากผลการทดสอบสรุปว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก $H_0: (0.7 - 0.6) = 0.1$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.0 ($p\text{-value} < 0.001$) (Table 10) จึงเป็นการยืนยันได้ว่าการจำแนกป่าชายเลนด้วยตัวจำแนก SAM ร่วมกับแถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 9 ช่วงคลื่น (Muangkasem *et al.*, 2022) ให้ผลการทดลองที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้แถบสเปกตรัมของ PRISMA จำนวน 7 ช่วงคลื่นที่ประกอบด้วยความยาวคลื่น 546 nm, 709 nm, 729 nm, 1038 nm, 1240 nm, 2070 nm และ 2086 nm



Table 10 The statistical comparisons to evaluate the average overall accuracy of two different spectral datasets

Accuracy Assessment	t-test statistic (Confidence interval 99%)	Degrees of Freedom (DF)	p-value
Overall Accuracy	10.1	29	0.000
Kappa hat coefficient	10.2	29	0.000

วิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA (Hyperspectral cubes) โดยใช้ช่วงคลื่นทั้งหมด 164 ช่วงคลื่นพบว่าสามารถจำแนกป่าชายเลน 5 สายพันธุ์เด่นได้อย่างถูกต้องร้อยละ 81.3 (OA = 81.3%, Kappa = 0.8) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสากลเป็นที่ยอมรับตรงตามการสำรวจของ USGS (Anderson, 1976) ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำแนกจากงานวิจัยในพื้นที่ศึกษาเดียวกัน (ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุก) และป่าชายเลนเขตร้อนพื้นที่อื่น ๆ ที่ใช้ข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลจำแนกและให้ค่าความถูกต้องโดยรวมมากกว่าร้อยละ 80.0 (Vaiphasa *et al.*, 2006; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Kumar *et al.*, 2019; Hati *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021; Muangkasem *et al.*, 2022) ทั้งนี้หากลดแถบสเปกตรัมของ PRISMA เหลือเพียง 7 ช่วงคลื่นประกอบด้วยความยาวคลื่น 546 nm, 709 nm, 729 nm, 1038 nm, 1240 nm, 2070 nm และ 2086 nm โดยคัดเลือกช่วงคลื่นที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับชุดสเปกตรัมของภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion จากผลการทดลองด้วยวิธี GA ในขนาดโครโมโซมที่ 7 ซึ่งให้ค่าความถูกต้องของการจำแนกสูงสุดร้อยละ 92.0 (Koedsin & Vaiphasa, 2013) พบว่าการลดจำนวนแถบสเปกตรัมของ PRISMA ด้วยเทคนิคดังกล่าวไม่ได้ให้ผลดีเท่ากับผลการศึกษาที่ผ่านมา (Koedsin & Vaiphasa, 2013) แต่ส่งผลให้ค่าความถูกต้องของการจำแนกครั้งนี้ลดลงเหลือร้อยละ 76.0 (OA = 76.0%, Kappa = 0.7) อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อจำกัดด้านแรงงาน เวลาและงบประมาณการลงสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลภาคสนาม งานวิจัยนี้จึงเลือกทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกป่าชายเลนจากภาพสังเคราะห์ใหม่ของดาวเทียม PRISMA โดยใช้ข้อมูลภาคสนามที่จัดเก็บไว้ พ.ศ. 2554 (Koedsin & Vaiphasa, 2013) และวัดผลด้วยวิธีดังกล่าวเพื่อปรับปรุงผลการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน 5 สายพันธุ์ในพื้นที่ศึกษาเดียวกันเมื่อใช้ข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลจากดาวเทียมที่มี spectral range ที่แตกต่างกัน (ระหว่าง EO-1 Hyperion และ PRISMA) (Vangi *et al.*, 2021) โดยช่วงคลื่นของ PRISMA ที่ถูกคัดเลือกมาส่งผลดีต่อการจำแนกโกก่างใบเล็กออกจากคลาสโกก่างใบใหญ่ได้ชัดเจนมากขึ้น (Figure 5) ซึ่งช่วยปรับปรุงค่าความถูกต้องของผู้ใช้และค่าความถูกต้องของผู้ผลิตกรณีการจำแนกโกก่างใบเล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Table 7) จึงสามารถลดความสับสนเชิงคลื่นจากพฤติกรรมโกก่างสองสายพันธุ์ที่ขึ้นแทรกระหว่างกันและปกคลุมหนึ่งในสามของแหลมตะลุมพุก (Vaiphasa *et al.*, 2006) รวมถึงช่วยลดความสับสนจากลายเซ็นสเปกตรัมของไม้สกุลโกก่างที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก (Vaiphasa *et al.*, 2007b) เนื่องจากช่วงคลื่น PRISMA ในตำแหน่ง 709 nm, 729 nm และ 1240 nm อาจสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนของโกก่างใบเล็กเป็นผลให้คลาสโกก่างใบเล็กมีค่าการสะท้อนที่แตกต่างจากคลาสโกก่างใบใหญ่อย่างชัดเจนโดยเฉพาะแถบสเปกตรัม NIR (ความยาวคลื่น 700 nm ถึง 900 nm) (Selamat *et al.*, 2020) โดย 3 ช่วงคลื่นของ PRISMA ข้างต้นมีความยาวคลื่นตรงกับผลการคัดเลือก



2 ชุดคำตอบจากวิธี GA ที่ใช้จำแนกป่าชายเลนเขตร้อนบริเวณอ่าวสวีในประเทศไทย ได้แก่ ชุดสเปกตรัม 717 ± 16 nm และ 1263 ± 23 nm ของข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลภายในห้องปฏิบัติการที่เคยจำแนกป่าชายเลน 16 สายพันธุ์เด่นที่มีโกก้างใบใหญ่และโกก้างใบเล็กรวมอยู่ด้วยแสดงเป็นค่าความถูกต้องโดยรวมประมาณร้อยละ 80.0 (Vaiphasa *et al.*, 2007b)

สำหรับผลการจำแนกป่าชายเลนจากงานวิจัยตีพิมพ์ในครั้งก่อน (Muangkasem *et al.*, 2022) โดยใช้เป็นข้อมูลภาพสังเคราะห์จากดาวเทียม PRISMA ซึ่งเคยบันทึกภาพเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2564 (Cloud coverage ร้อยละ 6.04) พบว่าเมื่อคัดเลือกช่วงคลื่นของ PRISMA เหลือ 9 ช่วงคลื่น ได้แก่ ช่วงคลื่น 434 nm, 500 nm, 614 nm, 876 nm, 1163 nm, 1726 nm, 2052 nm, 2086 nm และ 2214 nm จากสเปกตรัมทั้งหมด 170 ช่วงคลื่นโดยใช้วิธี GA ในกรณีการทดสอบขนาดโครโมโซมที่ 9 ร่วมกับตัวจำแนกแบบ SAM จะให้ค่าความถูกต้องของการจำแนกสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 81.9 (OA = 81.9%, Kappa = 0.8) โดยสามารถจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน 5 สายพันธุ์เด่นได้อย่างถูกต้องยกเว้นคลาสของโกก้างใบใหญ่และโกก้างใบเล็กที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างออกจากกันได้อย่างชัดเจนเพราะค่าการสะท้อนมีความใกล้เคียงกันมาก (Vaiphasa *et al.*, 2005; Vaiphasa *et al.*, 2006; Koedsin & Vaiphasa, 2013) แม้ว่าจะลดจำนวนแถบสเปกตรัมของ PRISMA อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการจำแนกข้างต้นมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยครั้งนี้ในพื้นที่ศึกษาเดียวกันและความหลากหลายทางชนิดพันธุ์ที่เหมือนกัน พบว่าการใช้แถบสเปกตรัม 7 ช่วงคลื่นจากภาพสังเคราะห์ใหม่ของ PRISMA (บันทึกข้อมูลภาพเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2565) โดยปราศจากเมฆในตำแหน่งสำคัญที่มีข้อมูลภาคสนาม (Cloud coverage ร้อยละ 0.03) ร่วมกับตัวจำแนก SAM เป็นผลบ่งชี้ไปถึงการแยกความแตกต่างในคลาสโกก้างใบเล็กออกจากโกก้างใบใหญ่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยสอดคล้องกับข้อมูลสำรวจภาคสนามในเขตอนุรักษ์ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุกของ Intarat & Sillaparat (2019) ซึ่งพบว่าโกก้างใบเล็กเป็นพันธุ์ไม้เด่นที่มีจำนวนมากที่สุดในพื้นที่ที่แทรกด้วยโกก้างใบใหญ่บางส่วนที่เกิดจากฝกอลอยน้ำมาติดกับต้นโกก้างใบเล็กแล้วจึงเติบโตในบริเวณเดียวกัน ดังนั้นการเลือกใช้เทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA จึงยืดหยุ่นในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับวิวัฒนาการของพืช เช่น ขนาดประชากร วิธีการเข้ารหัสโครโมโซม วิธีการคัดเลือก อัตราการไขว้เปลี่ยนและความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mitchell, 1998; Bandyopadhyay & Pal, 2001; Vaiphasa *et al.*, 2007b; Ullah *et al.*, 2012; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Wirsansky, 2020) เป็นผลให้กรณีการทดลอง GA ที่ต่างกันจะได้ชุดคำตอบของจำนวนและตำแหน่งช่วงคลื่นที่แตกต่างกันด้วยโดยสอดคล้องกับช่วงคลื่นของงานวิจัยครั้งนี้ที่คัดเลือกจากผลการทดลองของ Koedsin & Vaiphasa (2013) เปรียบเทียบกับช่วงคลื่นจากงานวิจัยในครั้งก่อน (Muangkasem *et al.*, 2022) ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ของการจำแนกป่าชายเลนเปลี่ยนไปตามคุณลักษณะทางสรีรเคมีของพืช (Physio-chemical characteristics of plants) (Vaiphasa *et al.*, 2007b) แม้ว่าค่าความถูกต้องโดยรวมสูงสุดของการจำแนกป่าชายเลน 5 สายพันธุ์ครั้งนี้อยู่ที่ร้อยละ 76.0 แต่ความถูกต้องของผู้ใช้และความถูกต้องของผู้ผลิตกรณีการจำแนกผสมทะเลยังคงมีค่าเกินร้อยละ 87.0 เช่นเดียวกับการจำแนกด้วย PRISMA จำนวน 9 ช่วงคลื่นจากผลงานตีพิมพ์ในครั้งก่อน (Muangkasem *et al.*, 2022)

การปรับปรุงค่าความถูกต้องของการจำแนกระหว่างคลาสโกก้างใบใหญ่และโกก้างใบเล็กยังคงเป็นประเด็นสำคัญสำหรับการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่เกิดจากค่าการสะท้อนของจุดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งทำให้แยกความแตกต่างของโกก้างสองสายพันธุ์ออกจากกันได้ยาก (Vaiphasa *et al.*, 2006; Koedsin



& Vaiphasa, 2013; Watanakij & Vaiphasa, 2016; Intarat & Sillaparat, 2019; Muangkasem *et al.*, 2022) การศึกษาของ Ramassamy & Kannabira (1996) พบหลักฐานทางสรีรเคมีของเยื่อหุ้มเมล็ดและสัณฐานวิทยาของใบเลี้ยงป้าชายเลนในวงศ์ RHIZOPHORACEAE (โกงกางใบใหญ่ โกงกางใบเล็กและถั่วดำ) ซึ่งบ่งชี้ว่าความแตกต่างในระดับสายพันธุ์ของป้าชายเลนยังคงเติบโตในพื้นที่เดียวกันได้เมื่ออยู่ในวงศ์เดียวกัน นอกจากนี้งานวิจัยของ Pelozo *et al.* (2016) ยังพบว่าโกงกางใบใหญ่มีพฤติกรรมปรับตัวเพื่ออยู่รอดกับความแปรปรวนจากน้ำทะเลโดยลดความหนาของใบเมื่อต้องการกำจัดเกลือส่วนเกินเพื่อลดการสูญเสียน้ำและเพิ่มการดูดกลืนแสง ในขณะที่ความหนาของใบป้าชายเลนจัดเป็นพารามิเตอร์ที่แปรผันตรงกับค่าพื้นที่ใบจำเพาะ (Specific leaf area, SLA) ด้วยเหตุนี้จึงอาจส่งผลให้ค่าการสะท้อนของโกงกางใบใหญ่มีความใกล้เคียงกับโกงกางใบเล็กมากขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวใบลดลงซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างภายในระดับเซลล์ของใบพืช อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลยังคงให้ผลการจำแนกป้าชายเลนที่มีความถูกต้องสูงกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบหลายช่วงคลื่น (Multispectral imaging system) ได้แก่ Sentinel-2, Landsat 8 OLI และ WorldView-3 (Hati *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021) โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลความละเอียดเชิงพื้นที่ระดับ high resolution จะให้ความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ร้อยละ 82.0 เมื่อทดสอบร่วมกับตัวจำแนกแบบ convolutional neural network (CNN) โดยสามารถปรับปรุงค่าความถูกต้องเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็นร้อยละ 88.0 เมื่อใช้ข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลร่วมกับ LiDAR ซึ่งแสดงค่าความถูกต้องสูงกว่าการใช้ตัวจำแนกแบบ support vector machines (SVM) (OA ร้อยละ 86.0) และ random forests (RF) (OA ร้อยละ 87.0) (Li *et al.*, 2021) ในงานวิจัยของ Wang *et al.* (2023) เปรียบเทียบข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงด้วยสายตามนุษย์และข้อมูล SAR 4 ถึง 12 ช่วงคลื่นโดยใช้ตัวจำแนกแบบ extremely randomized trees (ERT), RF, k-nearest neighbor (KNN) และ bayesian (Bayes) จำแนกป้าชายเลน 3 สายพันธุ์พบว่า ERT ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมสูงกว่าตัวจำแนกประเภทอื่น ๆ ในทุกข้อมูลภาพ ดังนั้นหากต้องการปรับปรุงค่าความถูกต้องโดยรวมแนะนำว่าควรใช้สเปกตรัมของ PRISMA น้อยกว่าหรือเท่ากับ 164 ช่วงคลื่นเพราะสามารถเพิ่มผลการจำแนกได้ร้อยละ 0.6 (PRISMA 164 ช่วงคลื่น) และร้อยละ 1.2 (PRISMA 9 ช่วงคลื่น) เมื่อเทียบกับ PRISMA 170 ช่วงคลื่น (OA ร้อยละ 80.7) โดยสเปกตรัม 7 และ 9 ช่วงคลื่นเป็นจำนวนที่เหมาะสมสำหรับจำแนกป้าชายเลน 5 สายพันธุ์ (Koedsin & Vaiphasa, 2013; Muangkasem *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตามควรปรับพารามิเตอร์ของ GA ใหม่เพื่อเลือกตำแหน่งช่วงคลื่นที่แยกค่าการสะท้อนของโกงกางทั้งสองสายพันธุ์ได้ชัดเจนมากขึ้นและสามารถเพิ่มค่าความถูกต้องโดยรวมของการจำแนกป้าชายเลน 5 สายพันธุ์ได้ นอกจากนี้อาจทดลองใช้ข้อมูลพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัลร่วมกับ LiDAR โดยจำแนกแบบ CNN หรือใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงด้วยสายตามนุษย์และข้อมูล SAR ด้วยตัวจำแนกแบบ ERT (Wan *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023) ตลอดจนนำเทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นวิธี GA ในขนาดโครโมโซมที่ 4 ถึง 13 ร่วมกับตัวจำแนกแบบ SAM ซึ่งเคยเสนอในงานวิจัยของ Muangkasem *et al.*, (2022) ใช้ร่วมกับภาพถ่ายดาวเทียมระบบหลายช่วงคลื่นเพิ่มเติมจากการทดสอบกับภาพถ่ายดาวเทียมระบบไฮเปอร์สเปกตรัลเพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผลการจำแนกระหว่างภาพถ่ายดาวเทียม narrowband และ broadband



สรุปผลการวิจัย

การใช้ภาพถ่ายดาวเทียมพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัลที่เป็นข้อมูลภาพใหม่และปราศจากเมฆในตำแหน่งสำคัญที่มีข้อมูลภาคสนาม (Cloud coverage ร้อยละ 0.03) สามารถจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน 5 สายพันธุ์เด่นได้อย่างถูกต้องและเมื่อคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมจำนวน 7 ช่วงคลื่นโดยกำหนดให้เลือกความยาวคลื่นของ PRISMA ใกล้เคียงกับชุดสเปกตรัมของภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion ที่ให้ค่าความถูกต้องของการจำแนก SAM สูงสุดจากผลการทดลองด้วย GA ในขนาดโครโมโซมที่ 7 พบว่าสามารถแยกความแตกต่างในคลาสโกกวงใบเล็กออกจากโกกวงใบใหญ่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยช่วยปรับปรุงค่าความถูกต้องของผู้ใช้และผู้ผลิตแม้ว่าค่าความถูกต้องของการจำแนกโดยรวมจะลดลง นอกจากนี้การจำแนกโกกวงใบเล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับข้อมูลสำรวจภาคสนามในเขตอนุรักษ์บริเวณแหลมตะลุมพุกเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 แผนการศึกษาในอนาคตที่แนะนำไปต่อยอดคือการใช้ข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลจาก PRISMA ร่วมกับ LiDAR โดยจำแนกด้วย CNN เพิ่มความถูกต้องของการจำแนกหรือเปรียบเทียบกับภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงด้วยสายตามนุษย์และ SAR ด้วยตัวจำแนก ERT ตลอดจนใช้ GA คัดเลือกช่วงคลื่นโดยปรับค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับวิวัฒนาการของพืช ความสำเร็จของการศึกษาในครั้งนี้สนับสนุนการใช้งานระบบไฮเปอร์สเปกตรัลจากดาวเทียม PRISMA เพื่องานติดตามการเปลี่ยนแปลงของป่าชายเลนในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับ “ทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์” ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณ รศ.ดร.วีระพงศ์ เกิดสิน ที่ได้ดูแลและให้ข้อมูลภาคสนามในการศึกษา ขอขอบคุณสถานีวิจัยพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 15 และ 44 นครศรีธรรมราช กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ที่ให้ความอนุเคราะห์บุคลากรและเรือสำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

Anderson, J. R. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*. (Vol. 964). US Government Printing Office.

Bandyopadhyay, S., & Pal, S. K. (2001). Pixel classification using variable string genetic algorithms with chromosome differentiation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2), 303-308.

Cardenas, S. M. M., Cohen, M. C. L., Ruiz, D. P. C., Souza, A. V., Gomez-Neita, J. S., Pessenda, L. C. R., & Culligan, N. (2022). Death and Regeneration of an Amazonian Mangrove Forest by Anthropogenic and Natural Forces. *Remote Sensing*, 14(24), 6197.



- Carfora, M. F., Casa, R., Laneve, G., Mzid, N., Pascucci, S., & Pignatti, S. (2022). Prisma Noise Coefficients Estimation. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. (pp. 7531-7534). Malaysia: IEEE.
- Carletta, J. (1996). Assessing agreement on classification tasks: the kappa statistic. *Computational Linguistics*, 22(2), 249-254.
- Chen, G., Zhong, C., Li, M., Yu, Z., Liu, X., & Jia, M. (2022). Disturbance of mangrove forests in Guangxi Beilun Estuary during 1990-2020. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(6), 1112-1120.
- Cochard, R. (2017). Coastal water pollution and its potential mitigation by vegetated wetlands: An overview of issues in Southeast Asia. *Redefining Diversity & Dynamics of Natural Resources Management in Asia, Volume 1*, 189-230.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. (3rd ed.). Boca Raton: CRC press.
- Flores-de-Santiago, F., Kovacs, J. M., Wang, J., Flores-Verdugo, F., Zhang, C., & González-Farías, F. (2016). Examining the influence of seasonality, condition, and species composition on mangrove leaf pigment contents and laboratory based spectroscopy data. *Remote Sensing*, 8(3), 226.
- Gerald, B. (2018). A brief review of independent, dependent and one sample t-test. *International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics*, 4(2), 50-54.
- Hati, J. P., Samanta, S., Chaube, N. R., Misra, A., Giri, S., Pramanick, N., Gupta, K., Majumdar, S. D., Chanda, A., & Mukhopadhyay, A. (2021). Mangrove classification using airborne hyperspectral AVIRIS-NG and comparing with other spaceborne hyperspectral and multispectral data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 273-281.



- Hayati, A. N., Afiati, N., & Helmi, M. (2023). Carbon Sequestration of Above Ground Biomass Approach in the Rehabilitated Mangrove Stand at Jepara Regency, Central Java, Indonesia. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 15(1), 224-235.
- Intarat, K. (2018). *Remote sensing technique for mangrove studies: Tropical mangrove species classification with convolutional neural network and tropical mangrove tree biomass modelling with terrestrial laser scanner* [Thesis, Chulalongkorn]. Chulalongkorn University.
- Intarat, K., & Sillaparat, S. (2019). Tropical Mangrove Species Classification Using Random Forest Algorithm and Very High-Resolution Satellite Imagery. *BURAPHA SCIENCE JOURNAL*, 24(2), 742-753. (in Thai)
- Jing, X., Leigh, L., Helder, D., Pinto, C. T., & Aaron, D. (2019). Lifetime absolute calibration of the EO-1 Hyperion sensor and its validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(11), 9466-9475.
- Koedsin, W., & Vaiphasa, C. (2013). Discrimination of tropical mangroves at the species level with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing*, 5(7), 3562-3582.
- Kumar, T., Mandal, A., Dutta, D., Nagaraja, R., & Dadhwal, V. K. (2019). Discrimination and classification of mangrove forests using EO-1 Hyperion data: A case study of Indian Sundarbans. *Geocarto International*, 34(4), 415-442.
- L3HARRIS. (2021). ENVI 5.6. 1025 W. NASA Boulevard Melbourne, FL 32919. Licence No. E21-0076
- Lassalle, G., Ferreira, M. P., Cué La Rosa, L. E., Del'Papa Moreira Scafutto, R., & de Souza Filho, C. R. (2023). Advances in multi- and hyperspectral remote sensing of mangrove species: A synthesis and study case on airborne and multisource spaceborne imagery. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 195, 298-312.
- Li, Q., Wong, F. K. K., & Fung, T. (2021). Mapping multi-layered mangroves from multispectral, hyperspectral, and LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 258, 112403.



- Loizzo, R., Daraio, M., Guarini, R., Longo, F., Lorusso, R., Dini, L., & Lopinto, E. (2019). Prisma Mission Status and Perspective. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 4503-4506.
- Loizzo, R., Guarini, R., Longo, F., Scopa, T., Formaro, R., Facchinetti, C., & Varacalli, G. (2018). Prisma: The Italian hyperspectral mission. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 175-178.
- Mahmood, H., Ahmed, M., Islam, T., Uddin, M. Z., Ahmed, Z. U., & Saha, C. (2021). Paradigm shift in the management of the Sundarbans mangrove forest of Bangladesh: Issues and challenges. *Trees, Forests and People*, 5, 100094.
- Manjunath, K., Kumar, T., Kundu, N., & Panigrahy, S. (2013). Discrimination of mangrove species and mudflat classes using in situ hyperspectral data: a case study of Indian Sundarbans. *GIScience & remote sensing*, 50(4), 400-417.
- McLeod, E., & Salm, R. V. (2006). *Managing mangroves for resilience to climate change* (Vol.64). Gland, Switzerland: World Conservation Union (IUCN).
- Mitchell, M. (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. USA: The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Morrisette, H. K., Baez, S. K., Beers, L., Bood, N., Martinez, N. D., Novelo, K., Andrews, G., Balan, L., Beers, C. S., Betancourt, S. A., Blanco, R., Bowden, E., Burns-Perez, V., Carcamo, M., Chevez, L., Crooks, S., Feller, I. C., Galvez, G., Garbutt, K., Gongora, R., Grijalva, E., Lefcheck, J., Mahung, A., Mattis, C., McKoy, T., McLaughlin, D., Meza, J., Pott, E., Ramirez, G., Ramnarace, V., Rash, A., Rosado, S., Santos, H., Santoya, L., Sosa, W., Ugarte, G., Viamil, J., Young, A., Young, J., & Canty, S. W. J. (2023). Belize Blue Carbon: Establishing a national carbon stock estimate for mangrove ecosystems. *Science of The Total Environment*, 870, 161829.
- Muangkasem, S., Vaiphasa, C., & Intarat, K. (2022). Tropical Mangrove Species Classification Using PRISMA Hyperspectral Data: A Case Study in Talumpuk Cape, Thailand. *BURAPHA SCIENCE JOURNAL*, 27(3), 2017-2042. (in Thai)



- Panapitukkul, N., Duarte, C., Thampanya, U., Kheowongsri, P., Srichai, N., Geertz-Hansen, O., Terrados, J., & Boromthananarath, S. (1998). Mangrove colonization: mangrove progression over the growing Pak Phanang (SE Thailand) mud flat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(1), 51-61.
- Pelozo, A., T Boeger, M. R., Sereneski-de-Lima, C., & Soffiatti, P. (2016). Leaf morphological strategies of seedlings and saplings of *Rhizophora mangle* (Rhizophoraceae), *Laguncularia racemosa* (Combretaceae) and *Avicennia schaueriana* (Acanthaceae) from Southern Brazil. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), 305-317.
- Polidoro, B. A., Carpenter, K. E., Collins, L., Duke, N. C., Ellison, A. M., Ellison, J. C., Farnsworth, E. J., Fernando, E. S., Kathiresan, K., & Koedam, N. E. (2010). The loss of species: mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. *PloS one*, 5(4), e10095.
- Prasad, K.A., & Gnanappazham, L. (2014). Discrimination of mangrove species of Rhizophoraceae using laboratory spectral signatures. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. (pp. 2906-2909). IEEE.
- Ramassamy, V., & Kannabira, B. (1996). Leaf epidermis and taxonomy in Rhizophoraceae. *Indian Forester*, 122, 1049-1061.
- Rodda, S. R., Thumaty, K. C., Fararoda, R., Jha, C. S., & Dadhwal, V. K. (2022). Unique characteristics of ecosystem CO₂ exchange in Sundarban mangrove forest and their relationship with environmental factors. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 267, 107764.
- Selamat, M., Mashoreng, S., Amri, K., & Rappe, R. (2020). The use of sentinel 2A imageries to improve mangrove inventarization at coremap CTI monitoring areas. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (pp. 012065). Indonesia: IOP Publishing.



- Shen, H. K., Zhao, B. Y., Chen, M. Y., Huang, R. Y., Yu, K. F., & Liang, W. (2022). Changes of the area of *Spartina alterniflora* and mangroves in Guangxi Shankou Mangrove National Nature Reserve from 1995 to 2019. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33(2), 397-404.
- Sievers, M., Chowdhury, M. R., Adame, M. F., Bhadury, P., Bhargava, R., Buelow, C., Friess, D. A., Ghosh, A., Hayes, M. A., & McClure, E. C. (2020). Indian Sundarbans mangrove forest considered endangered under Red List of Ecosystems, but there is cause for optimism. *Biological Conservation*, 251, 108751.
- Singh, M., Griaud, C., & Collins, C. M. (2021). An evaluation of the effectiveness of protected areas in Thailand. *Ecological Indicators*, 125, 107536.
- Soeprbowati, T. R., Anggoro, S., Puryono, S., Purnaweni, H., Sularto, R. B., & Mersyah, R. (2022). Species Composition and Distribution in the Mangrove Ecosystem in the City of Bengkulu, Indonesia. *Water (Switzerland)*, 14(21).
- Suyadi, Nurdiansah, D., Renyaan, J., Hapsari, B. W., Rahayu, E. M. D., Sugiharto, A., & Ulumuddin, Y. I. (2023). Better Approaches are Required for Successful Mangrove Restoration and Rehabilitation Program. In *AIP Conference Proceedings*. (pp. 050001). Indonesia: AIP Publishing LLC.
- Teeratanom, W. (2000). *Mangroves of Pak Phanang Bay*. Bangkok: Royal Forest Department. (in Thai)
- Titisari, P. W., Elfis, E., Chahyana, I., Janna, N., Nurdila, H., & Widari, R. S. (2022). Management Strategies of Mangrove Biodiversity and the Role of Sustainable Ecotourism in Achieving Development Goals. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 7(3), 72243.
- Ullah, S., Groen, T. A., Schlerf, M., Skidmore, A. K., Nieuwenhuis, W., & Vaiphasa, C. (2012). Using a genetic algorithm as an optimal band selector in the mid and thermal infrared (2.5–14 μm) to discriminate vegetation species. *Sensors*, 12(7), 8755-8769.



- Vaiphasa, C. (2006). *Remote sensing techniques for mangrove mapping*. Wageningen University and Research.
- Vaiphasa, C., De Boer, W., Skidmore, A., Panitchart, S., Vaiphasa, T., Bamrongrugs, N., & Santitamont, P. (2007a). Impact of solid shrimp pond waste materials on mangrove growth and mortality: a case study from Pak Phanang, Thailand. *Hydrobiologia*, 591(1), 47-57.
- Vaiphasa, C., Ongsomwang, S., Vaiphasa, T., & Skidmore, A. K. (2005). Tropical mangrove species discrimination using hyperspectral data: A laboratory study. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 65(1-2), 371-379.
- Vaiphasa, C., Skidmore, A. K., & de Boer, W. F. (2006). A post-classifier for mangrove mapping using ecological data. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(1), 1-10.
- Vaiphasa, C., Skidmore, A. K., de Boer, W. F., & Vaiphasa, T. (2007b). A hyperspectral band selector for plant species discrimination. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(3), 225-235.
- Vangi, E., D'Amico, G., Francini, S., Giannetti, F., Lasserre, B., Marchetti, M., & Chirici, G. (2021). The new hyperspectral satellite PRISMA: Imagery for forest types discrimination. *Sensors*, 21(4), 1182.
- Wan, L., Lin, Y., Zhang, H., Wang, F., Liu, M., & Lin, H. (2020). GF-5 Hyperspectral Data for Species Mapping of Mangrove in Mai Po, Hong Kong. *Remote Sensing*, 12(4), 656.
- Wan, L., Zhang, H., Wang, T., Li, G., & Lin, H. (2018). Mangrove species discrimination from very high resolution imagery using gaussian markov random field model. *Wetlands*, 38(5), 861-874.
- Wang, X., Tan, L., & Fan, J. (2023). Performance Evaluation of Mangrove Species Classification Based on Multi-Source Remote Sensing Data Using Extremely Randomized Trees in Fucheng Town, Leizhou City, Guangdong Province. *Remote Sensing*, 15(5), 1386.



- Watanakij, N., & Vaiphasa, C. (2016). Improving the accuracy of mangrove species discrimination using object based and high spatial resolution imagery: A case study in Pak Phanang, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 12(3), 41-49.
- Wilkerson, S. (2008). Application of the Paired t-test. *XULAnEXUS*, 5(1), 7.
- Wirsansky, E. (2020). *Hands-on genetic algorithms with Python: applying genetic algorithms to solve real-world deep learning and artificial intelligence problems*. Packt Publishing Ltd.
- Xu, M., Sun, C., Du, Z., & Zhu, X. (2023). Impacts of aquaculture on the area and soil carbon stocks of mangrove: A machine learning study in China. *Science of The Total Environment*, 859, 160173.
- Zhang, C., Kovacs, J. M., Liu, Y., Flores-Verdugo, F., & Flores-de-Santiago, F. (2014). Separating mangrove species and conditions using laboratory hyperspectral data: A case study of a degraded mangrove forest of the Mexican Pacific. *Remote Sensing*, 6(12), 11673-11688.