



การจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อน โดยใช้ข้อมูลพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัล กรณีศึกษาบริเวณแหลมตะลุมพุก ประเทศไทย

Tropical Mangrove Species Classification Using PRISMA Hyperspectral Data:

A Case Study in Talumpuk Cape, Thailand

ศุภนิดา เมืองกเสม¹, ชัยโชค ไวกาษา^{1*} และ กฤษฏญาณ อินทรรัตน์²

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

¹ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²คณะศิลปศาสตร์ สาขาวิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

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

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

Received : 17 January 2022

Revised : 3 March 2022

Accepted : 21 March 2022

บทคัดย่อ

ป่าชายเลนที่ใกล้สูญพันธุ์ภายใต้บัญชีแดงระบบนิเวศขององค์การระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (IUCN Red List of Ecosystems) เป็นหนึ่งในปัญหาร้ายแรงที่สุดของระบบนิเวศชายฝั่งของโลก ความกังวลนี้จำเป็นต้องมีการติดตามระบบนิเวศป่าชายเลนและความหลากหลายทางสายพันธุ์ ภาพถ่ายดาวเทียมระบบไฮเปอร์สเปกตรัลที่มีความยาวคลื่นหลายร้อยช่วงคลื่นสามารถนำมาใช้จำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนได้ ดาวเทียม PRISMA ถูกพัฒนาและส่งขึ้นโคจรซึ่งเป็นดาวเทียมสังเกตการณ์โลกดวงใหม่ภายใต้โครงการสาธิตเทคโนโลยีขององค์การอวกาศอิตาลี (Italian Space Agency) ที่ปัจจุบันยังไม่มี การนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมดังกล่าวมาใช้จำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนในพื้นที่แหลมตะลุมพุกมาก่อน งานวิจัยนี้จึงเป็นการทดสอบประสิทธิภาพข้อมูลพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัลเพื่อจำแนกป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุก อำเภอปากพะนัง จังหวัด นครศรีธรรมราชเป็นครั้งแรก ในการจำแนกใช้การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย genetic algorithm (GA) และ sequential maximum angle convex cone (SMACC) ร่วมกับตัวจำแนกแบบ spectral angle mapper (SAM) เพื่อเลือกความถูกต้องมากที่สุด ทั้งนี้ ผลการจำแนกจากการคัดเลือกช่วงคลื่นทั้งสองแบบและการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน โดยใช้ค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) และใช้ค่าสถิติการทดสอบ dependent sample t-test ผลการศึกษาพบว่าการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA สามารถปรับปรุงค่าความถูกต้องในการจำแนกเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80.72 เป็นร้อยละ 81.93 เมื่อเทียบกับการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมด ผลลัพธ์นี้จึงพิสูจน์ถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ในการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : ข้อมูลพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัล ; การรับรู้จากระยะไกล ; การจำแนก ; ป่าชายเลน ; องค์ประกอบชนิด



Abstract

Endangered mangroves under the IUCN Red List of Ecosystems are one of the most severe issues of the world's coastal ecosystems. This concern required the necessary monitoring for mangrove ecosystems and their diversity. Hyperspectral satellite imagery is associated with hundreds of wavelengths can be used to categorize mangrove species. Therefore, this is an excellent opportunity for a new earth observation hyperspectral satellite, PRISMA, delivered by the Italian Space Agency. Currently, PRISMA information has not been previously used for mangrove species classification in Talumpuk cape. This experiment launched the first-time examination of applying PRISMA hyperspectral on mangroves species categorization in Talumpuk cape, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province. In the classification, two spectral band selectors, genetic algorithm (GA) and sequential maximum angle convex cone (SMACC), were associated with the spectral angle mapper (SAM) classifier to determine the most satisfactory hyperspectral band set. Classifications from those two selectors and entire bands were compared using overall accuracy and dependent sample t-test. The result revealed that the GA band selection could improve the classification accuracy from 80.72% to 81.93% compared to the entire band combination. This outcome undoubtedly proves the performance of PRISMA imagery's application on mangrove species classification.

Keywords : PRISMA hyperspectral data ; remote sensing ; classification ; mangrove ; species composition



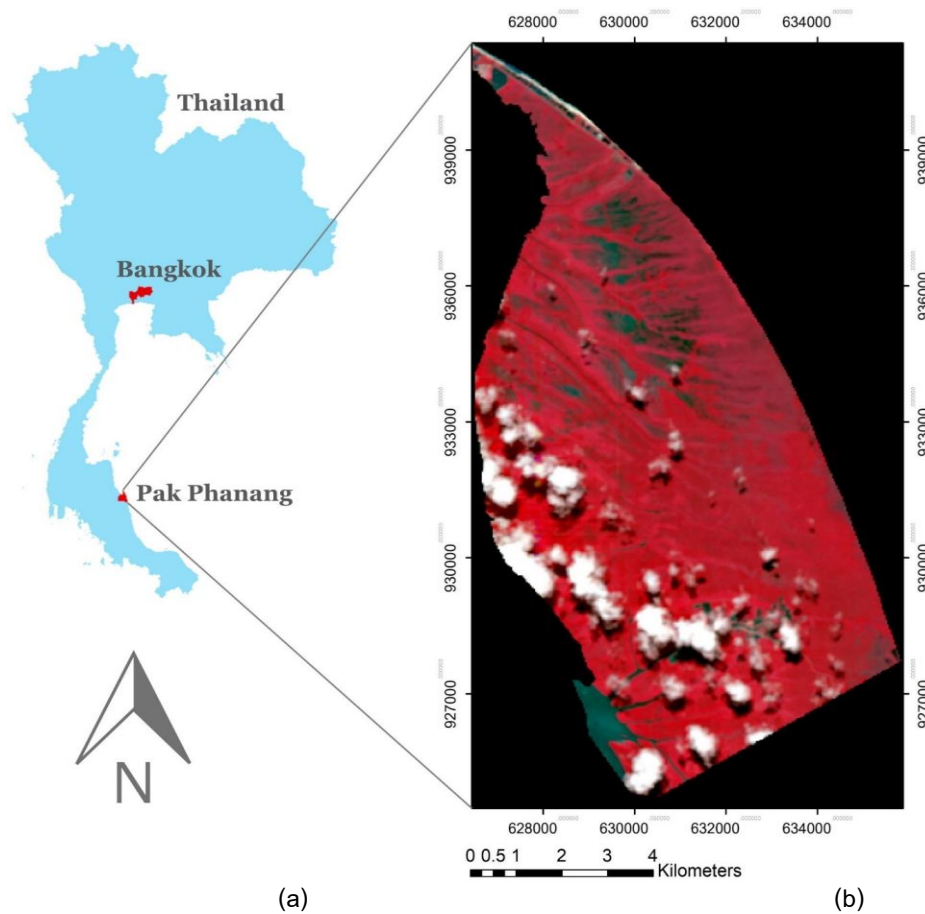
บทนำ

ป่าชายเลนจัดเป็นสังคมพืชเขตร้อนประกอบด้วยพันธุ์ไม้ไม่ผลัดใบที่มีใบเขียวชอุ่มตลอดปี (Evergreen species) พบในบริเวณดินเลนน้ำกร่อยและมีน้ำทะเลท่วมถึงอย่างสม่ำเสมอ (Friis & Burt, 2020; Collins *et al.*, 2021; Da Silva *et al.*, 2021) ป่าชายเลนสร้างความหลากหลายทางชีวภาพ เพราะเป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนและที่อยู่อาศัยของสัตว์หลายชนิด ทั้งยังช่วยรักษาคุณภาพของระบบนิเวศชายฝั่งทำหน้าที่ดูดซับสิ่งปฏิกูลและสารมลพิษไม่ให้ไหลลงสู่ทะเล เป็นฉากรักษาภัยธรรมชาติตลอดจนเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่สำคัญของโลก (Murugan & Anandhi, 2016; Adame *et al.*, 2021; Fauzi *et al.*, 2020; Intarat & Vaiphasa, 2020; Bai *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ผ่านมาพบว่าป่าชายเลนถูกคุกคามจากการให้สัมปทานกับเอกชน การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและปัญหาการรุกรานของชนิดพันธุ์ต่างถิ่น (Invasive alien species) ทั้งยังเผชิญกับปรากฏการณ์ ENSO ที่มีผลต่อความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล (Vaiphasa *et al.*, 2007a; Chakraborty, 2019; Sievers *et al.*, 2020; Constance *et al.*, 2021; Halder *et al.*, 2021a; Hickey *et al.*, 2021; Mahmood *et al.*, 2021; Thuy *et al.*, 2021) ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ป่าชายเลนต้องปรับตัวทางสรีรวิทยาเพื่อให้อยู่รอดได้ในสภาพแวดล้อมที่แปรผันได้ ส่วนพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่ปรับตัวไม่ได้จึงเสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ (Basyuni *et al.*, 2019) ด้วยเหตุดังกล่าวของค์กรภาครัฐและเอกชนทั่วโลกจึงพยายามเร่งฟื้นฟูและอนุรักษ์พื้นที่ป่าชายเลนอย่างต่อเนื่อง (Vaiphasa *et al.*, 2007a, as cited in Cochard, 2017; Sievers *et al.*, 2020; Mahmood *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021; Thuy *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021) ทำให้ข้อมูลการจำแนกป่าชายเลนระดับสายพันธุ์จึงมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการศึกษาโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงของป่าชายเลน อันนำไปสู่การกำหนดแผนยุทธศาสตร์เพื่ออนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลนอย่างยั่งยืน (Vaiphasa, 2006, as cited in McLeod & Salm, 2006) ในขณะเดียวกันป่าชายเลนมีการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัตทำให้เสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ จึงจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างป่าตามหลักการของ IUCN Red List of Ecosystems (Sievers *et al.*, 2020) ดังนั้นการจำแนกป่าชายเลนจึงนิยมใช้เทคนิคการรับรู้จากระยะไกลเป็นหลักเพื่อตรวจสอบความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (Vaiphasa *et al.*, 2005; Vaiphasa *et al.*, 2006; Vaiphasa *et al.*, 2007b; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Intarat, 2018; Xia *et al.*, 2020; Halder *et al.*, 2021b)

การจำแนกป่าชายเลนระดับสายพันธุ์ มีการเก็บตัวอย่างใบของพันธุ์ไม้ป่าชายเลนแต่ละชนิดมาหาค่าการสะท้อนของช่วงคลื่นต่าง ๆ ภายในห้องปฏิบัติการ (Leaf spectral measurements) โดยใช้เทคนิคการรับรู้จากระยะไกลแบบไฮเปอร์สเปกตรัล (Vaiphasa *et al.*, 2005) เมื่อต้องการลดทอนช่วงคลื่นที่มีมิติสูง จึงได้นำกระบวนการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมที่สัมพันธ์กับคุณลักษณะทางสรีรเคมีของพืช (Physio-chemical characteristics of plants) (Vaiphasa *et al.*, 2007b) ต่อมามีการนำภาพถ่ายดาวเทียมระบบหลายช่วงคลื่น (Multispectral imaging system) เพื่อจำแนกป่าชายเลนที่มีความหลากหลายของสายพันธุ์ โดยใช้ข้อมูลด้านนิเวศวิทยา (Ecological data) มาช่วยจำแนก (Vaiphasa *et al.*, 2006) ระยะหลังไฮเปอร์สเปกตรัลเซนเซอร์มีวิวัฒนาการที่ทันสมัยขึ้น จึงเริ่มมีการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion ที่มีช่วงคลื่นต่อเนื่องกันหลายร้อยช่วงคลื่น มาจำแนกป่าชายเลนระดับสายพันธุ์ร่วมกับการใช้อัลกอริทึมหลากหลายรูปแบบเพื่อปรับปรุงค่า

ความถูกต้องของผลการจำแนก (Koedsin & Vaiphasa, 2013; Wong & Fung, 2014; Salghuna & Pillutla, 2017; Kumar *et al.*, 2019; He *et al.*, 2020; Wan *et al.*, 2020)

ดาวเทียมสังเกตการณ์โลกดวงใหม่ถูกพัฒนาและส่งขึ้นโคจรซึ่งเปิดตัวเมื่อวันที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2562 (Launched on orbit) ที่มีชื่อว่าดาวเทียม PRISMA (Precursore Iperspettrale della Missione Applicativa) ซึ่งจัดเป็นภารกิจใหม่ล่าสุดภายใต้โครงการสาริตเทคโนโลยีขององค์การอวกาศอิตาลี PRISMA เป็นดาวเทียมที่ใช้ไฮเปอร์สเปกตรัลเซนเซอร์ร่วมกับกล้องถ่ายภาพขาว-ดำ (Panchromatic camera) (Loizzo *et al.*, 2018; Loizzo *et al.*, 2019) จึงสามารถใช้ทดแทนดาวเทียมระบบ Hyperion ที่ถูกปลดประจำการไปแล้วเมื่อวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2560 (Jing *et al.*, 2019) เป็นที่แน่นอนว่ายังไม่เคยมีงานวิจัยที่นำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA มาจำแนกป่าชายเลนบริเวณแหลมตะดุมพุกมาก่อน จึงเป็นเรื่องน่าสนใจสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการจำแนกป่าชายเลนที่ได้จากข้อมูลพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัล



ภาพที่ 1 (a) ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะดุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
(b) ภาพผสมสีเท็จของข้อมูลพริสมาไฮเปอร์สเปกตรัล ถ่ายเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2564



งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจำแนกป่าชายเลนในระดับสายพันธุ์ด้วยตัวจำแนกแบบ SAM (Koedsin & Vaiphasa, 2013) โดยใช้ทดสอบกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA บริเวณแหลมตะลุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้เทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ซึ่งเคยได้ทดลองไว้ในขนาดโครโมโซมที่ 2 ถึง 9 (Koedsin & Vaiphasa, 2013) แต่ในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนขนาดของโครโมโซมใหม่โดยทดลองใช้ขนาดโครโมโซมตั้งแต่ 4 ถึง 13 จากนั้นใช้เทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC ก่อนนำข้อมูลภาพไปจำแนกแบบ SAM และตรวจสอบ overall accuracy (OA) พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างด้วย dependent sample t-test อย่างไรก็ตามการเลือกใช้วิธีการจำแนกป่าชายเลนที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion กับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้รับการตั้งเป็นเขตห้ามล่าสัตว์ป่าแหลมตะลุมพุกตามพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่า พ.ศ. 2503 มีพื้นที่ 56.73 ตารางกิโลเมตร ตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์ ละติจูด $8^{\circ} 31'$ เหนือ และลองจิจูด $100^{\circ} 9'$ ตะวันออก (ภาพที่ 1) ครอบคลุม 2 ตำบลในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่ ตำบลปากพนังฝั่งตะวันออกและตำบลแหลมตะลุมพุก โดยทับซ้อนกับเขตป่าสงวนแห่งชาติ 2 ส่วน ได้แก่ (1) เขตป่าสงวนแห่งชาติป่าปลายแหลมตะลุมพุก และ (2) เขตป่าสงวนแห่งชาติป่าเลนปากพนังฝั่งตะวันออกและป่าเลนเกาะไชย (MOAC, 1965; Khamprakop, 1975; Teeratanatorn, 2000) ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุกมีพันธุ์ไม้ป่าชายเลน 11 วงศ์ 23 ชนิด โดยเป็นพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่โดดเด่น (Dominant mangrove species) 5 สายพันธุ์ ประกอบด้วย โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*, RM) โกงกางใบเล็ก (*Rhizophora apiculata*, RA) แสมทะเล (*Avicennia marina*, AM) แสมขาว (*Avicennia alba*, AA) และถั่วดำ (*Bruguiera parviflora*, BP) (Koedsin & Vaiphasa, 2013)

2. ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและการประมวลผลภาพจากดาวเทียม PRISMA

ข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากภาพถ่ายจากดาวเทียม PRISMA ครอบคลุมพื้นที่ป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุก อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช สังกัดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2564 เวลา 07.35 น. (ตามเวลาของประเทศอิตาลี) ในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ละติจูด $8.4446^{\circ} N$ และลองจิจูด $100.1825^{\circ} E$ สังกัดเป็น spot image 30×30 กิโลเมตร start epoch: 6/5/2564 เวลา 12.00 น. และ stop epoch: 13/5/2564 เวลา 12.00 น. กำหนด look angle min/max เท่ากับ -20.7 และ 20.7 ตามลำดับ

**ตารางที่ 1** คุณลักษณะสำคัญของภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA Level 1 ดัดแปลงจาก Vangi *et al.* (2021)

Feature	Description
Available product	Top-of-Atmosphere Spectral Radiance; Cloud mask; Sun-glint Mask; Calibration and characterization data used; Classification Mask
Inventory date/ Sun zenith angle	2021-05-11 08:32:26.972Z/ 23.974°
Orbit altitude reference/ Swath	615 km/ 30 km
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

ภายหลังจากการส่งภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ได้ทำการบันทึกข้อมูลภาพเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2564 cloud coverage ร้อยละ 6.04 สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นภาพถ่าย Level 1 (ตารางที่ 1) โดยพิจารณาที่ hyperspectral cubes (VNIR cube และ SWIR cube) เป็นสำคัญ จากนั้นปรับแก้ข้อมูลชั้นบรรยากาศด้วยแบบจำลอง 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) โดยเลือกใช้ช่วงคลื่นจำนวน 170 ช่วงคลื่น จากช่วงคลื่นทั้งหมด 240 ช่วงคลื่น ของภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA (Loizzo *et al.*, 2018) และทำการ de-streaking เพื่อกำจัดริ้วในแนวตั้ง (Vertical striping) พร้อมทั้งกำหนดพิกัดภาพถ่ายด้วยระบบพิกัดพื้นฐานอ้างอิงแบบ World Geodetic System 1984 (WGS84) ระบบพิกัด UTM Zone 47 North ก่อนนำข้อมูลภาพไปจำแนก

3. การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ดำเนินการเก็บข้อมูลภาคสนามในเดือนกุมภาพันธ์และมีนาคม พ.ศ. 2554 โดยวางแผนขนาด 30 x 30 เมตร เลือกข้อมูลในแปลงทดสอบจำนวน 100 แปลง โดยในแต่ละแปลงบันทึกพันธุ์ไม้ที่มีความสูงเกิน 2.5 เมตร จากนั้นจึงนำข้อมูลพันธุ์ไม้ในแต่ละแปลงทั้งหมดมาจัดกลุ่มด้วยเทคนิค grow อีกครั้ง ซึ่งอ้างอิงจากพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่โดดเด่น 5 สายพันธุ์ที่พบในพื้นที่ศึกษา ข้อมูลภาคสนามที่บันทึกได้มีช่วงเวลาห่างจากวันที่บันทึกภาพถ่ายดาวเทียม EO-1 Hyperion ประมาณ 8 เดือน (ภาพถ่ายดาวเทียมถูกบันทึกเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน 2553) (Koedsin & Vaiphasa, 2013) ต่อมางานวิจัยของ Intarat (2018)



ได้ลงสำรวจภาคสนามใหม่เพิ่มเติมในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 เพื่อเก็บข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้อง จากการศึกษาของ Vaiphasa *et al.* (2006); Koedsin & Vaiphasa (2013); Intarat (2018) พบว่าในช่วงเวลาบันทึกภาพถ่ายดาวเทียมจนถึงการเก็บข้อมูลภาคสนามพันธุ์ไม้ป่าชายเลนในพื้นที่ศึกษามีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ (Panapitukkul *et al.*, 1998) เนื่องจากบริเวณแหลมตะลุมพุกเป็นป่าปลูกและพื้นที่ป่าอนุรักษ์รวมถึงมีประชาชนตั้งถิ่นฐานอยู่ด้วย ทั้งยังถูกกำหนดขอบเขตอย่างชัดเจนไม่ให้เกิดการบุกรุกส่งผลให้ป่าชายเลนมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ จึงนำข้อมูลภาคสนามจาก Koedsin & Vaiphasa (2013) มาปรับปรุง (ตารางที่ 2) โดยใช้ร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA Level 1

ตารางที่ 2 จำนวนตัวอย่างชุดข้อมูลการสอนและชุดข้อมูลการทดสอบต่อสายพันธุ์

ชื่อพันธุ์ไม้ป่าชายเลน	Mangroves Species	Abbreviations	Training Samples	Testing Samples
โกงกางใบใหญ่	<i>Rhizophora mucronata</i>	RM	38	33
โกงกางใบเล็ก	<i>Rhizophora apiculata</i>	RA	51	27
แสมทะเล	<i>Avicennia marina</i>	AM	44	44
แสมขาว	<i>Avicennia alba</i>	AA	30	30
ถั่วดำ	<i>Bruguiera parviflora</i>	BP	38	32
Total			201	166

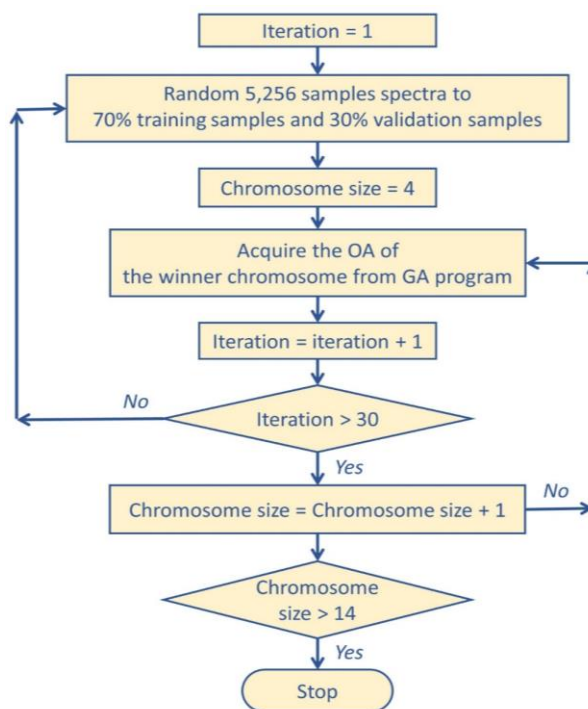
4. การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นวิธีการค้นหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solutions) ในการแก้ปัญหาที่มีลักษณะการทำงานผ่านการนำข้อมูลเข้ารหัสเรียกว่าโครโมโซม โดยใช้ฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) ที่สอดคล้องกับปัญหาเพื่อพิจารณาค่าความเหมาะสม (Fitness value) ของโครโมโซม จากนั้นใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมมากระทำกับโครโมโซมจนกระทั่งได้โครโมโซมรุ่นใหม่ที่ดีที่สุดหรือจุดสิ้นสุด หากพบว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมกับปัญหามากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความถูกต้องโดยรวมของชุดข้อมูลการสอน (Training samples) ที่จำแนกด้วย SAM แต่ละขนาดโครโมโซม เมื่อค่าความถูกต้องเกินร้อยละ 85.00 ต่อเนื่องกันเป็นจำนวน 10 รุ่น (Generation) จึงหยุดคำนวณ (Ullah *et al.*, 2012; Koedsin & Vaiphasa, 2013) เนื่องด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถปรับขนาดของโครโมโซมได้อย่างอิสระและมีความยืดหยุ่นในการกำหนดพารามิเตอร์ (Mitchell, 1998; Bandyopadhyay & Pal, 2001; Vaiphasa *et al.*, 2007b; Ullah *et al.*, 2012; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Wirsansky, 2020) งานวิจัยนี้จึงทดลองเปลี่ยนขนาดของโครโมโซมตั้งแต่ 4 ถึง 13 เพื่อหาขนาดโครโมโซมหรือจำนวนช่วงคลื่นที่เหมาะสมที่สุดในการจำแนกป่าชายเลนระดับสายพันธุ์ โดยสุ่มตัวอย่างข้อมูลการสอนจำนวน 5,256 ข้อมูล (ทั้งหมด 30 ชุด) แบ่งเป็นข้อมูลการสอนโมเดล (Training samples) ร้อยละ 70.00 และข้อมูลการตรวจสอบโมเดล (Validation samples) ร้อยละ 30.00 ด้วยวิธีการสุ่มแบบเลือกลำดับชั้นภูมิ (Stratified random

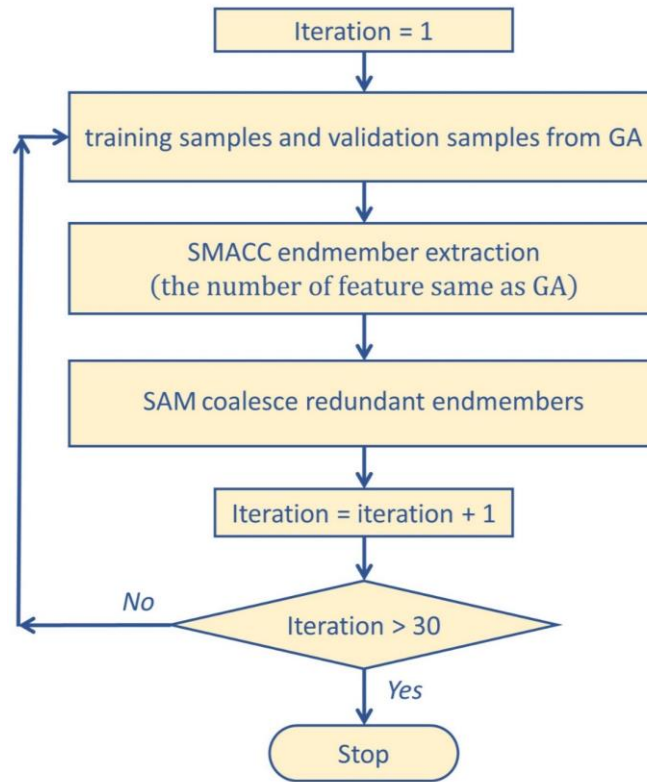
sampling) (Wan *et al.*, 2020) พร้อมทั้งกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบให้จำนวนประชากร (Population) เท่ากับ 10 และจำนวนรุ่นสูงสุดเท่ากับ 30 (รอบการทำซ้ำ) โดยใช้การคัดเลือกแบบ stochastic universal sampling (Jannoud *et al.*, 2022) โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดจะถูกรายงาน จากนั้นจึงหาค่าความถูกต้องของการจำแนกจากข้อมูลทดสอบ (Testing samples) เพื่อใช้เปรียบเทียบหาขนาดของโครโมโซมที่เหมาะสมต่อไป (ภาพที่ 2)

5. การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย *sequential maximum angle convex cone*

การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC มีลักษณะการทำงานเพื่อสกัดหา endmembers โดยใช้แบบจำลองรูปกรวยหมุนให้ผลลัพธ์ที่มีค่าประมาณมากแต่มีความแม่นยำน้อยเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสม (Band-selection) ของข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัล (Gruninger *et al.*, 2004; Thompson *et al.*, 2010) ดังนั้นเพื่อให้ผลการเปรียบเทียบที่ได้ไม่มีความลำเอียง (Bias) จึงกำหนดจำนวนช่วงคลื่นให้เท่ากับจำนวนช่วงคลื่นที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม พร้อมทั้งกำหนดข้อมูลการสอนและข้อมูลทดสอบให้เป็นข้อมูลชุดเดียวกันทั้งหมด 30 ชุด (Koedsin & Vaiphasa, 2013) (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 2 ผังงานแสดงการหาขนาดโครโมโซมที่เหมาะสม ดัดแปลงจาก Koedsin & Vaiphasa (2013)



ภาพที่ 3 ผังงานแสดงการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC

6. การทดสอบทางสถิติ

ผลลัพธ์สุดท้ายของการจำแนก (ค่า OA และ Kappa) ด้วยตัวจำแนกแบบ SAM ภายหลังจากการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA และ SMACC 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 $\alpha/2$ คือระดับความเชื่อมั่นทางสถิติค่า t แบบ 2 ทาง มีองศาอิสระเป็นค่าอนันต์ (Wilkerson, 2008; Koedsin & Vaiphasa, 2013; Gerald, 2018)

ผลการวิจัย

1. ผลการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

จากการทดลองหาขนาดของโครโมโซมตั้งแต่ 4 ถึง 13 เพื่อคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมจำนวน 30 ครั้งในแต่ละขนาดโครโมโซม พบว่าค่าความถูกต้องโดยรวมเฉลี่ยของข้อมูลทดสอบในแต่ละขนาดโครโมโซมเท่ากับร้อยละ 67.47, ร้อยละ 57.67,



ร้อยละ 66.99, ร้อยละ 74.86, ร้อยละ 75.38, ร้อยละ 74.08, ร้อยละ 74.18, ร้อยละ 77.02, ร้อยละ 77.06 และร้อยละ 65.32 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) โดยกรณีขนาดโครโมโซมเท่ากับ 9 ให้ค่าความถูกต้องโดยรวม (OA) ของข้อมูลทดสอบมากที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 81.93 (ตารางที่ 4) ได้แก่ ช่วงคลื่น 434 nm, 500 nm, 614 nm, 876 nm, 1163 nm, 1726 nm, 2052 nm, 2086 nm และ 2214 nm โดยสามารถรายงานค่าความเหมาะสมของโครโมโซมอยู่ที่ร้อยละ 99.00

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy, OA) ในแต่ละขนาดโครโมโซม (Chromosome sizes) ตั้งแต่ 4 ถึง 13 (จำนวนช่วงคลื่น) โดยใช้การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm, GA)

Runs	Overall accuracy of chromosome sizes (%)									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	61.4458	55.4217	60.8434	70.4819	72.8916	68.0723	66.8675	74.6988	75.3012	54.8193
2	68.6747	60.2410	70.4819	76.5060	77.1084	75.9036	79.5181	77.7108	77.7108	68.0723
3	70.4819	57.2289	68.6747	74.6988	76.5060	74.6988	75.9036	78.3133	77.7108	66.2651
4	71.6867	66.2651	68.6747	75.3012	74.0964	71.6867	74.6988	75.9036	76.5060	68.6747
5	62.0482	49.3976	55.4217	71.0843	75.3012	73.4940	67.4699	74.6988	74.6988	51.2048
6	71.0843	61.4458	71.0843	74.0964	75.3012	72.2892	74.6988	77.7108	77.7108	66.8675
7	66.8675	53.6145	70.4819	75.9036	76.5060	76.5060	77.1084	78.9157	78.9157	63.8554
8	69.8795	58.4337	71.6867	75.3012	75.3012	74.6988	77.1084	78.9157	78.9157	68.6747
9	71.0843	59.6386	68.6747	75.3012	72.8916	69.8795	72.2892	76.5060	77.7108	68.0723
10	63.8554	55.4217	60.8434	75.9036	75.3012	75.3012	72.8916	75.7576	78.9157	54.8193
11	66.8675	59.0361	70.4819	75.3012	77.7108	78.3133	78.9157	80.7229	80.1205	68.6747
12	72.2892	64.4578	72.8916	74.0964	73.4940	71.6867	71.6867	78.3133	78.3133	63.2530
13	71.6867	63.2530	72.8916	76.5060	76.5060	73.4940	76.5060	78.3133	78.3133	66.8675
14	69.2771	59.6380	66.2651	74.0964	74.6988	71.6867	73.4940	75.3012	74.6988	67.4699
15	61.4458	57.2289	59.6386	72.2892	72.2892	72.8916	71.0843	72.2892	72.8916	63.2530
16	68.0723	62.0482	68.0723	78.9157	80.1205	76.5060	75.9036	79.5181	78.9157	69.2771
17	66.2651	56.0241	59.0361	72.2892	79.5181	77.7108	74.0964	74.6988	74.6988	63.2530
18	65.6627	56.0241	65.6627	73.4940	72.2892	70.4819	70.4819	74.6988	75.9036	65.0602
19	68.0723	58.4337	70.4819	77.1084	76.5060	78.3133	78.3133	80.1205	78.3133	68.6747
20	68.6747	55.4217	63.2530	78.3133	79.5181	81.9277	78.3133	77.1084	77.7108	69.8795
21	65.0602	55.4217	71.0843	74.0964	74.6988	75.9036	71.6867	77.7108	78.3133	62.0482
22	68.0723	54.8193	71.6867	74.6988	75.9036	75.3012	77.7108	78.3133	77.7108	68.6747
23	65.0602	60.8434	65.6627	74.6988	72.8916	73.4940	73.4940	75.3012	74.6988	69.8795
24	66.8675	59.6386	66.8675	76.5060	76.5060	80.1205	78.3133	78.3133	77.7108	71.0843



ตารางที่ 3 (ต่อ) เปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy, OA) ในแต่ละขนาดโครโมโซม (Chromosome sizes) ตั้งแต่ 4 ถึง 13 (จำนวนช่วงคลื่น) โดยใช้การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm, GA)

Runs	Overall accuracy of chromosome sizes (%)									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25	69.2771	53.0120	69.2771	75.9036	74.6988	72.2892	77.1084	77.7108	77.7108	68.0723
26	69.2771	57.8313	69.2771	76.5060	75.9036	71.6867	78.9157	78.9157	78.9157	69.2771
27	68.0723	58.4337	66.8675	75.3012	74.6988	72.8916	74.6988	77.1084	75.9036	71.6867
28	63.8554	53.6145	69.2771	71.6867	72.2892	67.4699	68.0723	74.0964	74.9064	55.4217
29	62.0482	52.4096	52.4096	75.3012	74.0964	74.6988	63.2530	75.3012	74.6988	57.2289
30	71.0843	55.4217	71.6867	74.0964	75.9036	72.8916	74.6988	77.7108	77.1084	69.2771
Average	67.4699	57.6707	66.9880	74.8594	75.3815	74.0763	74.1767	77.0233	77.0551	65.3213

2. ผลการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย sequential maximum angle convex cone

ผลการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC ถูกจำกัดจำนวนช่วงคลื่นไว้เป็น 9 ช่วงคลื่นเท่ากับจำนวนช่วงคลื่นที่ได้จากผลการทดลองด้วยวิธี GA ทั้งยังใช้ข้อมูลการสอนและข้อมูลทดสอบที่เป็นชุดเดียวกันกับข้อมูลที่ใช้ในวิธี GA ด้วย พบว่าในกรณีขนาดโครโมโซมเท่ากับ 9 ได้แก่ ช่วงคลื่น 426 nm, 546 nm, 770 nm, 1088 nm, 1174 nm, 1250 nm, 1295 nm, 1523 nm และ 1755 nm ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมเฉลี่ยของข้อมูลทดสอบเท่ากับร้อยละ 68.47 และค่าความถูกต้องโดยรวมของข้อมูลทดสอบที่มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 78.92 (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy, OA) และสัมประสิทธิ์แคปปาแฮท (Kappa hat coefficient, Kappa) ของการจำแนกป้ายชายเลนระหว่างการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วย genetic algorithm (GA) และ sequential maximum angle convex cone (SMACC)

Runs	Overall accuracy (%)		Kappa hat coefficient	
	GA	SMACC	GA	SMACC
1	68.0723	64.4578	0.5936	0.5489
2	75.9036	71.0843	0.6956	0.6339
3	74.6988	71.6867	0.6807	0.6424
4	71.6867	74.6988	0.6426	0.6802
5	73.4940	56.0241	0.6626	0.4440
6	72.2892	76.5060	0.6508	0.7029
7	76.5060	72.8916	0.7027	0.6579



ตารางที่ 4 (ต่อ) เปรียบเทียบค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy, OA) และสัมประสิทธิ์แคปปาแฮท (Kappa hat coefficient, Kappa) ของการจำแนกภาพถ่ายดาวเทียมระหว่างการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วย genetic algorithm (GA) และ sequential maximum angle convex cone (SMACC)

Runs	Overall accuracy (%)		Kappa hat coefficient	
	GA	SMACC	GA	SMACC
8	74.6988	74.0964	0.6809	0.6721
9	69.8795	74.0964	0.6200	0.6726
10	75.3012	62.0482	0.6861	0.5193
11	78.3133	69.8795	0.7255	0.6199
12	71.6867	78.9157	0.6435	0.7336
13	73.4940	77.1084	0.6656	0.7101
14	71.6867	68.0723	0.6428	0.5952
15	72.8916	60.2410	0.6562	0.4961
16	76.5060	73.4940	0.7037	0.6654
17	77.7108	59.6386	0.7167	0.4897
18	70.4819	66.8675	0.6267	0.5813
19	78.3133	69.2771	0.7253	0.6115
20	81.9277	60.8434	0.7712	0.5056
21	75.9036	67.4699	0.6950	0.5872
22	75.3012	70.4819	0.6880	0.6268
23	73.4940	65.6627	0.6654	0.5657
24	80.1205	69.8795	0.7482	0.6186
25	72.2892	69.2771	0.6497	0.6115
26	71.6867	70.4819	0.6423	0.6265
27	72.8916	66.2651	0.6579	0.5737
28	67.4699	63.2530	0.5863	0.5326
29	74.6988	56.6265	0.6790	0.4518
30	72.8916	72.8916	0.6580	0.6566

3. ผลการจำแนกภาพถ่าย

ผลการจำแนกและเมตริกซ์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะกรณีที่ให้ผลการจำแนกสูงสุดของการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA (ตารางที่ 5) การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC (ตารางที่ 6) และการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA 170 ช่วงคลื่น (ตารางที่ 7) พบว่าปรับปรุงค่าความถูกต้องโดยรวมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80.72 เป็นร้อยละ 81.93 เมื่อใช้การ

คัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA ซึ่งเป็นความถูกต้องที่เพิ่มขึ้นจากคลาสของต้นโกกวางใบใหญ่และต้นถั่วดำ (ภาพที่ 5) เพราะความแตกต่างของปริมาณเม็ดสีใบป่าชายเลน เช่น คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์และลิกนิน ความแตกต่างจากความหนาของเนื้อเยื่อคลอโรฟิลล์ ทำให้ค่าการสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 350 nm ถึง 700 nm รวมทั้งแถบสเปกตรัม NIR และ SWIR ของพันธุ์ไม้ป่าชายเลนในวงศ์ RHIZOPHORACEAE ยังคงมีความต่างกันในระดับสายพันธุ์ (Manjunath, 2013, as cited in Prasad & Gnanappazham, 2014) เป็นผลให้ช่วงคลื่น 434 nm, 500 nm, 614 nm, 876 nm, 1163 nm, 1726 nm, 2052 nm, 2086 nm และ 2214 nm อาจเป็นช่วงคลื่นที่เหมาะสมในการจำแนกต้นโกกวางใบใหญ่และต้นถั่วดำออกจากพันธุ์ไม้ชนิดอื่นได้อย่างไรก็ตามค่าความถูกต้องโดยรวมลดลงเป็นร้อยละ 78.92 เมื่อใช้การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC

ตารางที่ 5 เมทริกซ์ความคลาดเคลื่อนกรณี (a) การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA (OA ร้อยละ 81.93)

		ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม					ผลรวม	ความถูกต้องของผู้ใช้ (ร้อยละ)	ความถูกต้องของผู้ผลิต (ร้อยละ)
		RM	RA	AM	AA	BP			
ผลการจำแนกกรณี (a)	RM	29	7	0	0	0	36	80.56	87.88
	RA	1	14	0	2	0	17	82.35	51.85
	AM	1	1	44	1	3	50	88.00	100.00
	AA	1	2	0	27	7	37	72.97	90.00
	BP	1	3	0	0	22	26	84.62	68.75
	ผลรวม	33	27	44	30	32	166		

ตารางที่ 6 เมทริกซ์ความคลาดเคลื่อนกรณี (b) การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC (OA ร้อยละ 78.92)

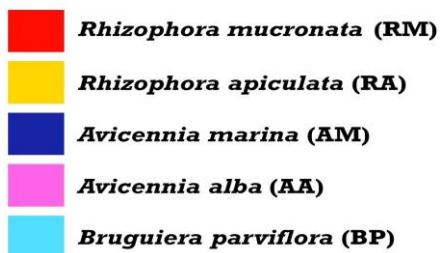
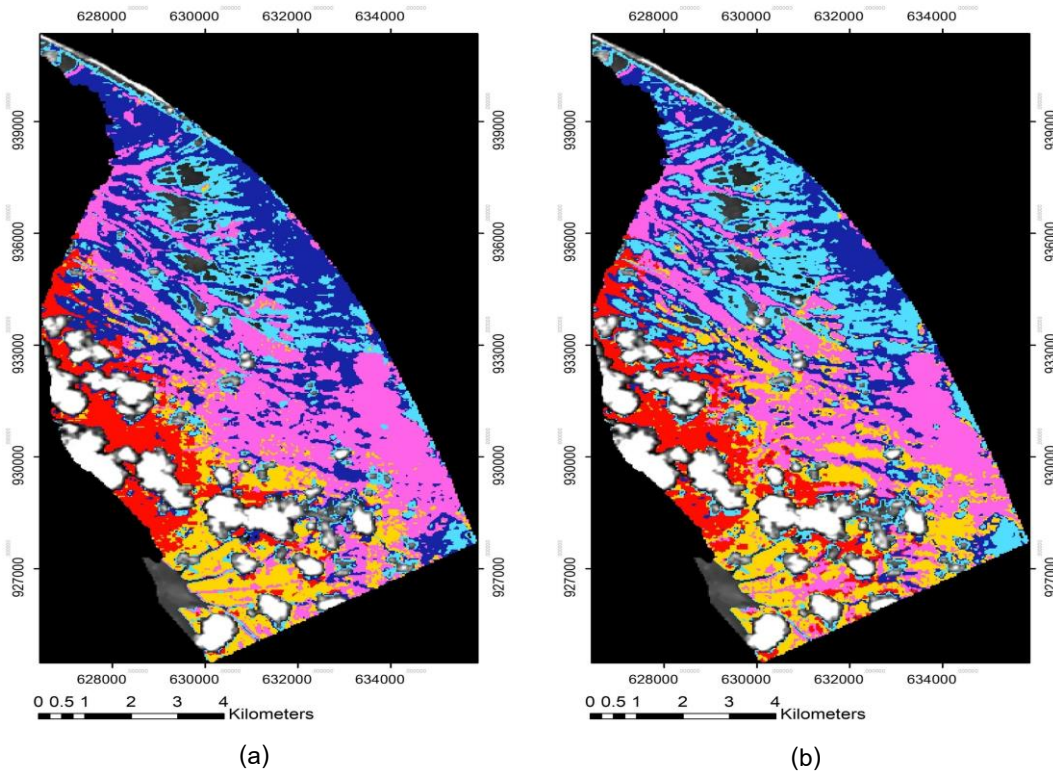
		ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม					ผลรวม	ความถูกต้องของผู้ใช้ (ร้อยละ)	ความถูกต้องของผู้ผลิต (ร้อยละ)
		RM	RA	AM	AA	BP			
ผลการจำแนกกรณี (b)	RM	29	8	0	0	0	37	78.38	87.88
	RA	2	14	0	2	1	19	73.68	51.85
	AM	0	1	40	1	5	47	85.11	90.91
	AA	0	2	0	27	5	34	79.41	90.00
	BP	2	2	4	0	21	29	72.41	65.63
	ผลรวม	33	27	44	30	32	166		



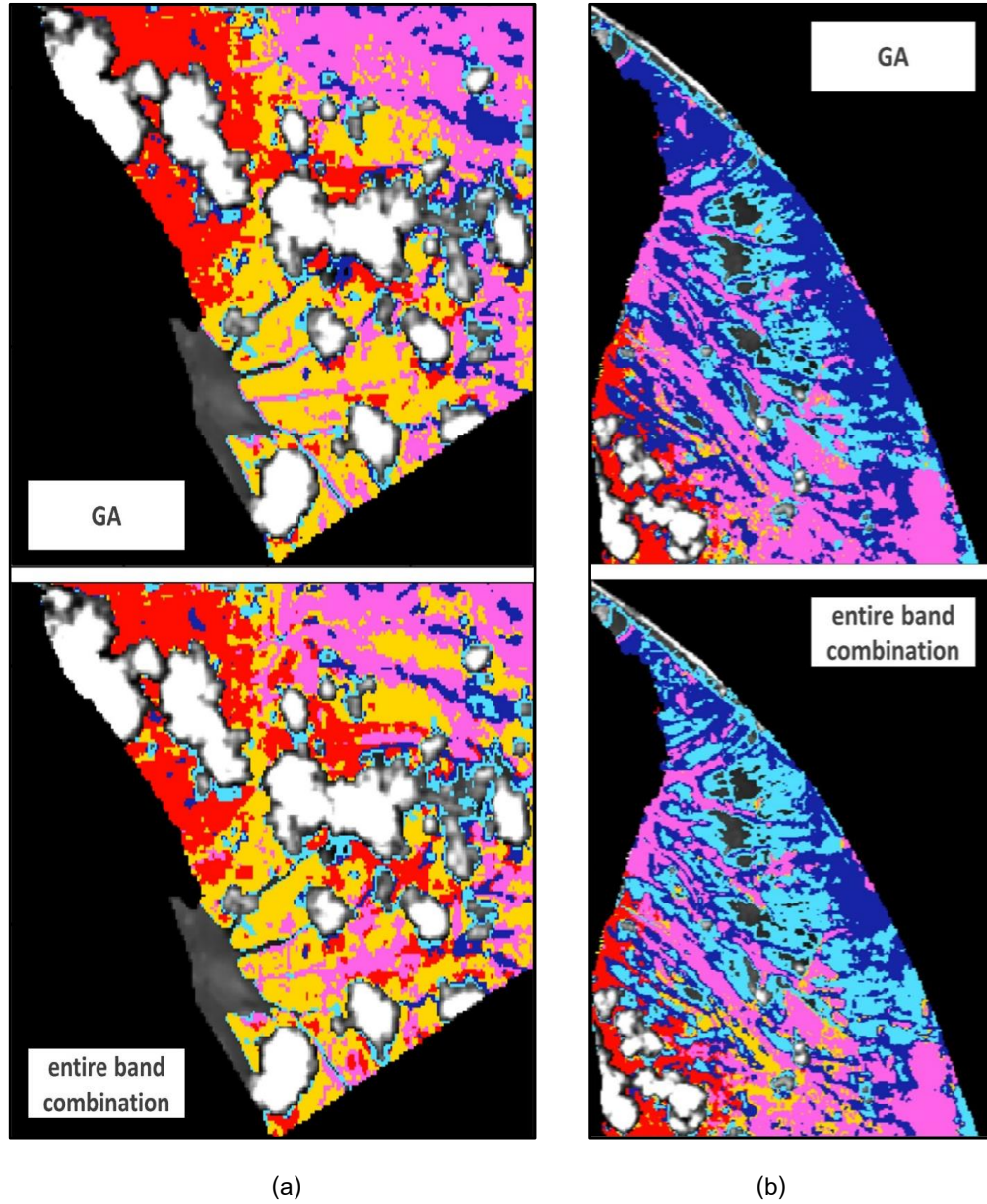
ตารางที่ 7 เมทริกซ์ความคลาดเคลื่อนกรณี (c) การใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA (OA ร้อยละ 80.72)

		ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม					ผลรวม	ความถูกต้องของผู้ใช้ (ร้อยละ)	ความถูกต้องของผู้ผลิต (ร้อยละ)
		RM	RA	AM	AA	BP			
ผลการจำแนกกรณี (c)	RM	26	8	0	0	0	34	76.47	78.79
	RA	3	14	0	0	0	17	82.35	51.85
	AM	2	1	44	0	5	52	84.62	100.00
	AA	0	1	0	29	6	36	80.56	96.67
	BP	2	3	0	1	21	27	77.78	65.63
	ผลรวม	33	27	44	30	32	166		

ความลำเอียงของผลการจำแนกเกิดขึ้นเมื่อใช้การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วยอัลกอริทึมที่ต่างกัน ทั้งนี้ค่าความถูกต้องของผู้ใช้และค่าความถูกต้องของผู้ผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากเปลี่ยนการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC เป็นการคัดช่วงคลื่นด้วย GA เช่นเดียวกันกับการใช้ GA ทดแทนการใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA เพียงอย่างเดียวจะมีผลโดยรวมของการจำแนกที่ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแยกความแตกต่างระหว่างโงกวางใบเล็กและโงกวางใบใหญ่ที่ได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้ GA จะสามารถปรับปรุงค่าความถูกต้องโดยรวมเพิ่มขึ้นจากเดิมแต่กลับพบว่าค่าความถูกต้องของผู้ผลิตและค่าความถูกต้องของผู้ใช้กรณีผสมขาวมีค่าลดลง



ภาพที่ 4 (a) ผลการจำแนกป่าชายเลนเมื่อใช้การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA จำนวน 9 ช่วงคลื่น (OA ร้อยละ 81.93)
(b) ผลการจำแนกป่าชายเลนเมื่อใช้แถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA (OA ร้อยละ 80.72)



ภาพที่ 5 (a) GA เพิ่มความถูกต้องของคลาสโกกางใบใหญ่ได้มากกว่าการจำแนกด้วยแถบสเปกตรัมทั้งหมดของ PRISMA
(b) ผลการจำแนกต้นถั่วดำที่ปะปนกับต้นแสมทะเลได้รับการปรับปรุงเพิ่มขึ้นเมื่อใช้การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA

4. ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการจำแนกทางสถิติ

ค่าความถูกต้องของการจำแนกป่าชายเลนจากการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA และ SMACC ถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างด้วย dependent sample t-test โดยผลการทดสอบสรุปว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก $H_0: (0.6721 - 0.6011) = 0.0710$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.00 ($p\text{-value} < 0.001$) (ตารางที่ 8) จึงเป็นการยืนยันได้ว่าการจำแนกที่ได้จากการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA ให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องสูงกว่าการจำแนกจากการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความถูกต้องในการจำแนกทั้งสองวิธีการ

Accuracy Assessment	ค่าสถิติการทดสอบ t (ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99)	จำนวนองศาอิสระ (Degrees of Freedom: DF)	p-value
Overall Accuracy	4.286	29	0.000
Kappa hat coefficient	4.328	29	0.000

วิจารณ์ผลการวิจัย

การทดสอบข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลภายในห้องปฏิบัติการพบว่าช่วงคลื่น 350 nm ถึง 2500 nm มีประสิทธิภาพต่อการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อนในประเทศไทย (Vaiphasa *et al.*, 2005) โดยมีช่วงคลื่น 720 nm, 1277 nm, 1415 nm และ 1644 nm ที่ไม่สามารถจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนในวงศ์ RHIZOPHORACEAE ได้อย่างชัดเจน (Vaiphasa *et al.*, 2006) อย่างไรก็ตามพบว่า การคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA ช่วยเพิ่มความถูกต้องของการจำแนกเมื่อใช้ชุดสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 513 ± 19 nm, 717 ± 16 nm, 1263 ± 23 nm, 1385 ± 27 nm, 1489 ± 21 nm และ 1669 ± 25 nm (Vaiphasa *et al.*, 2007b) สำหรับการจำแนกป่าชายเลนบริเวณแหลมตะลุมพุกโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion ร่วมกับเทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วยวิธีดังกล่าวพบว่าช่วงคลื่น 549 nm, 712 nm, 732 nm, 1034 nm, 1235 nm, 2073 nm และ 2083 nm เหมาะสมในการจำแนกโกงกางใบใหญ่, โกงกางใบเล็ก, แสมทะเล, แสมขาวและถั่วดำ โดยให้ความถูกต้องอยู่ที่ร้อยละ 92.00 (Koedsin & Vaiphasa, 2013) สำหรับการจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อนในงานวิจัยนี้ได้แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA (Hyperspectral cubes) โดยใช้ช่วงคลื่นทั้งหมด 170 ช่วงคลื่น เพื่อจำแนกป่าชายเลนในระดับสายพันธุ์ โดยหากลดจำนวนช่วงคลื่นเหลือ 9 ช่วงคลื่น ประกอบด้วยช่วงคลื่น 434 nm, 500 nm, 614 nm, 876 nm, 1163 nm, 1726 nm, 2052 nm, 2086 nm และ 2214 nm โดยอาศัยเทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วย GA พบว่าสามารถจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน 5 สายพันธุ์เด่นได้อย่างถูกต้องและปรับปรุงค่าความถูกต้องโดยรวมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80.72 เป็นร้อยละ 81.93 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเป็นที่ยอมรับตรงตามการสำรวจของหน่วยงานสำรวจทางธรณีวิทยาสหรัฐอเมริกา (United States Geological Survey, USGS) (Anderson, 1976) แต่ไม่สามารถจำแนกโกงกางใบเล็กและโกงกางใบใหญ่



ได้ชัดเจน (ตารางที่ 5) เนื่องจากค่าการสะท้อนของช่วงคลื่นมีความใกล้เคียงกันมาก (Koedsin & Vaiphasa, 2013; Vaiphasa *et al.*, 2005; Vaiphasa *et al.*, 2006) นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมของโคงกางทั้งสองสายพันธุ์ดังกล่าวอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม โดยมีต้นแสมขาวขึ้นปะปนกับต้นโคงกางบริเวณดินทราย ทำให้เกิดความสับสนเชิงคลื่นในกรณีการจำแนกแสมขาวด้วยเซนเซอร์ ส่วนแสมทะเลที่สามารถแยกความแตกต่างกับไม้สกุลโคงกาง (*Rhizophora* spp.) และพันธุ์ไม้เบิกนำชนิดอื่นได้อย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากแสมทะเลมีค่าการสะท้อนที่ต่ำกว่าพันธุ์ไม้ป่าชายเลนชนิดอื่นในทุกแถบสเปกตรัม โดยเฉพาะแถบสเปกตรัม NIR (ความยาวคลื่น 700 nm ถึง 900 nm) ซึ่งบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของเม็ดสีคลอโรฟิลล์ในใบแสมทะเลที่มีมากกว่าพันธุ์ไม้เบิกนำชนิดอื่น (Arfan *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2019; Zulfa *et al.*, 2021)

ผลการจำแนกป่าชายเลนโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ร่วมกับเทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วย GA ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 81.93 แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำแนกที่ได้จากงานวิจัยของ Koedsin & Vaiphasa (2013) โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion ร่วมกับการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA พบว่าผลการทดลองสามารถปรับปรุงค่าความถูกต้องโดยรวมได้มากถึงร้อยละ 92.00 ทั้งนี้เป็นผลมาจากตำแหน่งช่วงคลื่นของภาพถ่ายดาวเทียมที่ไม่สัมพันธ์กับข้อมูลภาคสนาม เนื่องจากช่วงเวลาการเก็บข้อมูลภาคสนามห่างจากวันที่บันทึกภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ประมาณ 10 ปี พันธุ์ไม้ป่าชายเลนในพื้นที่ศึกษามีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ (Panapitukkul *et al.*, 1998; Ghosh *et al.*, 2016; Halder *et al.*, 2021b) อย่างไรก็ตามเหตุผลที่งานวิจัยนี้มีการวัดและประเมินด้วยวิธีการดังกล่าวเพื่อต้องการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ด้วยข้อมูลภาคสนามที่จัดเก็บไว้ประมาณ 10 ปี โดยทดสอบกับการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA และ SMACC ร่วมกับตัวจำแนกแบบ SAM

สำหรับงานวิจัยของ Kumar *et al.* (2019) ได้นำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion จำนวน 151 ช่วงคลื่นมาจำแนกป่าชายเลนชุดบ้านสีจำนวน 7 สายพันธุ์ โดยทดสอบกับตัวจำแนกแบบ support vector machines (SVM), minimum distance (MD) และ SAM พบว่าการจำแนกด้วย SVM ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมมากถึงร้อยละ 99.08 การจำแนกด้วย MD ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมร้อยละ 95.63 และหากใช้ตัวจำแนกแบบ SAM จะให้ค่าความถูกต้องโดยรวมเพียงร้อยละ 88.51 ในงานวิจัยของ Wan *et al.* (2020) ได้นำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion และข้อมูล GF-5 ไฮเปอร์สเปกตรัลจำแนกป่าชายเลนจำนวน 6 สายพันธุ์ โดยทดสอบกับตัวจำแนกแบบ SVM และ random forests (RF) พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จาก RF ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมสูงกว่า SVM ในทุกข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 86.82 และ ร้อยละ 78.94 เมื่อใช้ภาพถ่ายดาวเทียมระบบ Hyperion ส่วนข้อมูล GF-5 ไฮเปอร์สเปกตรัลให้ค่าความถูกต้องโดยรวมร้อยละ 87.12 และ 78.94 ดังนั้นหากต้องการเพิ่มความถูกต้องของการจำแนกจึงแนะนำให้ควรเก็บข้อมูลภาคสนามให้ใกล้เคียงกับช่วงเวลาการถ่ายภาพ ตลอดจนใช้การวัดผลด้วยวิธีอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การเปรียบเทียบกับผลการประเมินภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงด้วยสายตามนุษย์หรือสุ่มสำรวจภาคสนามบางส่วน (Wan *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2022) และเลือกใช้วิธีการจำแนกแบบ SVM หรือ RF (Kumar *et al.*, 2019; Wan *et al.*, 2020) ให้เหมาะสมกับลักษณะการกระจายตัวของพันธุ์ไม้ป่าชายเลนในแต่ละพื้นที่ศึกษา



สรุปผลการวิจัย

การใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA สามารถจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน 5 สายพันธุ์เด่นได้อย่างถูกต้อง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการคัดเลือกช่วงคลื่นที่เหมาะสมด้วย GA จะช่วยปรับปรุงค่าความถูกต้องโดยรวมได้สูงกว่าและจำแนกพันธุ์ไม้ที่มีความสับสนเชิงคลื่นออกจากกันได้ดีกว่าหากเปรียบเทียบกับวิธีการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย SMACC อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการคัดเลือกช่วงคลื่นด้วย GA มีความยืดหยุ่นในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อวิวัฒนาการ เช่น เวลาและจำนวนรอบในการเรียนรู้โมเดล อีกทั้งข้อมูลภาคสนามที่นำมาใช้มีระยะเวลาห่างจากวันที่บันทึกภาพถ่ายดาวเทียม 10 ปี แต่องค์ประกอบของป่าชายเลนมีความยืดหยุ่นต่อเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติซึ่งข้อจำกัดดังกล่าวอยู่เหนือขอบเขตของงานวิจัยนี้ จึงแนะนำว่าหากเลือกใช้วิธีการจำแนกแบบ SVM หรือ RF ตลอดจนเปรียบเทียบกับการประเมินภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงด้วยสายตามนุษย์หรือเลือกสุ่มสำรวจภาคสนามบางส่วน จะช่วยปรับปรุงผลการจำแนกให้มีความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นการทดสอบประสิทธิภาพข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม PRISMA ครั้งนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการประยุกต์ใช้ข้อมูลฟรีมาไฮเปอร์สเปกตรัลเพื่อจำแนกพืชระดับสายพันธุ์ในพื้นที่อื่น ๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับ “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต” ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณ ดร.ธีรพงศ์ ปานบุญยืน ที่ได้พัฒนาและให้ความอนุเคราะห์โค้ด genetic algorithm เป็นภาษา python ขอขอบคุณ รศ.ดร.วีระพงศ์ เกิดสิน ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลภาคสนามในการศึกษา ขอขอบคุณสถานที่พัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 15 และ 44 นครศรีธรรมราช กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ที่ให้ความอนุเคราะห์บุคลากรและเรือสำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

Adame, M. F., Connolly, R. M., Turschwell, M. P., Lovelock, C. E., Fatoyinbo, T., Lagomasino, D., Goldberg, L. A., Holdorf, J., Friess, D. A., & Sasmito, S. D. (2021). Future carbon emissions from global mangrove forest loss. *Global change biology*, 27(12), 2856-2866.

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

Arfan, A., Toriman, M., Maru, R., & Sukri Nyompa, U. (2015). Reflectance characteristic of mangrove species using spectroradiometer HR-1024 in Suppa Coast, Pinrang, South Sulawesi, Indonesia. *Asian Journal of Applied Sciences*, 3(5).



- Bai, J., Meng, Y., Gou, R., Lyu, J., Dai, Z., Diao, X., Zhang, H., Luo, Y., Zhu, X., & Lin, G. (2021). Mangrove diversity enhances plant biomass production and carbon storage in Hainan island, China. *Functional Ecology*, 35(3), 774-786.
- 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.
- Basyuni, M., Nainggolan, S., Qurrahman, T., Hasibuan, P., Sumaiyah, S., Sumardi, S., Siregar, E., & Nuryawan, A. (2019). Effect of Salt and Fresh Water Concentration on Polyisoprenoid Content in *Bruguiera cylindrica* Seedlings. *Open access Macedonian journal of medical sciences*, 7(22), 3803-3806.
- Chakraborty, S. K. (2019). Bioinvasion and Environmental Perturbation: Synergistic Impact on Coastal-Mangrove Ecosystems of West Bengal, India. In *Impacts of Invasive Species on Coastal Environments*. (pp. 171-245). Cham: Springer.
- 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.
- Collins, D., Nguyen, V., Ta, T., Mao, L., Ishii, Y., Kitagawa, H., Nakashima, R., Vo, T., & Tamura, T. (2021). Sedimentary evolution of a delta-margin mangrove in Can Gio, northeastern Mekong River delta, Vietnam. *Marine Geology*, 433, 106417.
- Constance, A., Haverkamp, P. J., Bunbury, N., & Schaepman-Strub, G. (2021). Extent change of protected mangrove forest and its relation to wave power exposure on Aldabra Atoll. *Global Ecology and Conservation*, 27, e01564.



- Da Silva, M. F., Cruz, M. V., Vidal Júnior, J. D. D., Zucchi, M. I., Mori, G. M., & De Souza, A. P. (2021). Geographical and environmental contributions to genomic divergence in mangrove forests. *Biological Journal of the Linnean Society*, 132(3), 573-589.
- Fauzi, N.F.M., Min, T.H. & Hashim, A.M. (2020). Assessment of Mangrove Replanting Site at Kg Tanjung Kepah, Lekir, Perak. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 549, 012054.
- Friis, G., & Burt, J. A. (2020). Evolution of mangrove research in an extreme environment: Historical trends and future opportunities in Arabia. *Ocean & Coastal Management*, 195, 105288.
- 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.
- Ghosh, M. K., Kumar, L., & Roy, C. (2016). Mapping long-term changes in mangrove species composition and distribution in the Sundarbans. *Forests*, 7(12), 305.
- Gruninger, J.H., Ratkowski, A.J., & Hoke, M.L. (2004). The sequential maximum angle convex cone (SMACC) endmember model. In *Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery X*. (pp. 1-14). International Society for Optics and Photonics.
- Halder, N.K., Merchant, A., Misbahuzzaman, K., Wagner, S., & Mukul, S.A. (2021a). Why some trees are more vulnerable during catastrophic cyclone events in the Sundarbans mangrove forest of Bangladesh? *Forest Ecology and Management*, 490, 119117.
- Halder, S., Samanta, K., Das, S., & Pathak, D. (2021b). Monitoring the inter-decade spatial-temporal dynamics of the Sundarban mangrove forest of India from 1990 to 2019. *Regional Studies in Marine Science*, 44, 101718.



He, Z., Shi, Q., Liu, K., Cao, J., Zhan, W., & Cao, B. (2020). Object-oriented mangrove species classification using hyperspectral data and 3-D siamese residual network. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(12), 2150-2154.

Hickey, S., Radford, B., Callow, J., Phinn, S., Duarte, C. M., & Lovelock, C. (2021). ENSO feedback drives variations in dieback at a marginal mangrove site. *Scientific reports*, 11(1), 1-9.

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., & Vaiphasa, C. (2020). Modeling Mangrove Above-Ground Biomass Using Terrestrial Laser Scanning Techniques: A Case Study of the *Avicennia marina* Species in the Bang Pu District, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 16(2), 53-62.

Jannoud, I., Jaradat, Y., Masoud, M. Z., Manasrah, A., & Alia, M. (2022). The Role of Genetic Algorithm Selection Operators in Extending WSN Stability Period: A Comparative Study. *Electronics*, 11(1), 28.

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.

Khamprakop, S. (1975). *Ministerial Regulation No. 732 (B.E. 2518)*. Retrieved March 12, 2022, from http://old.forest.go.th/nakhonsithammarat_12/dmdocuments/S1008.pdf. (in Thai)

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

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.

MOAC. (1965). *Ministerial Regulation No. 63 (B.E. 2508)*. Retrieved March 12, 2022, from http://old.forest.go.th/nakhonsithammarat_12/dmdocuments/S1003_63_2508.pdf. (in Thai)



- Murugan, S., & Anandhi, D. U. (2016). An overview of crustacean diversity in mangrove ecosystem. In: Chakravarthy A., *Arthropod Diversity and Conservation in the Tropics and Sub-tropics*. (pp. 81-99). Singapore: Springer.
- Panapitukkul, N., Duarte, C., Thampanya, U., Kheowongsri, P., Srichai, N., Geertz-Hansen, O., Terrados, J., & Boromthanarath, S. (1998). Mangrove colonization: mangrove progression over the growing Pak Phanang (SE Thailand) mud flat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(1), 51-61.
- 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.
- Salghuna, N., & Pillutla, R. (2017). Mapping Mangrove Species Using Hyperspectral Data: A Case Study of Pichavaram Mangrove Ecosystem, Tamil Nadu. *Earth Systems and Environment*, 1(2), 1-12.
- Shen, X., Zhang, Z., Zhai, C., & Li, R. (2022). A Meta-Analysis of the Overall Accuracy of Extent and Species of the Coastal Mangroves. *Beijing Da Xue Xue Bao*, 58(1), 135-146.
- 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.
- Teeratanatom, W. (2000). *Mangroves of Pak Phanang Bay*. Bangkok: Royal Forest Department. (in Thai)
- Thompson, D. R., Mandrake, L., Gilmore, M. S., & Castano, R. (2010). Superpixel endmember detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(11), 4023-4033.



Thuy, T. D., Tuan, V. Q., & Nam, P. K. (2021). Does the devolution of forest management help conserve mangrove in the Mekong Delta of Viet Nam? *Land Use Policy*, 106, 105440.

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., Bamrongrugsu, 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, Y., Chao, B., Dong, P., Zhang, D., Yu, W., Hu, W., Ma, Z., Chen, G., Liu, Z., & Chen, B. (2021). Simulating spatial change of mangrove habitat under the impact of coastal land use: Coupling MaxEnt and Dyna-CLUE models. *Science of The Total Environment*, 788, 147914.

Wilkerson, S. (2008). Application of the Paired t-test. *XULAnEXUS*, 5(1), 7.

Wiransky, E. (2020). *Hands-on genetic algorithms with Python: applying genetic algorithms to solve real-world deep learning and artificial intelligence problems*. Packt Publishing Ltd.

Wong, F. K., & Fung, T. (2014). Combining EO-1 Hyperion and Envisat ASAR data for mangrove species classification in Mai Po Ramsar Site, Hong Kong. *International Journal of Remote Sensing*, 35(23), 7828-7856.

Xia, J., Yokoya, N., & Pham, T. D. (2020). Probabilistic mangrove species mapping with multiple-source remote-sensing datasets using label distribution learning in Xuan Thuy National Park, Vietnam. *Remote Sensing*, 12(22), 3834.

Zulfa, A., Norizah, K., Hamdan, O., Faridah-Hanum, I., Rhyma, P., & Fitrianto, A. (2021). Spectral signature analysis to determine mangrove species delineation structured by anthropogenic effects. *Ecological Indicators*, 130, 108148.